

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

DOUGLAS BIGOLIN LEONHARDT

**MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA INTEGRADO À
INTERNET DAS COISAS**

ITAJAÍ, 2021.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

DOUGLAS BIGOLIN LEONHARDT

**MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA INTEGRADO À
INTERNET DAS COISAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Dr. Roddy Alexander Romero Antayhua

ITAJAÍ, 2021.

Leonhardt, Douglas Bigolin

MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA
INTEGRADO À INTERNET DAS COISAS / Douglas Bigolin
Leonhardt ; orientação de Roddy Alexander Romero Antayhua.
– Itajaí,
SC, 2021.
170 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de
Santa Catarina, Campus Itajaí. Bacharelado em Engenharia
Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrônica.
Inclui Referências.

1. Consumo de energia elétrica. 2. LoRa. 3. Internet das Coisas.
4. Telemetria. I. Roddy Alexander Romero Antayhua. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de
Eletrônica. III. Título.

MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA INTEGRADO À INTERNET DAS COISAS

DOUGLAS BIGOLIN LEONHARDT

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Itajaí, 20 de setembro, 2021.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
rodry.romero\;RODDY ALEXANDER ROMERO AN
Data: 21/09/2021 16:08:05-0300
CPF: 847.069.960-15

Roddy Alexander Romero Antayhua, Dr
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
GUILHERME RANZOLIN PIAZZETTA
Data: 14/10/2021 14:19:25-0300
CPF: 048.696.069-25

Guilherme Ranzolin Piazzetta, M.e
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
JOAO PAULO CAMELO CUNHA
Data: 08/10/2021 15:12:26-0300
CPF: 000.351.313-06

João Paulo Camelo Cunha, M.e
Instituto Federal de Santa Catarina

“Siga seu próprio caminho pra ser feliz de verdade.”

(Raul Seixas)

RESUMO

O custo de energia elétrica é um tópico muito importante, principalmente em nosso país onde dependemos tanto da geração de energia hidroelétrica onde têm-se variações no custo de energia. Além disto, têm-se também o fator da necessidade da conscientização da população acerca do uso de energia elétrica, bem como garantir que haja uma energia com menos desperdício. Devido a esses fatores, desenvolveu-se um medidor de consumo de energia elétrica integrado à internet das coisas (IoT), possuindo uma plataforma para monitoramento por parte do cliente e fornecedor. Para apuração dos resultados fornecidos, foram realizados testes em equipamentos onde o consumo e fator de potência eram conhecidos, também sendo realizado o teste em uma residência durante um período de tempo, onde o consumo é então comparado com o medidor padrão instalado na residência. O sistema é construído com a utilização de um transformador de corrente, transformador de tensão, amplificadores operacionais para amplificação do sinal, microcontrolador ATmega328P, placa para transmissão de dados via protocolo de comunicação LoRa e um *gateway* para recebimento dos dados e posterior postagem no servidor.

Palavras-chave: Consumo de energia elétrica; LoRa; Internet das Coisas; Telemetria.

ABSTRACT

The cost of electric energy is a very important topic, especially in Brazil where we depend so much on hydroelectric power generation where there are variations in the cost of energy. Moreover, there is also an increase in the need to raise awareness among the population about the use of electricity, as well as ensuring that there is energy with less waste. Due to these factors, a system for measuring electricity consumption and power factor integrated to the Internet of Things (IoT) was developed with a platform for monitoring by the customer and supplier. To determine the results provided, tests were carried out on equipment where the consumption and power factor was known, and the test was also carried out in a residential house for a period of time, where the consumption at the time is then compared with the standard meter installed outside the house. The system was built with the use of a current transformer, potential transformer, operational amplifiers for signal amplification, ATmega328P microcontroller, board for data transmission via LoRa and a *gateway* for receiving and posting data on server.

Key-words: Electrical Energy Consumption; LoRa; Internet of Things; Telemetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira 2020	20
Figura 2 – Medidor Inteligente de Energia SMW.....	22
Figura 3 – Projeto montado dentro da caixa organizadora.....	27
Figura 4 – Serviço <i>Thingspeak</i> para monitoramento.....	27
Figura 5 – Gerador fotovoltaico Integrado à IoT.....	28
Figura 6 – Sistema de aquisição e controle IoT	29
Figura 7 – Dados exibidos no serviço <i>Blink</i>	29
Figura 8 – Projeto final montado	30
Figura 9 – PCB contendo os sensores de tensão	32
Figura 10 – PCB contendo os sensores de corrente.....	33
Figura 11 – PCB contendo o microcontrolador.....	33
Figura 12 – Dados exibidos no aplicativo	35
Figura 13 – Consumo de energia em cada sensor.....	36
Figura 14 – Protótipo montado	37
Figura 15 – Dados exibidos no PowerBI	37
Figura 16 – Protótipo montado	38
Figura 17 – Dados exibidos no display.....	38
Figura 18 – Fluxo de elétrons devido a uma ddp	42
Figura 19 – Exemplo de corrente CC.....	43
Figura 20 – Exemplo corrente CA	43

Figura 21 – Tensão entre terminais “a” e “b”	45
Figura 22 – Fontes geradoras de tensão CA	45
Figura 23 – Sinais senoidais função seno e cosseno.....	47
Figura 24 – Variáveis de um sinal senoidal.....	48
Figura 25 – Comparação entre ondas senoidais de 60 e 80 Hz.....	49
Figura 26 – Valor médio de uma senoide graficamente	51
Figura 27 – Sinal senoidal com valor médio igual a zero	52
Figura 28 – Sinal senoidal com valor médio igual a dois.....	52
Figura 29 – Circuito exemplo para o valor eficaz	53
Figura 30 – Onda de potência resultante	54
Figura 31 – Ondas de tensão, corrente e potência resultante.....	55
Figura 32 – Triângulo de potência.....	58
Figura 33 – Cálculo gráfico da potência reativa	58
Figura 34 – Triângulo de potência para carga indutiva e capacitiva.....	59
Figura 35 – Transformador de corrente utilizado no projeto.....	60
Figura 36 – Transformador de tensão utilizado no projeto	61
Figura 37 – Saída digital de um transdutor	62
Figura 38 – Saída analógica de um transdutor.....	62
Figura 39 – Amperímetros “soltos”	64
Figura 40 – Multímetro com e sem alicate amperímetro	65
Figura 41 – Método resistor série.....	65

Figura 42 – Semicondutor percorrido por corrente elétrica	66
Figura 43 – Semicondutor percorrido por corrente elétrica exposto à campo magnético.....	67
Figura 44 – Método resistor shunt.....	68
Figura 45 – Relé térmico WEG.....	68
Figura 46 – Amplificador operacional: pinagem do CI e respectiva representação...	70
Figura 47 – Representação simplificada do Amp-Op.....	70
Figura 48 – Amplificador não inversor.....	71
Figura 49 – Saída do amplificador não inversor	71
Figura 50 – Configuração seguidor de tensão ou <i>Buffer</i>	72
Figura 51 – Saída do seguidor de tensão com ceifamento	72
Figura 52 – Composição de um microcontrolador.....	74
Figura 53 – IDE do Arduino	74
Figura 54 – Placa Arduino UNO	75
Figura 55 – Composição de uma rede LoRaWAN	76
Figura 56 - Placa LoRa SX1276 utilizada.....	77
Figura 57 – Ganhos e perdas em um enlace de comunicação LoRa.....	79
Figura 58 – Proporção entre bits que carregam informação e bits que são para verificação	81
Figura 59 – Arquitetura da plataforma IBM Watson IoT	83
Figura 60 – Nós utilizados no <i>Node-Red</i>	84
Figura 61 – Diagrama geral do projeto.....	85

Figura 62 – Diagrama melhor detalhado do circuito de aquisição.....	85
Figura 63 – Circuito para adição de sinal CC.....	88
Figura 64 – Circuito utilizado para condicionar o sinal de tensão.....	89
Figura 65 – Circuito de aquisição montado	91
Figura 66 – Ligações entre o circuito de controle e a placa LoRa.....	93
Figura 67 – Plataforma da IBM Watson IoT	96
Figura 68 – Ordenamento dos dados armazenados	97
Figura 69 – Ambiente Node-Red.....	98
Figura 70 – Bloco para exibir as últimas medições	98
Figura 71 – Blocos para exibir as médias	99
Figura 72 – Mensagens previamente recebidas pelo Node-Red.....	100
Figura 73 - Seleção do modo de ordenamento	100
Figura 74 – Criação de um índice para ordenamento	101
Figura 75 – Layout da parte inferior da placa de circuito impresso	103
Figura 76 – Layout da parte superior da placa de circuito impresso	103
Figura 77 – Visão 3D da placa de circuito impresso	104
Figura 78 – Layout da parte superior da placa do circuito de comunicação.....	104
Figura 79 – Visão 3d da placa do circuito de comunicação	105
Figura 80 – Placa do circuito de comunicação confeccionada.....	105
Figura 81 – Saída escala mais sensível quando submetida a uma carga de 5,19 A	108

Figura 82 – Saída escala mais sensível quando submetida a uma carga de 8,46 A	108
Figura 83 – Saída escala mais sensível quando submetida a uma carga de 0,25 A	109
Figura 84 – Dados da última mensagem recebida	111
Figura 85 – Médias aritméticas feitas a cada 10 minutos.....	111
Figura 86 – Médias aritméticas feitas a cada hora	112
Figura 87 – Médias aritméticas feitas a cada dia	113
Figura 88 – Médias aritméticas feitas a cada mês	113
Figura 89 – Medidas da última mensagem do dispositivo 1	114
Figura 90 – Médias aritméticas feitas a cada dez minutos do dispositivo 1	114
Figura 91 – Médias aritméticas feitas a cada hora do dispositivo 1	115
Figura 92 – Medidas da última mensagem do dispositivo 2.....	115
Figura 93 – Médias aritméticas feitas a cada dez minutos do dispositivo 2	116
Figura 94 – Médias aritméticas feitas a cada hora do dispositivo 2	116
Figura 95 – Guias para exibição dos dados	117
Figura 96 – Instalação do projeto na residência.....	118
Figura 97 – Instalação do sensor de corrente no disjuntor geral.....	118
Figura 98 – Local onde foi feito o teste em distância de 110 metros.....	123
Figura 99 – Local onde foi feito o teste em distância de 120 metros.....	124
Figura 100 – Módulo ZMPT101B	134
Figura 101 – Circuito utilizado para calcular o fator de potência com ondas quadradas	135

Figura 102 – Circuito de aquisição com porta XOR	136
Figura 103 – Ondas de corrente e tensão do chuveiro	137
Figura 104 – Ondas de corrente e tensão do secador	137
Figura 105 – Ondas de corrente e tensão do forno elétrico	138
Figura 106 – Onda de corrente medida em um micro-ondas	139
Figura 107 – Onda de corrente de um micro-ondas.....	139
Figura 108 – Corrente e tensão do micro-ondas sem transformar em onda quadrada	140
Figura 109 – Ondas quadradas da corrente e tensão do micro-ondas	140
Figura 110 – Ondas quadradas da corrente e tensão da geladeira	141
Figura 111 – Escala para correntes menores com resistores	161
Figura 112 – Onda lida pelo circuito de controle com harmônicas.....	162
Figura 113 – Onda lida pelo circuito de controle após montar a escala com resistores	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erro relativo das medições feitas.....	31
Tabela 2 – Modelos de placas de comunicação LoRa da marca Semtech	77
Tabela 3 – Países e suas respectivas frequências permitidas para uso da rede LoRaWAN	78
Tabela 4 – Ligações entre a placa LoRa SX1276 e o Arduino	93
Tabela 5 – Consumo observado no medidor da residência durante o teste de 22 horas	119
Tabela 6 – Consumo observado no medidor da residência durante o teste de 52 horas	120
Tabela 7 – Consumo observado no medidor da residência durante o teste de 36 horas	121
Tabela 8 – Indicadores da comunicação LoRa em uma distância de 4 metros com SF = 7.....	122
Tabela 9 – Indicadores da comunicação LoRa em uma distância de 110 metros com SF = 11.....	123
Tabela 10 – Indicadores da comunicação LoRa em uma distância de 120 metros com SF = 11	124

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	24
1.1.1	Trabalhos correlatos	26
1.1.1.1	Martins	26
1.1.1.2	Rodrigues, <i>et al.</i>	28
1.1.1.3	Costa, Sermann e Silva	30
1.1.1.4	Motter e França	31
1.1.1.5	Newman, <i>et al.</i>	34
1.1.1.6	Barbosa	36
1.1.1.7	Breda, Medeiros e Araújo	37
1.2	Definição do problema	39
1.3	Objetivo geral.....	39
1.4	Objetivos específicos	39
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
2.1	Corrente elétrica	41
2.1.1	Corrente CC.....	42
2.1.2	Corrente CA.....	43
2.2	Tensão elétrica	43
2.3	Energia e Potência	46
2.4	Características de sinais senoidais.....	47

2.4.1	Valor instantâneo e médio	48
2.4.2	Valor RMS ou eficaz	51
2.5	Potência em circuitos alternados	54
2.5.1	Potência aparente e fator de potência	55
2.5.2	Potência complexa	56
2.6	Transformadores	59
2.6.1	Transformador de corrente	59
2.6.2	Transformadores de tensão	60
2.7	Sensores	61
2.7.1	Tipos de saída	61
2.7.2	Classificação dos sensores	63
2.7.3	Sensor de corrente	63
2.7.3.1	Amperímetro	64
2.7.3.2	Resistor série	65
2.7.3.3	Efeito Hall	66
2.7.3.4	Resistor Shunt	67
2.7.3.5	Relé térmico	68
2.8	Amplificador Operacional	69
2.8.1	Amplificador não inversor	70
2.8.2	Seguidor de tensão ou <i>Buffer</i>	72
2.9	Arduino	73

2.10	Protocolo LoRa	75
2.10.1	LoRaWAN	76
2.10.2	End Nodes	76
2.10.3	Frequências LoRaWAN	77
2.10.4	Parâmetros de transmissão	78
2.10.5	Parâmetros de recepção	81
2.11	Plataforma IBM Watson IoT	82
2.12	Node-Red	83
3	MATERIAIS E MÉTODOS	85
3.1	Transformador de corrente	85
3.2	Adição de sinal CC	87
3.3	Redução do valor de pico da tensão	88
3.4	Circuito de aquisição	89
3.5	Códigos utilizados no circuito de controle	91
3.5.1	Função para cálculo das medições	91
3.5.2	Funções para criar e enviar mensagem ao <i>Gateway</i>	92
3.6	Códigos utilizados no <i>Gateway</i>	93
3.6.1	Função para receber mensagens do circuito de medição	94
3.6.2	Função para realizar o envio para o servidor da IBM Cloud	94
3.7	Teste de distância	95
3.8	Plataforma IBM	95
3.9	Interface Node-Red	96

3.10	Armazenamento	99
3.11	Teste com dois circuitos medidores.....	101
3.12	Confecção da placa de circuito impresso	102
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	106
4.1	Verificação e ajuste	106
4.1.1	Tensão elétrica	106
4.1.2	Corrente elétrica	107
4.1.3	Fator de potência.....	109
4.2	Dados recebidos no servidor da IBM Cloud.....	110
4.2.1	Última mensagem recebida	110
4.2.2	Média dos valores a cada 10 minutos	111
4.2.3	Média dos valores por hora	111
4.2.4	Média diária dos valores	112
4.2.5	Média mensal dos valores	113
4.3	Teste com dois medidores.....	113
4.4	Comparação entre os dados obtidos e o medidor da residência	117
4.4.1	Primeira bateria de testes (22 horas).....	118
4.4.2	Segunda bateria de testes (52 horas).....	119
4.4.3	Terceira bateria de testes (36 horas).....	120
4.5	Distância máxima de comunicação	121
4.5.1	Distância de 4 m	121
4.5.2	Distância de 110 metros	123

4.5.3 Distância máxima	123
5 CONCLUSÃO	126
REFERÊNCIAS.....	128
APÊNDICES	133
APÊNDICE A – Métodos e resultados de outras versões exploradas do circuito de medição.....	133
APÊNDICE B – Código empregado no circuito de controle para realizar as medições.....	142
APÊNDICE C – Código empregado no circuito de controle para transmitir as medições.....	145
APÊNDICE D – Código empregado no gateway para receber as medições	146
APÊNDICE E – Código empregado no gateway para enviar as medições recebidas.....	148
APÊNDICE F – Funções principais utilizadas em nós do Node-Red	151
APÊNDICE G – Função do <i>sender</i> para teste de distância.....	153
APÊNDICE H – Função do <i>receiver</i> para teste de distância	156
APÊNDICE I – Código utilizado no dispositivo de teste	159
APÊNDICE J – Escala para correntes menores com resistores	161
ANEXOS	164
ANEXO A – Tabelas das propriedades dos sensores (adaptado pelo autor) ..	164
ANEXO B – Tabelas dos planos para a plataforma IBM Watson IoT	167

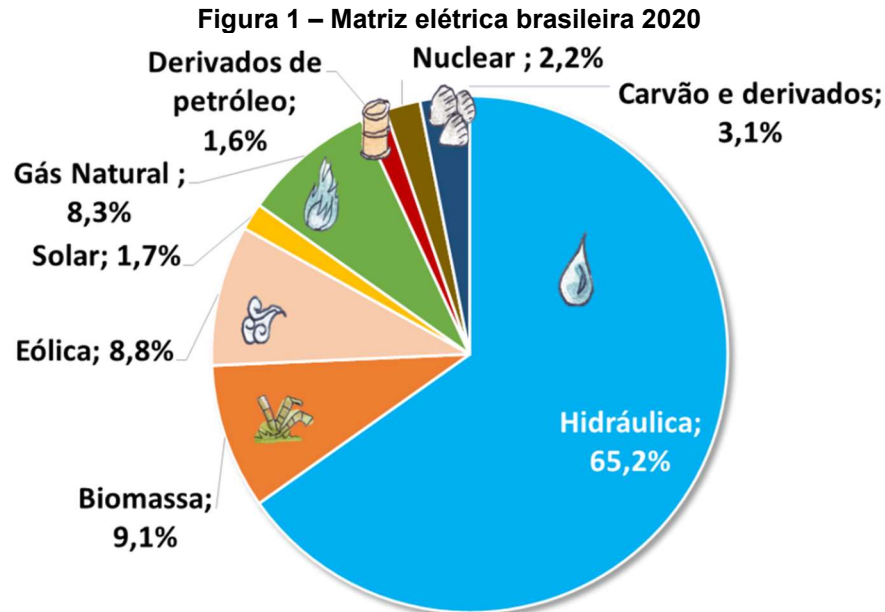
1 INTRODUÇÃO

Está cada vez mais presente a preocupação com o custo de nossas contas de energia elétrica. Entretanto, ter uma boa conscientização durante o consumo, não apenas ajuda a manter a conta barata, mas também ajuda a concessionária de energia, pois de acordo com Cerri (2016), além do fato dos condomínios residenciais serem grandes consumidores de energia elétrica, é de suma importância haver conscientização durante o consumo de energia, devido ao fato da matriz energética brasileira ser ainda muito dependente de usinas hidrelétricas.

Além do problema de nossa matriz energética, têm-se um crescimento populacional e conseqüentemente, um aumento considerável no consumo de energia elétrica. De acordo com Feitosa e Gomes (2009), o aumento populacional, bem como o crescimento econômico visando lucros progressivos sem o entendimento de que os recursos naturais podem acabar, contribuem com os desajustes ambientais, além do aumento de pressão sobre a demanda por serviços de consumo.

De acordo com Santiago (2021), as tarifas de energia elétrica devem ter um aumento médio de 14,5 % em 2021 segundo dados de um estudo realizado pela TR Soluções, empresa nacional de tecnologia que desenvolve sistemas para o setor elétrico. O provável motivo, ao que tudo indica, é devido à alta de 15,5 % no serviço de distribuição de energia elétrica, sendo esse aumento associado a variações obtidas em 2020 pelo Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M). Dessa forma, como grande parte das empresas de energia vinculam as receitas ao IGP-M e ao Índice Nacional de Preços ao Consumidor (IPCA), essas variações também são repassadas aos consumidores finais.

Segundo Agência Brasil (2021), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou uma nova bandeira tarifária, correspondendo a um aumento de cerca de 50 % no custo do consumo, quando comparado com a bandeira tarifária anteriormente utilizada como maior patamar para casos de seca. Esta decisão foi tomada em meio à crise hidrológica, onde o supramencionado encarecimento no custo da energia elétrica deve-se ao fato da necessidade do aumento de produção de energia elétrica via usinas termoelétricas, pois as usinas hidrelétricas já estão operando no limite.



Fonte: Empresa de pesquisa energética¹

Além dos fatores supramencionados, ainda existe outro fator que é atualmente bastante presente durante a época de pandemia por recomendação da ANEEL, que segundo Castro (2020), tem afetado majoritariamente as empresas. Se trata do cálculo por estimativa que já era feito anteriormente caso não fosse possível ter acesso ao medidor, onde a fatura do mês atual é feita como uma estimativa de acordo com as faturas dos meses anteriores. Dessa forma, mesmo que empresas não abram durante o período de pandemia, ainda serão cobradas de acordo com as faturas passadas.

Segundo Datatem (2020), os medidores analógicos que são utilizados atualmente nas residências oferecem apenas uma atualização do consumo de energia elétrica por mês em forma de fatura, enquanto que, os medidores inteligentes, são dispositivos que fornecem medições precisas e rápidas, acabando com a necessidade de visitas domiciliares para medição e desligamentos. Dessa maneira, têm-se vantagens como agilidade na medição, um consumidor mais consciente com o consumo de energia elétrica, economia e também uma redução de falhas no fornecimento de energia.

De acordo com Yao *et al.* (2018), o medidor de energia inteligente é um sistema de monitoramento, coleta de informações, comunicação, também possuindo interação entre o usuário e o controle de energia consumida. Além disso, também é destacada a importância do uso do medidor no novo cenário das *Smart Grids*, sendo

¹ <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

necessário uma alta precisão e durabilidade. *Smart Grid*, ou rede inteligente em português, segundo Sioshansi (2011), é definida como sendo qualquer combinação de tecnologias inovadoras, *hardware*, *software*, ou práticas que, coletivamente, tornam a infraestrutura da rede mais confiável, versátil, segura, flexível e, principalmente, mais útil para os consumidores. Já de acordo com documentos técnicos do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2012), o conceito de Redes Inteligentes, essencialmente, está relacionado à abordagem da rede de energia elétrica dotada de tecnologias digitais e recursos computacionais e de comunicação avançados, com o intuito de monitoramento e gerenciamento da eletricidade ao longo da estrutura de transporte e distribuição aos consumidores finais.

No Reino Unido, desde 2016 começaram a ser utilizados medidores inteligentes de energia e, em 2019, após feita uma pesquisa, constatou-se que a maioria das pessoas relataram estar mais conscientes com a quantidade de energia elétrica que estavam utilizando desde que instalaram o medidor inteligente, enquanto que, aproximadamente metade das pessoas que responderam, estavam menos preocupadas com suas respectivas futuras contas (SÖNNICHSEN, 2020).

“Os medidores inteligentes terão potencial para integrar outros serviços no futuro, como microgeração distribuída, tecnologias de armazenamento de energia, controle da iluminação pública e abastecimento de carros elétricos”, explicou Maximiliano Orfali, diretor-geral da Copel Distribuição. “As redes inteligentes serão fundamentais para as smart cities, para iluminação pública, semáforos, integração de dados. Teremos condições de oferecer serviços que ainda não conhecemos”, arrematou Orfali. (SUDESTE, 2021).

Atualmente estão sendo produzidos e comercializados no Brasil medidores inteligentes, alguns desses modelos, são os da família SMW da fabricante WEG, que servem tanto para consumidores residenciais quanto comerciais, possuindo as versões monofásica e polifásica. Esses modelos da família SMW, contam com um módulo de comunicação intercambiável que pode operar de 902 até 907,5 MHz e 915 até 928 MHz, desde que opere com a tecnologia de espalhamento espectral com salto em frequência (HFSS). Através do módulo de comunicação, é feita a comunicação em uma rede de área da vizinhança (NAN) até o roteador Cisco (CGR 1240), não dependendo da internet do usuário. A instalação do medidor de energia modelo SMW é semelhante a dos medidores atuais,

realizando a conexão dos cabos através de seus *bornes*, entretanto, em seu interior, está presente uma bateria com autonomia de até 13 anos para envio das medições mesmo quando não houver energia elétrica.

Figura 2 – Medidor Inteligente de Energia SMW



Fonte: WEG²

O medidor de modelo SMW ainda possui um software para configuração, manutenção e leitura local, se comunicando através de uma conexão segura, garantindo que somente pessoas autorizadas tenham acesso às informações, garante também mais flexibilidade para mudança de tarifa da energia elétrica, atualização local ou remota do firmware, memória interna para armazenamento de medições por um período de até 37 dias, relé de corte e também o relé de religamento como um item opcional. Acerca da instalação do medidor por parte do consumidor, já em 2017, de acordo com O Globo (2017), os consumidores poderiam instalar medidores próprios para conferir o consumo de produtos e serviços como eletricidade, gás e água, sendo proposto pelo Projeto de Lei Complementar 113/2014, aprovado na Comissão de Transparência, Governança, Fiscalização e Controle e Defesa do Consumidor (CTFC).

Levando em conta o cenário atual, bem como outros fatores supramencionados, o projeto levou em conta a aplicação de um medidor inteligente de energia elétrica, onde ambos consumidor e fornecedor possuem acesso em tempo real ao consumo da residência ou empresa pela internet, auxiliando na

² https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automação-e-Control-Industrial/Controls/Proteção-de-Circuitos-Elétricos/Multimedidores-e-Medidores-Inteligentes/Medidores-Inteligentes-de-Energia-SMW/Medidores-Inteligentes-de-Energia-SMW/p/MKT_WDC_BRAZIL_METERS_SMW

visualização do consumo em diferentes escalas de tempo, fator de potência e também podendo verificar o custo do consumo mensal antes mesmo de receber a fatura, utilizando para tal as taxas atuais e bandeira tarifária vigente. Dessa maneira facilitando para que o cliente possa ter mais domínio e consciência sobre o consumo em cada hora do dia, bem como permitindo que a concessionária consiga ter os dados de maneira automática, sem a necessidade de enviar um funcionário para anotar a medição de energia elétrica, evitando assim a necessidade de fazer o cálculo da fatura por estimativa.

1.1 Justificativa

Devido ao fato de o país possuir uma visível dependência das usinas hidrelétricas para geração da energia elétrica, existem bandeiras tarifárias de diferentes taxas sobre o custo do consumo de energia elétrica, onde sua utilização está diretamente relacionada com a situação hidrológica para geração da energia elétrica (ANEEL, 2015).

Para haver uma maior conscientização por parte do cliente, apenas receber um valor de consumo por mês não é suficiente, tendo em vista que, caso o cliente pudesse ter mais parâmetros, por exemplo o consumo diário médio, poderiam ser averiguados quais os períodos onde há um consumo mais elevado, além de se conseguir verificar se existem dias durante o mês onde há um consumo fora do normal.

Já para o caso da concessionária, é vantajoso pelo fato de se conseguir verificar o consumo do cliente, sem haver necessidade de enviar um funcionário para realizar a medição *in loco*, conseguindo, também à distância, averiguar se há falta de energia nas residências.

Dessa forma, o trabalho proposto possui a função de medir, calcular, integrar e disponibilizar ao cliente e à concessionária as medições referentes à energia elétrica que são medidos e calculados na residência. Assim, o cliente pode acessar e verificar o consumo em tempo real, com diferentes configurações de tempo, apenas necessitando acesso à internet.

Pretende-se montar uma rede com o protocolo LoRaWAN, que segundo Lora Alliance (2021), se trata de um protocolo de rede de baixa potência e banda larga, projetado para realizar a comunicação sem fio de 'coisas' (dispositivos) operadas por bateria à internet em redes regionais, nacionais ou globais, tendo como alvo os principais requisitos da Internet das coisas (IoT), a comunicação bidirecional, segurança de ponta-a-ponta, mobilidade e serviços de localização.

De acordo com Silva Junior (2016), o protocolo de comunicação LoRaWAN possui arquitetura composta por quatro elementos principais, os módulos (*end-points* ou *end-devices*), que em sua maioria são sensores, os *Gateways*, que são responsáveis por servir de conexão entre os módulos e os servidores de rede, os já mencionados servidores de rede, que possuem a função de gerenciar as informações enviadas pelos *Gateways* e, por último, os servidores de aplicações,

que se tratam de programas específicos que de acordo com o pacote recebido dos servidores de rede, executam ações específicas.

Para realizar a comunicação entre os medidores residenciais e o *Gateway*, escolheu-se a tecnologia LoRa e para sua infraestrutura o protocolo LoRaWAN. O motivo para essas escolhas se deve ao fato da popularização das cidades inteligentes (*Smart Cities*), onde, segundo Martynova (2019), os protocolos de comunicação LoRa e LoRaWAN são os melhores para as aplicações de *Smart Cities*, principalmente devido às suas características de baixo consumo de energia, distância de comunicação, baixo custo, arquitetura de rede bem distribuída, protocolo *open-source*, comunicação bi-direcional, localização sem necessidade de sinal GPS, boa penetração em construções e baixa perda de propagação do sinal.

Com o crescimento no mercado de cidades inteligentes e, devido à grande cobertura do protocolo LoRaWAN, o LoRa se torna a comunicação adequada para este tipo de projeto, pois, cada *Gateway*, responsável por receber as medições dos dispositivos (nós ou *end-nodes*) e enviá-las ao servidor, pode ser conectado a outro *Gateway* caso necessário. Dessa forma, consegue-se receber e enviar informações em uma rede de maior abrangência ou até para redes de função distinta, definindo, assim, uma rede que pode ser privada ou pública, de acordo com a necessidade.

O dispositivo para atuar como *Gateway* será o ESP32, principalmente devido ao baixo custo. Ele será utilizado apenas para realizar os testes devido à sua limitação de possuir apenas um canal, dessa forma, posteriormente, poderá ser implementado outro *Gateway* com maior número de canais, conseguindo assim se conectar a uma rede pública de *Smart City* caso se deseje.

Na parte de comunicação com o servidor, será utilizado o protocolo de comunicação *MQ Telemetry Transport* (MQTT), pois segundo Mqtt (2021), se trata de um protocolo de mensagens padrão para a Internet das Coisas, sendo projetado como um transporte de mensagens extremamente leve, ideal para conectar dispositivos sem fio com pouco código e baixa largura de banda de internet. Além disso, segundo Ouanounou (2020), em muitas implementações de comunicação LoRaWAN a comunicação entre o *Gateway* e o servidor é feita via protocolo MQTT devido ao fato de ser justamente feito para conexões de alta latência, ou seja, comunicações via internet não muito confiáveis.

Os principais motivos que levaram à escolha do servidor na nuvem IBM Watson foram sua simplicidade para se conectar via protocolo MQTT, bem como sua configuração interna para receber as medições do *Gateway*. Além disso, também existem os fatores de que o servidor da IBM oferece várias ferramentas para se utilizar facilmente com as medições e o fato de ser de graça toda a parte desde o recebimento dos dados até a exibição para o usuário final. A parte de exibição e cálculo dos dados foi feita na ferramenta *Node-Red*, justamente pelo fato de se conseguir integrar diretamente com o servidor IBM Watson de maneira simplificada, também levando ao uso da ferramenta *Cloudant* para realizar o armazenamento das medições recebidas pelo servidor.

O público alvo deste projeto são, além das concessionárias de energia elétrica, clientes que almejam ter uma maior conscientização sobre o consumo de energia elétrica, ou, até mesmo, clientes que apenas desejam ter a possibilidade de verificar o consumo em tempo real em qualquer lugar via internet.

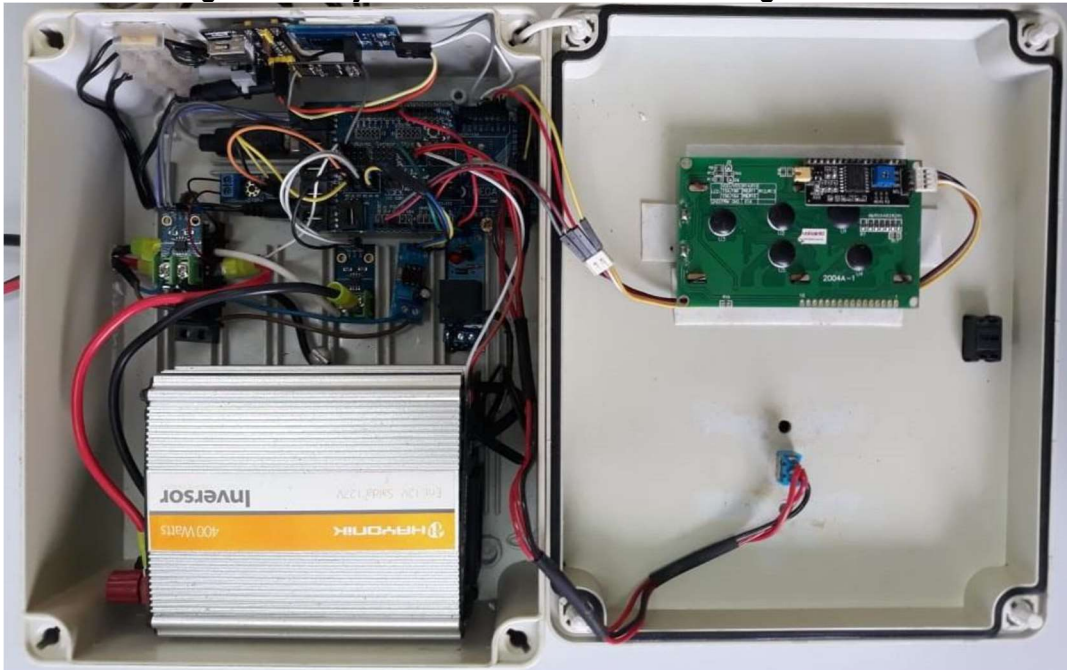
1.1.1 Trabalhos correlatos

A seguir serão abordados os trabalhos relacionados com o projeto feito, explicando como foram montados, contando com seus resultados e respectivas figuras.

1.1.1.1 Martins

Martins (2019) em seu TCC apresenta uma plataforma onde é gerada energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas, que é então convertida para corrente alternada (CA) e medida. Esta medição, além de outras feitas durante o processo de geração, são transmitidas por meio de um dispositivo Arduino Mega em conjunto com o dispositivo ESP8266-01 para conexão com a internet. O projeto construído dentro de uma caixa organizadora está ilustrado na Figura 3, enquanto que, o serviço *Thingspeak* utilizado para realizar o monitoramento dos dados recebidos, está ilustrado na Figura 4.

Figura 3 – Projeto montado dentro da caixa organizadora



Fonte: Martins (2019)

Figura 4 – Serviço *Thingspeak* para monitoramento

Geração Fotovoltaica

ID do canal: 713186
 Autor: joicemachado23
 Acesso: Privado

Visão Privada Visão pública Configurações do canal Compartilhando Chaves Importação / Exportação de Dados

+ Adicionar visualizações

+ Adicionar widgets

MATLAB Análise

MATLAB Visualization

Exportar dados recentes



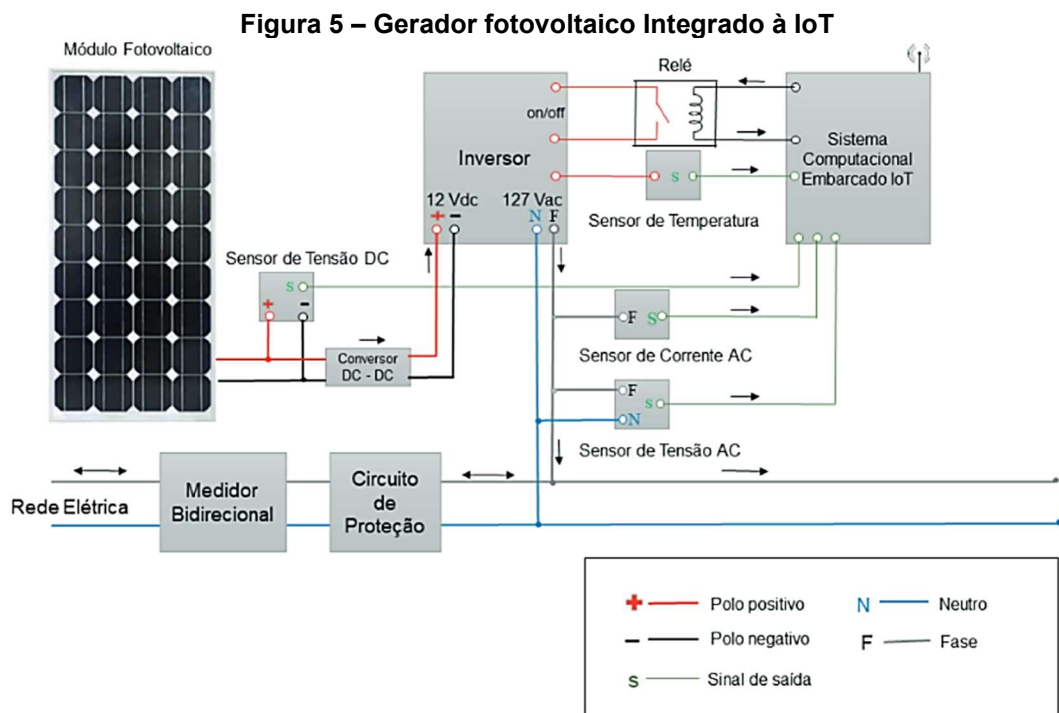
Fonte: Martins (2019), adaptado pelo Autor

Para realizar as medições de comparação, foi utilizado um multímetro true RMS (do inglês, *root mean square*) da marca Fluke, onde, após feitas as verificações para determinar a exatidão do sensor utilizado no projeto, concluiu-se que, os dados medidos pelos sensores são confiáveis. Foi feita também uma verificação acerca dos dados enviados ao servidor, onde averiguou-se que seu

funcionamento foi satisfatório. Para trabalhos futuros indicou-se a utilização de um sensor de temperatura, pois influencia diretamente no módulo solar, bem como novos recursos IoT, atuadores ou ainda, adição de outras fontes de energia renovável, tornando-o assim, um sistema híbrido.

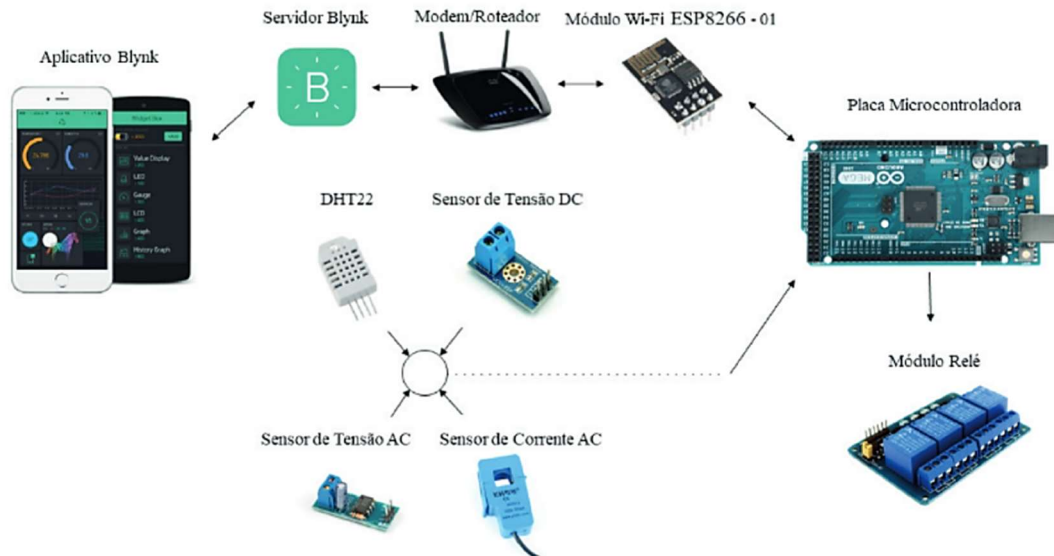
1.1.1.2 Rodrigues, *et al*

O artigo feito por Rodrigues et al. (2018) em conjunto com Martins (2019), ao invés de enviar os dados ao serviço *Thingspeak* como visto no trabalho de Martins (2019), são enviados ao serviço *Blink*. O gerador de energia elétrica foi montado de maneira similar ao trabalho correlato de Martins (2019), onde, na Figura 5, consegue-se observar o diagrama da montagem do gerador integrado à IoT e na Figura 6, pode-se visualizar o diagrama do sistema de aquisição e controle IoT.



Fonte: Rodrigues et al. (2018)

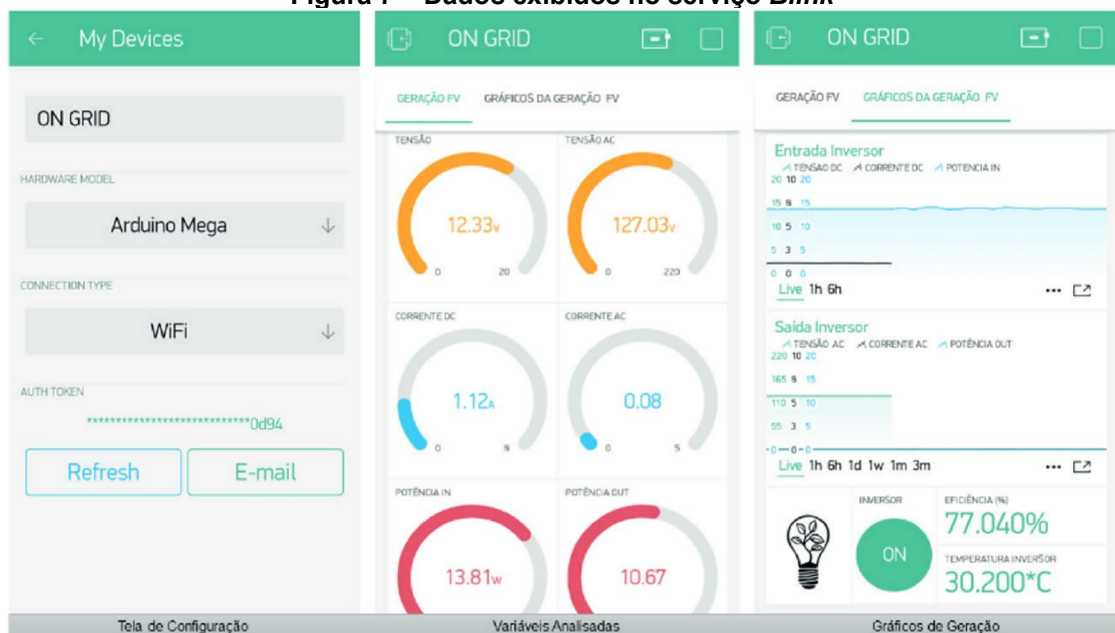
Figura 6 – Sistema de aquisição e controle IoT



Fonte: Rodrigues et al. (2018)

No decorrer dos experimentos foi analisado o comportamento das variáveis envolvidas na geração de energia elétrica, apresentando dados satisfatórios, bastando apenas alguns ajustes para sua utilização em sistemas de geração de maior potência. Entretanto, a funcionalidade do projeto somente é garantida em localidades que contam com acesso à internet. Já sobre o serviço *Blink* utilizado para exibição dos dados, mostrou-se muito eficaz e de fácil acesso ao usuário, assim como exibido na Figura 7 abaixo.

Figura 7 – Dados exibidos no serviço *Blink*

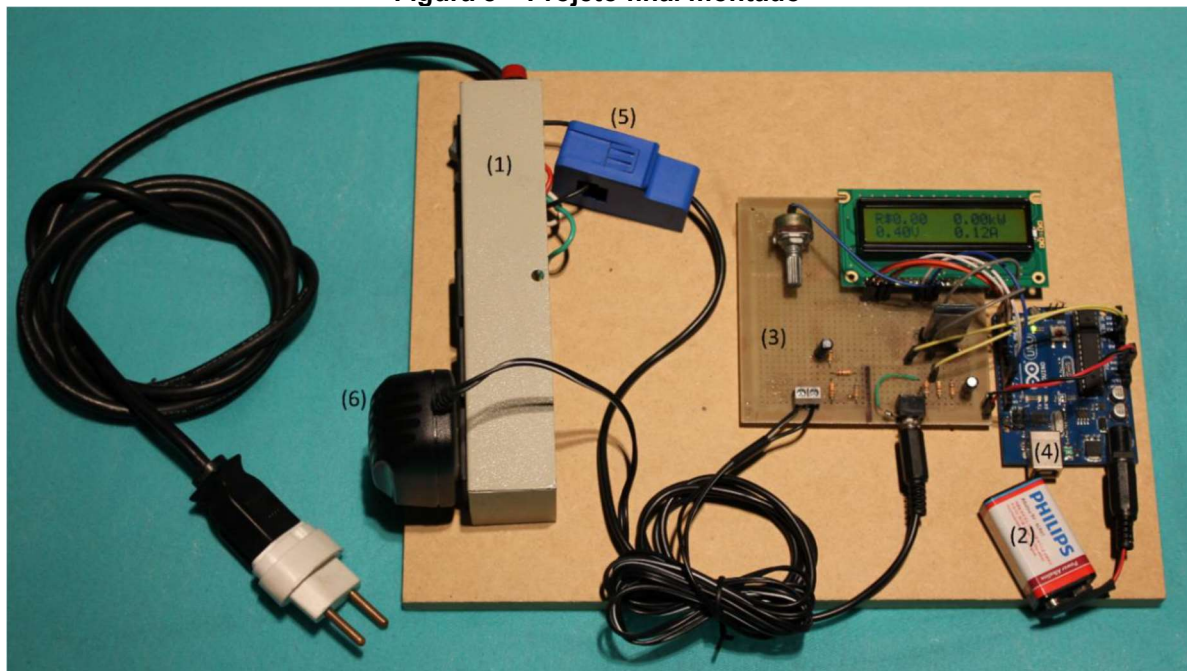


Fonte: Rodrigues et al. (2018)

1.1.1.3 Costa, Sermann e Silva

Costa, Sermann e Silva (2016) visam o desenvolvimento de um sistema de medição de consumo em tempo real no setor residencial que apresenta valores monetários. Para realizar as medições, foi utilizado um sensor de corrente não invasivo e um adaptador para medir a tensão elétrica. Para realizar os cálculos, foi utilizado um Arduino UNO, sendo os resultados então enviados via Bluetooth com o módulo HC-05. A Figura 8 ilustra o projeto final montado onde os números 1,2, 3, 4, 5 e 6 na figura representam, respectivamente, um filtro de linha, uma bateria de 9V, a placa de circuito impresso, o Arduino UNO, o sensor de corrente e o adaptador CA-CA.

Figura 8 – Projeto final montado



Fonte: Costa, Sermann e Silva (2016)

Para a verificação de exatidão do protótipo foi utilizado um medidor eletrônico trifásico “SAGA 1000” e uma carga resistiva variável, ambos fornecidos pela COPEL. A corrente foi variada entre 1,13 A até 35,13 A, sendo calculado o erro relativo entre o medidor trifásico e o calculado pelo projeto, conforme ilustrado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Erro relativo das medições feitas

Carga resistiva variável								
Corrente (A)			Tensão (V)			Potência (kW)		
SAGA 1000	Protótipo	Erro	SAGA 1000	Protótipo	Erro	SAGA 1000	Protótipo	Erro
1,13	1,18	4,24%	121,10	121,41	-0,26%	136,84	143,26	-4,69%
3,15	3,21	1,87%	121,82	121,90	-0,07%	383,73	391,30	-1,97%
5,18	5,38	3,72%	122,31	122,19	0,10%	633,59	657,40	-3,76%
7,01	7,21	2,77%	122,46	121,35	0,90%	858,41	874,93	-1,92%
9,1	9,3	2,15%	121,69	121,36	0,27%	1.107,34	1.128,65	-1,92%
11,06	11,41	3,07%	121,24	122,30	-0,88%	1.340,91	1.395,47	-4,07%
13,2	13,62	3,08%	122,44	122,39	0,04%	1.616,18	1.666,99	-3,14%
15,13	15,7	3,63%	122,00	121,24	0,62%	1.845,79	1.903,46	-3,12%
17,11	17,85	4,15%	121,76	122,43	-0,55%	2.083,31	2.185,30	-4,90%
19,17	19,73	2,84%	122,33	122,27	0,05%	2.345,16	2.412,37	-2,87%
21,05	21,87	3,75%	122,32	121,96	0,30%	2.574,87	2.667,21	-3,59%
23,11	23,7	2,49%	121,32	122,02	-0,58%	2.803,77	2.891,95	-3,14%
25,01	25,64	2,46%	121,43	121,98	-0,45%	3.037,03	3.127,69	-2,99%
27,1	27,8	2,52%	121,17	122,30	-0,93%	3.283,80	3.399,98	-3,54%
29,15	30,19	3,44%	122,30	121,66	0,52%	3.564,92	3.673,06	-3,03%
31,3	32,42	3,45%	121,28	121,51	-0,19%	3.796,12	3.939,30	-3,77%
33,11	34,04	2,73%	121,01	121,11	-0,08%	4.006,70	4.122,56	-2,89%
35,13	36,37	3,41%	122,11	121,78	0,28%	4.289,86	4.429,05	-3,24%

Fonte: Costa, Sermann e Silva (2016)

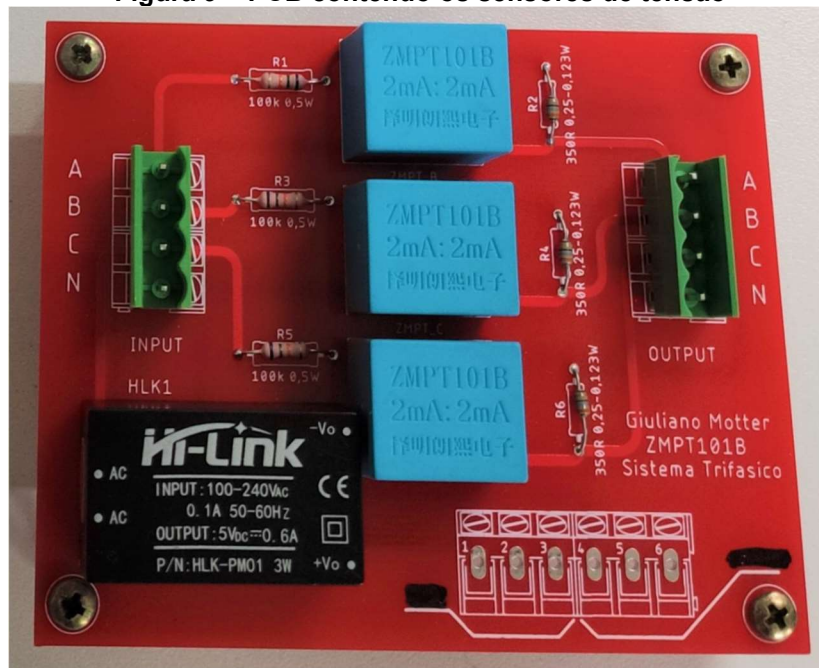
Os resultados foram considerados como sendo satisfatórios, por atingir o objetivo principal de desenvolver um protótipo de medição do consumo de energia elétrica em tempo real com custo acessível. Além disso, seus objetivos específicos também foram alcançados. O Arduino funcionou conforme o esperado, conseguindo mensurar a tensão e corrente da residência em tempo real por um custo de aproximadamente R\$ 76,00, enquanto que, no mercado, o menor preço que foi encontrado para um medidor de consumo desde tipo, entretanto sem a função de exibir diretamente o consumo em reais, foi de R\$ 90,00.

1.1.1.4 Motter e França

O trabalho acadêmico de Motter e França (2020) propõe um medidor inteligente para consumo e qualidade de energia para um sistema trifásico, entretanto, diferente dos trabalhos acadêmicos supramencionados, este foi realizado com o protocolo de comunicação LoRaWAN. A implementação foi realizada com um microcontrolador CI ATM90E36A, sensores de tensão e corrente, *chip* de memória

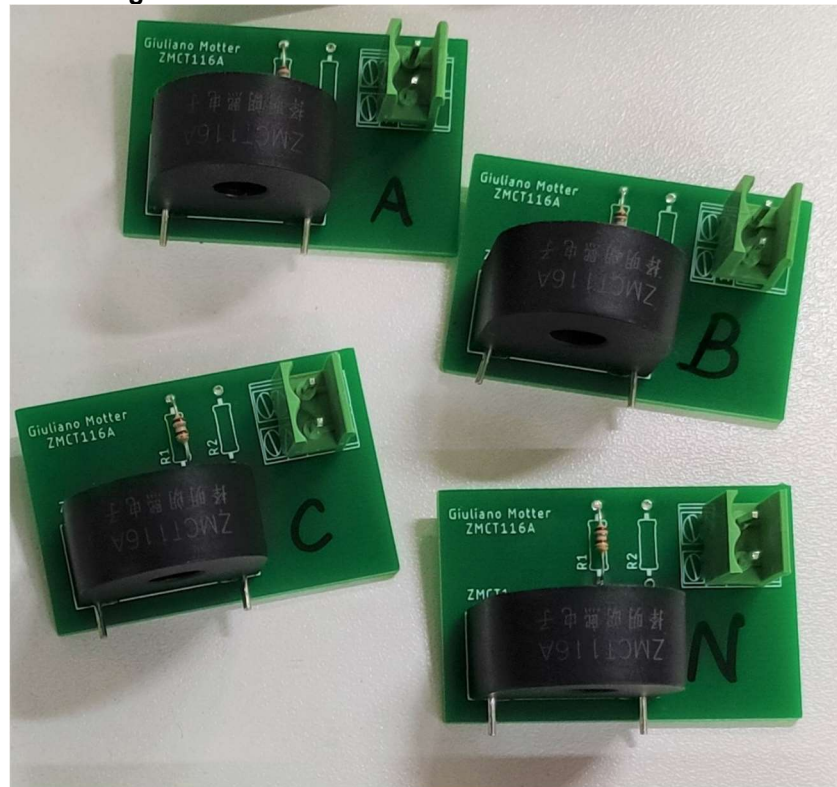
EEPROM, um relógio de tempo real (RTC), um circuito para aquisição dos dados, comunicação LoRaWAN e interface homem máquina no computador ao conectar via porta RS232. As placas de circuito impresso (PCBs) do projeto final, referentes ao circuito contendo os sensores de tensão, ao circuito com os sensores de corrente e ao circuito contendo o microcontrolador, estão ilustradas na Figura 9, Figura 10 e Figura 11, respectivamente.

Figura 9 – PCB contendo os sensores de tensão



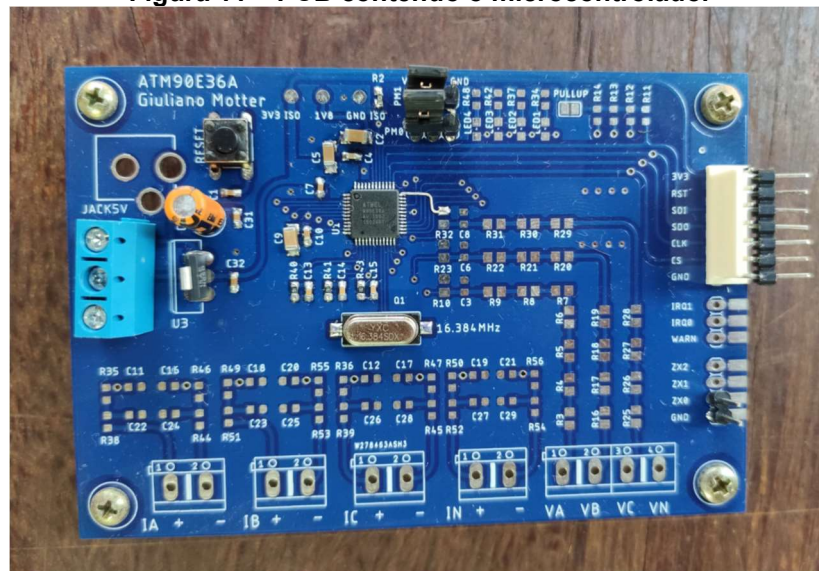
Fonte: Motter e França (2020)

Figura 10 – PCB contendo os sensores de corrente



Fonte: Motter e França (2020)

Figura 11 – PCB contendo o microcontrolador



Fonte: Motter e França (2020)

Em sua conclusão, é informado que o dispositivo foi capaz de fornecer uma variedade de informações e atuações da/na rede elétrica no local instalado, possibilitando aos operadores das redes uma visão geral granular do sistema elétrico. Além disto, a partir de uma branda revisão bibliográfica, bem como documentos e entrevistas de empresas e profissionais do setor elétrico, foi possível

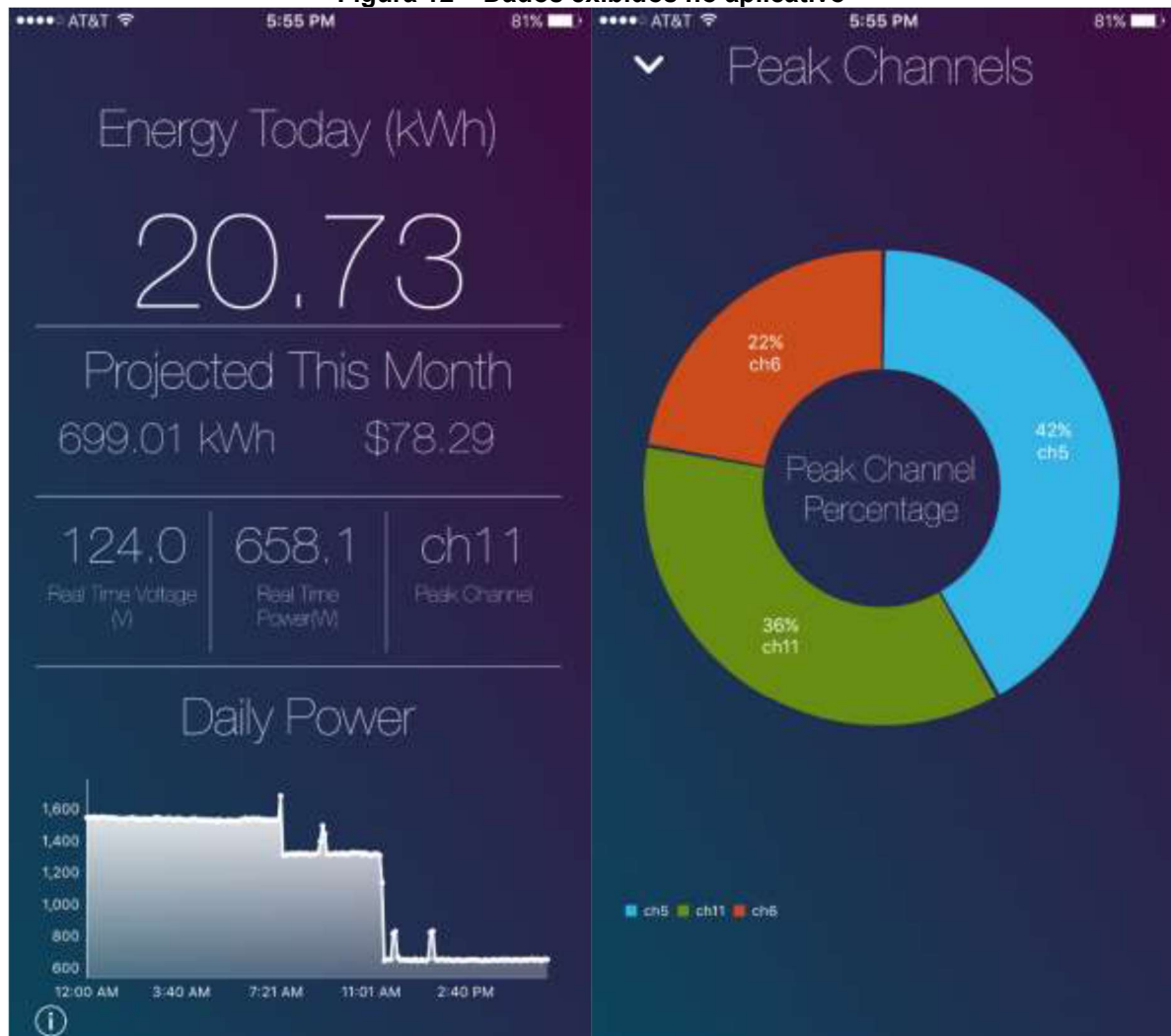
concluir que os aspectos técnicos e funcionalidades contempladas pelo medidor são de fato de grande relevância.

1.1.1.5 Newman, *et al*

No artigo de Newman *et al.* (2016), construiu-se um medidor de consumo elétrico utilizando-se transformador de corrente não intrusivo da série SCT-013, Raspberry Pi, microcontroladores PIC e um circuito de aquisição montado durante o projeto. Os dados que foram medidos e calculados são o consumo de potência, consumo de energia, tensão RMS, corrente RMS e fator de potência, sendo eles enviados para o serviço *Firebase* via *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) e posteriormente exibidos em um aplicativo iOS (*iPhone Operating System*) para o usuário.

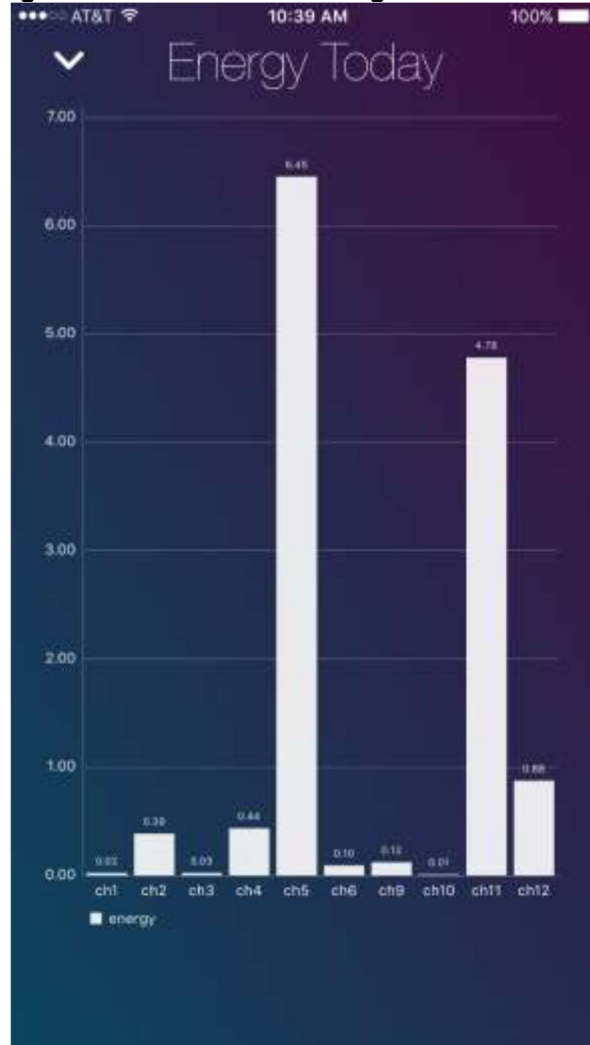
Ao final do projeto, foram utilizados 11 sensores de corrente não invasivos, conseguindo dessa forma mensurar vários circuitos ao mesmo tempo. Os testes foram realizados no edifício de química de Cedarville, onde os dados medidos estão exibidos via aplicativo na Figura 12 e Figura 13.

Figura 12 – Dados exibidos no aplicativo



Fonte: Newman et al. (2016), adaptado pelo Autor

Figura 13 – Consumo de energia em cada sensor



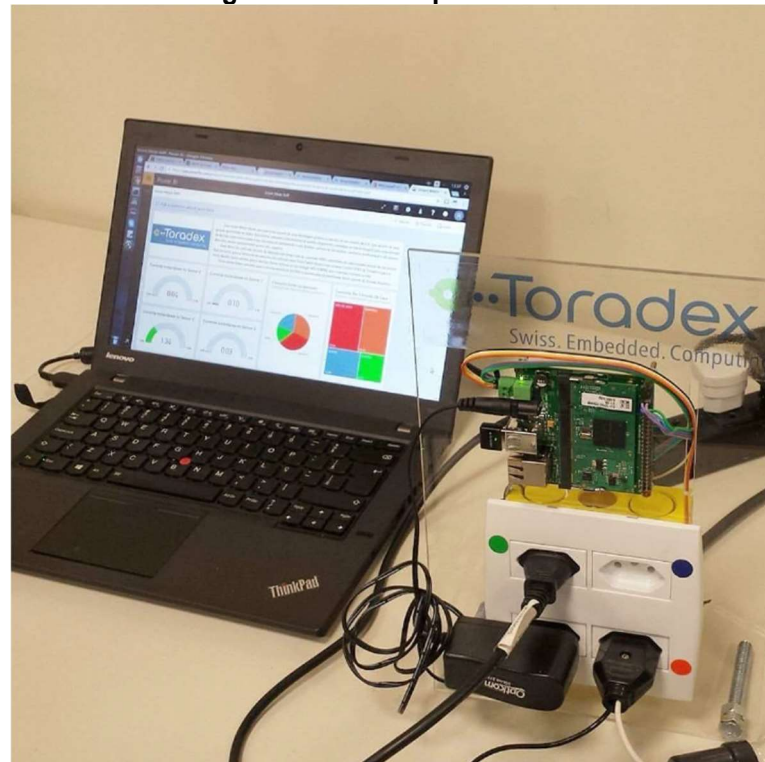
Fonte: Newman et al. (2016)

1.1.1.6 Barbosa

No trabalho de conclusão de Barbosa (2016), foi montado um protótipo de medidor inteligente utilizando o *System-on-Module* (SoM, ou em português, sistema em módulo) Colibri VF50 em conjunto com a placa base Colibri Viola Plus, ambas da Toradex, o serviço *Microsoft Azure* em conjunto com o serviço IoT Hub, o serviço NodeJS, sensor de corrente ACS712 e módulo Wi-fi LM006.

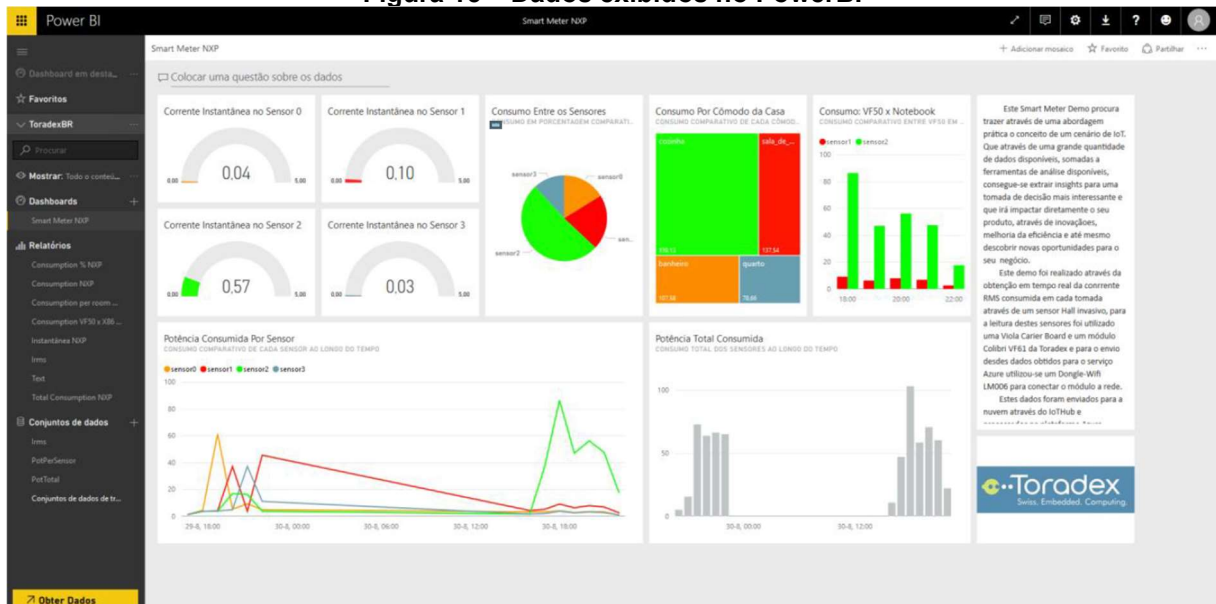
Obteve-se um resultado satisfatório com o uso do módulo Colibri VF50 em conjunto com os outros serviços e equipamentos ao adquirir os dados em intervalos de 3 segundos com posterior envio ao servidor na nuvem, onde os dados eram então exibidos via serviço PowerBI. A Figura 14 ilustra o protótipo montado, enquanto que, a Figura 15 ilustra as medições sendo exibidas ao usuário.

Figura 14 – Protótipo montado



Fonte: Barbosa (2016)

Figura 15 – Dados exibidos no PowerBI



Fonte: Barbosa (2016)

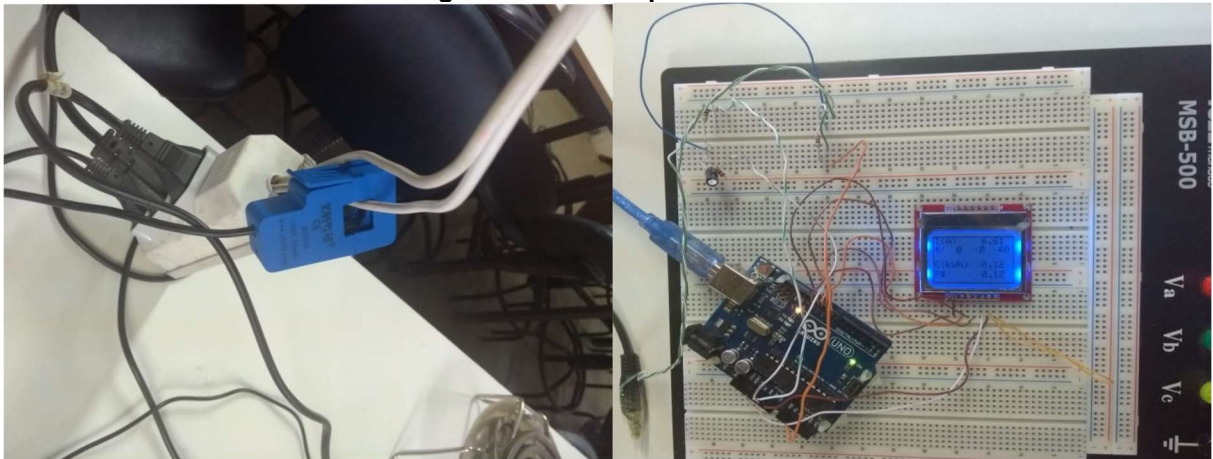
1.1.1.7 Breda, Medeiros e Araújo

No artigo de Breda, Medeiros e Araújo (2019), foi desenvolvido um medidor de consumo de energia elétrica com o uso da plataforma Arduino, a biblioteca EmonLib.h, LCD e sensor de corrente SCT-013-000. Com a programação

do microcontrolador, foi possível então mensurar os valores de corrente, energia elétrica e o custo por kWh.

Inicialmente, construiu-se o circuito no programa de projeto de circuitos integrados Proteus e, após confirmação de sua funcionalidade, efetuou-se a montagem do protótipo, conforme ilustrado na Figura 16 abaixo. Os valores medidos foram exibidos corretamente no display, assim como ilustrado na Figura 17 abaixo.

Figura 16 – Protótipo montado



Fonte: Breda, Medeiros e Araújo (2019), adaptado pelo Autor

Figura 17 – Dados exibidos no display



Fonte: Breda, Medeiros e Araújo (2019)

1.2 Definição do problema

Cada vez mais está presente no país a dependência por parte da matriz elétrica no uso de usinas hidrelétricas em sua composição, causando aumentos no consumo e uso de bandeiras tarifárias em casos de seca, como vivido atualmente. Aliado a estes fatores, tem-se a baixa conscientização do consumidor durante consumo de energia elétrica que, como visto na aplicação de medidores inteligentes realizada no Reino Unido, é possível melhorá-la. Assim, não só irá trazer vantagens ao consumidor, como também para nossa geração de energia elétrica, aliviando usinas hidrelétricas que estão operando no limite.

Dessa forma, de acordo com o contexto supramencionado, apresenta-se o seguinte problema de pesquisa: é possível desenvolver uma plataforma de medição inteligente para ser conectada à Internet das Coisas, oferecendo tanto para o fornecedor quanto para o cliente dados acerca das medições feitas na residência.

1.3 Objetivo geral

Desenvolver um protótipo de um medidor inteligente de consumo que consiga verificar e transmitir as informações do consumo de energia elétrica de uma residência via protocolo LoRa até o *Gateway*, para que então, posteriormente, as informações sejam enviadas ao servidor na nuvem para realizar o armazenamento e apropriada exibição para o usuário final em uma interface acessível via Internet.

1.4 Objetivos específicos

- a) Estudar e definir um circuito de aquisição adequado para realizar a medição dos parâmetros das ondas de tensão e corrente referentes ao consumo de energia elétrica da residência;
- b) Desenvolver a programação do circuito de controle baseada em uma placa microcontrolada, sendo a lógica de programação adequada para que os sinais recebidos pelo circuito de aquisição possam ser processados e enviados posteriormente para o *Gateway* pelo circuito de comunicação;

- c) Implementar o circuito de aquisição junto com o circuito de controle, verificando seu funcionamento quando submetido a cargas indutivas e resistivas;
- d) Implementar o circuito de comunicação entre o circuito de controle e o *Gateway* utilizando o protocolo LoRa;
- e) Programar o *Gateway* para realizar o envio das medições para o servidor na nuvem;
- f) Efetuar testes para averiguar as medições realizadas pelo circuito de aquisição, a comunicação entre o circuito de comunicação e o *Gateway* e a comunicação entre o *Gateway* e o servidor na nuvem;
- g) Programar uma interface para exibição das medições, sendo possível o acesso via navegador, seja por computador ou *smartphone*;
- h) Efetuar um estudo por um período mais prolongado, armazenando as medições da corrente elétrica, potência real e aparente, tensão elétrica, fator de potência e consumo elétrico de duas residências durante alguns dias, utilizando uma rede de dois medidores inteligentes;
- i) Averiguar se as medições coletadas e armazenados estão coerentes com o consumo real das residências;
- j) Realizar ensaios práticos para determinar uma distância máxima onde há um sinal forte o suficiente para efetuar o envio das medições.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir serão introduzidos os conhecimentos necessários para ter-se um bom entendimento acerca dos materiais e métodos utilizados e também dos resultados. Dentre estes conhecimentos, estão contidos alguns conceitos sobre os valores medidos, componentes, plataforma e serviços utilizados durante o projeto.

2.1 Corrente elétrica

Para explicar melhor sobre o que é a corrente elétrica, deve-se primeiramente ter em mente o conceito de carga elétrica, que, segundo Alexander e Sadiku (2013), se trata do princípio fundamental para explicar todos os fenômenos elétricos. Ainda de acordo com Alexander e Sadiku (2013), a carga elétrica é definida como uma propriedade elétrica das partículas atômicas que compõem a matéria, possuindo a característica exclusiva de ser móvel, ou seja, ela pode ser transferida de lugar a outro, podendo ser convertida em outra forma de energia.

Na concepção de Gussow (2009), a carga elétrica se origina no momento em há uma diferença entre prótons e elétrons no átomo devido ao cedimento ou recebimento de elétrons. Dessa forma, a quantidade de carga elétrica em um corpo é determinada justamente pela diferença entre prótons e elétrons que o corpo contém, sendo ela referenciada pela letra Q e medida em Coulombs (C).

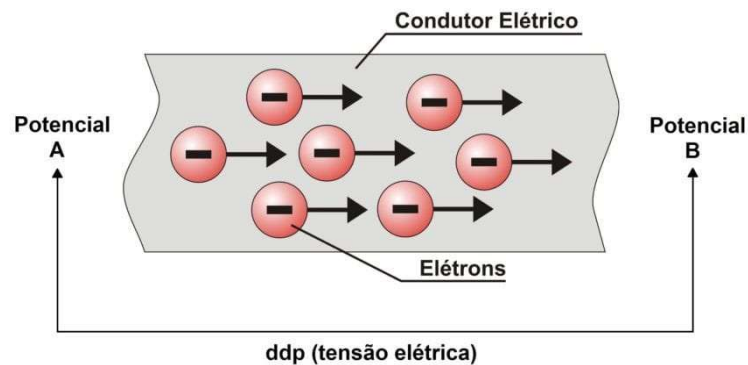
Já no caso da definição de corrente elétrica, de acordo com Alexander e Sadiku (2013), se trata do fluxo de carga por unidade de tempo, sendo medida em Ampères (A), podendo ser definida pela relação matemática presente na equação (1) abaixo, onde a carga q é medida em Coulombs e o tempo t em segundos. Dessa forma, um Ampère pode ser também representado como sendo 1 coulomb/segundo.

$$i \triangleq \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

Segundo Boylestad (2012), para explicar a geração de corrente em um circuito elétrico, compara a tensão elétrica aplicada em um sistema elétrico como sendo a “pressão” para colocar o sistema em movimento, enquanto que, a corrente é a reação a essa pressão. A representação do fluxo de elétrons devido à aplicação

de diferença de potencial (ddp) está exibida na Figura 18. Além disso, Boylestad (2012) faz uma analogia que é seguidamente utilizada para explicar a diferença entre a tensão e corrente elétrica, onde se compara o sistema elétrico a uma mangueira de jardim, que não terá fluxo de água, ficando parada na mangueira sem uma direção geral, caso não exista qualquer pressão. Dessa forma, pode-se concluir que, caso um sistema elétrico não possua uma diferença de potencial (tensão elétrica) para exercer “pressão” sobre os elétrons, não haverá um “fluxo” de elétrons, conseqüentemente, não haverá corrente elétrica.

Figura 18 – Fluxo de elétrons devido a uma ddp



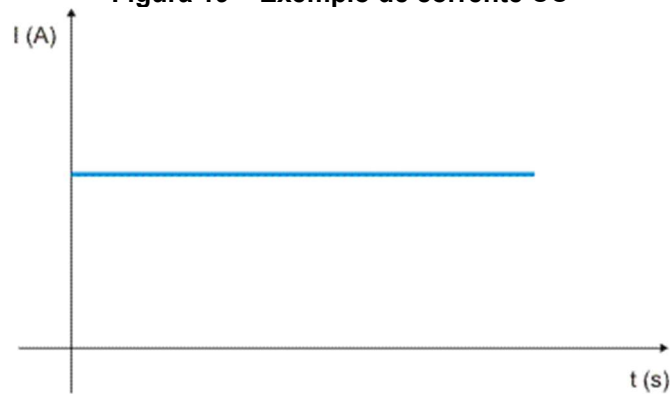
Fonte: Conhecimento Específico³

A corrente elétrica pode variar de diversas maneiras, ou seja, a carga pode variar com o tempo de diversas maneiras, sendo as mais comuns a corrente contínua (CC) e a corrente alternada (CA) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

2.1.1 Corrente CC

A corrente elétrica contínua, conhecida como corrente CC, se trata de uma corrente elétrica que permanece constante ao longo do tempo, ou seja, não há oscilações em seu módulo ao longo do tempo (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Esse tipo de corrente é comumente encontrado em equipamentos e circuitos eletrônicos, pilhas e baterias, fontes de computador, entre outros. A Figura 19 ilustra a onda de corrente CC, onde o eixo das ordenadas (y) representa o módulo de corrente em Ampères e o eixo das abscissas (x) representa o tempo transcorrido em segundos.

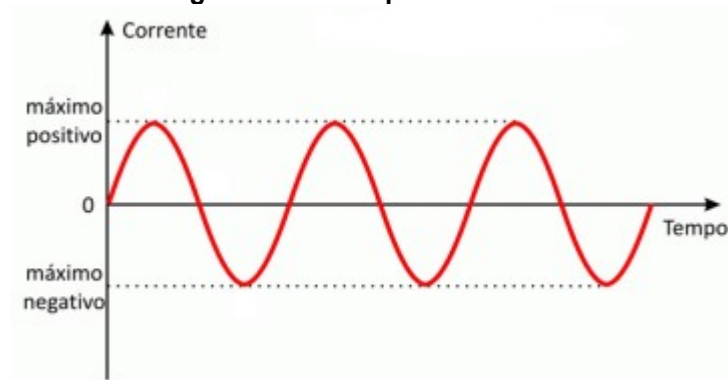
³ Disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/corrente-eletrica/>. Acesso em ago. 2021

Figura 19 – Exemplo de corrente CC

Fonte: Athos Electronics⁴

2.1.2 Corrente CA

A corrente elétrica alternada, ou comumente chamada corrente CA (AC em inglês), ao contrário da corrente contínua que permanece constante ao longo do tempo, possui variações de acordo com o tempo segundo uma forma de onda senoidal. A Figura 20 ilustra o gráfico de uma corrente CA, onde o eixo das ordenadas (y) representa o módulo de corrente, enquanto que, o eixo das abscissas (x) representa o tempo transcorrido.

Figura 20 – Exemplo corrente CA

Fonte: Athos Electronics⁵, adaptado pelo Autor

2.2 Tensão elétrica

Conforme foi comentado sobre a corrente elétrica, é necessária uma “pressão” para que o elétron seja empurrado, gerando assim a corrente elétrica, essa “pressão” no sistema elétrico/eletrônico é a tensão elétrica ou também

⁴ Disponível em: <https://athoselectronics.com/corrente-alternada-continua/>. Acesso em jul. 2021

⁵ Disponível em: <https://athoselectronics.com/corrente-alternada-continua/>. Acesso em jul. 2021

comumente chamada de diferença de potencial (ddp). O trabalho para transportar o elétron de um ponto A ao ponto B é realizado pela força eletromotriz, também chamada de FEM (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

A fórmula da eletromotriz necessária para transportar um elétron do ponto a ao b está ilustrada na equação (2) abaixo, onde w representa a energia (ou trabalho) em joules (J) necessária para deslocar uma carga unitária de um ponto a para b e a variável q representa o valor da carga transportada em Coulombs (C).

$$V_{ab} \triangleq \frac{dw}{dq} \quad (2)$$

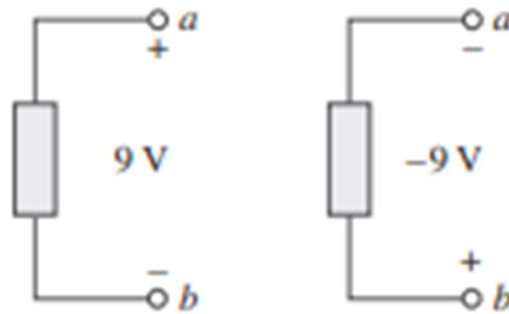
De acordo com Alexander e Sadiku (2013), a tensão elétrica é a energia necessária para deslocar uma carga unitária através de um elemento, sendo ela medida em Volts (V), nome dado em homenagem ao físico italiano Alessandro Antonio Volta (1745-1827), que inventou a primeira pilha voltaica.

Segundo Boylestad (2012), toda fonte de tensão elétrica é estabelecida com a simples criação de uma separação de cargas positivas e negativas, onde, se um total de 1 Joule (J) de energia é utilizado para mover a carga negativa de 1 Coulomb, ou manter a separação, há uma diferença de 1 V entre os dois pontos.

De acordo com Irwin (2010), os sinais “+” e “-” indicam o sentido de referência para uma fonte de tensão, assim como ilustrado na Figura 21 abaixo. Uma fonte de tensão de terminais a e b aplica uma tensão sobre uma carga, e, como os sinais indicam o sentido de referência, pode-se afirmar que a relação entre v_{ab} e v_{ba} é igual a equação (3) abaixo.

$$v_{ab} = -v_{ba} \quad (3)$$

Figura 21 – Tensão entre terminais “a” e “b”

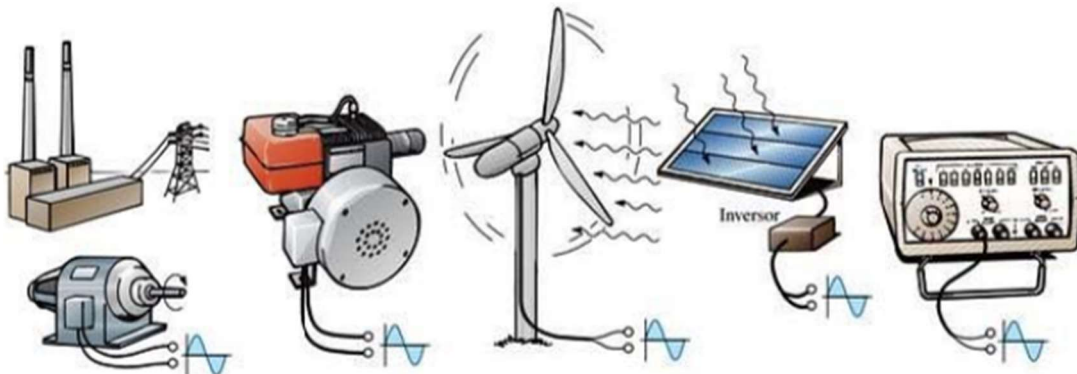


Fonte: Alexander e Sadiku (2013), adaptado pelo Autor

Corrente e tensão elétrica são as duas variáveis básicas em circuitos elétricos, sendo utilizado o termo comum “sinal” para referenciar uma quantidade elétrica como a corrente ou tensão, contanto que esteja transportando informações, como por exemplo a resposta de um sensor (ALEXANDER; SADIKU, 2013)

Assim como a corrente elétrica, uma tensão constante é denominada tensão CC, sendo ela representada pela letra “V”, enquanto que, uma tensão que varia com o tempo de forma senoidal é chamada de tensão CA ou alternada, sendo representada pela letra “v”. A tensão CC é comumente produzida por baterias, pilhas, placas solares e entre outros, enquanto que, uma tensão CA é produzida por usinas geradoras, geradores CA portáteis, geradores eólicos, tensão elétrica na saída do inversor de frequência das placas solares, geradores de sinais, entre outros, assim como exibido na Figura 22.

Figura 22 – Fontes geradoras de tensão CA



Fonte: Boylestad (2012)

A tensão elétrica utilizada nas residências é a tensão alternada, entretanto, possuímos vários equipamentos como carregadores de celulares, entre outros, que realizam a conversão da tensão CA para tensão CC, de modo que

equipamentos que necessitem este tipo de tensão possam ser utilizados com a tensão elétrica presente nas residências.

2.3 Energia e Potência

Embora a corrente e tensão sejam as duas variáveis básicas em um circuito elétrico, elas sozinhas não são suficientes, pois na prática, precisa-se saber quanta potência um dispositivo elétrico é capaz de manipular. Por exemplo, no consumo de residências, onde o que é cobrado é de acordo com a potência consumida durante o período de um mês (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Dessa forma, o consumo não depende do valor de tensão na residência, seja ele 127 V ou 220 V, visto que, o que impactará no seu consumo mensal, é o resultado da relação entre tensão e corrente, ou seja, a potência consumida durante o período de um mês.

A energia, usualmente representada pela letra “w”, se trata da capacidade de realizar trabalho, sendo medida em joules (J). Já para as concessionárias de energia elétrica, o valor de energia é medido em Watt-hora (Wh), onde cada Wh corresponde a 3600 J (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Segundo Boylestad (2012), o termo potência é aplicado para fornecer uma indicação da quantidade de trabalho (ou conversão de energia) que pode ser realizada em um determinado período de tempo, isto é, a potência corresponde à velocidade com que um trabalho é executado.

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), a potência elétrica é medida em Watts (W), podendo seu valor ser calculado pelas equações (4) e (5) abaixo. Em um circuito elétrico, atribui-se um sinal positivo (+) se a potência estiver sendo fornecida para o elemento, enquanto que, recebe um sinal negativo (-) caso a potência estiver sendo fornecida pelo elemento. Dessa forma, pode-se dizer que a potência absorvida terá o mesmo valor em módulo que a potência fornecida, dessa forma, ao realizar um somatório de potências em qualquer instante de tempo em um circuito elétrico, como mostrado na equação (6), devido a lei da conservação da energia, a soma algébrica será equivalente a zero.

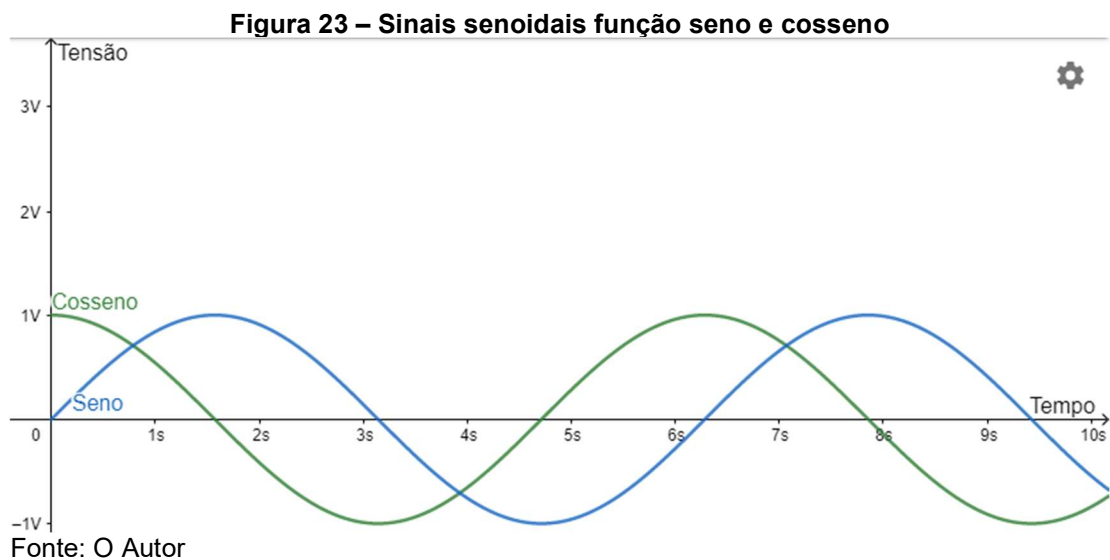
$$p \triangleq \frac{dw}{dt} \tag{4}$$

$$p = vi \quad (5)$$

$$\sum p = 0 \quad (6)$$

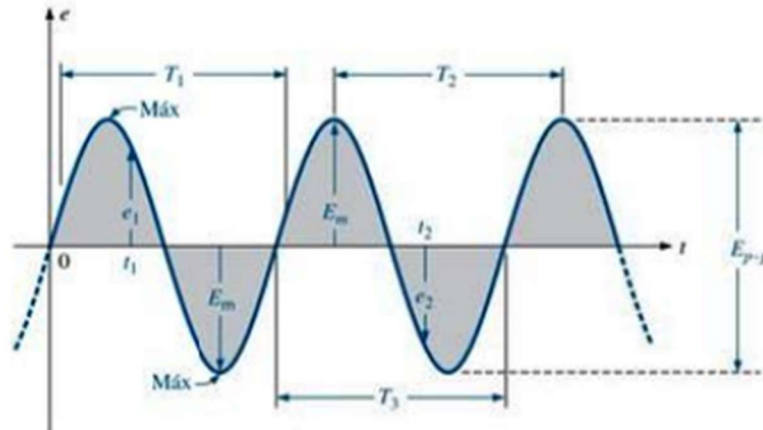
2.4 Características de sinais senoidais

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), a senoide, é um sinal que possui a forma da função seno ou cosseno, conforme exibido na Figura 23 abaixo. Circuitos que são acionados por fontes de tensão ou de corrente senoidais são chamados de circuitos CA.



Um sinal senoidal se trata de um sinal que possui uma forma de onda periódica, que, de acordo com Boylestad (2012), é a forma de onda que se repete continuamente após certo intervalo de tempo constante. Através da análise da forma de onda, assim como a exibida na Figura 23 acima, é possível descobrir diferentes tipos de valores acerca dela. Alguns valores são, assim como mostrado na Figura 24 abaixo, as variáveis e_1 e e_2 , que representam os valores instantâneos da onda, a variável E_m , que representa o valor de pico, a variável E_{p-p} , que representa o valor de pico a pico e as variáveis T1, T2 e T3, que representam os períodos de tempo da onda, ou seja, o valor de tempo que contém um ciclo de onda.

Figura 24 – Variáveis de um sinal senoidal



Fonte: Boylestad (2012)

Para sinais senoidais, tanto a tensão, corrente e potência, precisam ser calculados para se descobrir diferentes valores dependendo da situação, pois, assim como pode-se visualizar na Figura 23 e Figura 24, ao contrário de um sinal constante, caso o sinal seja medido em diferentes momentos, existe a chance do valor medido ser diferente do anterior, visto que o valor muda de acordo com o período.

2.4.1 Valor instantâneo e médio

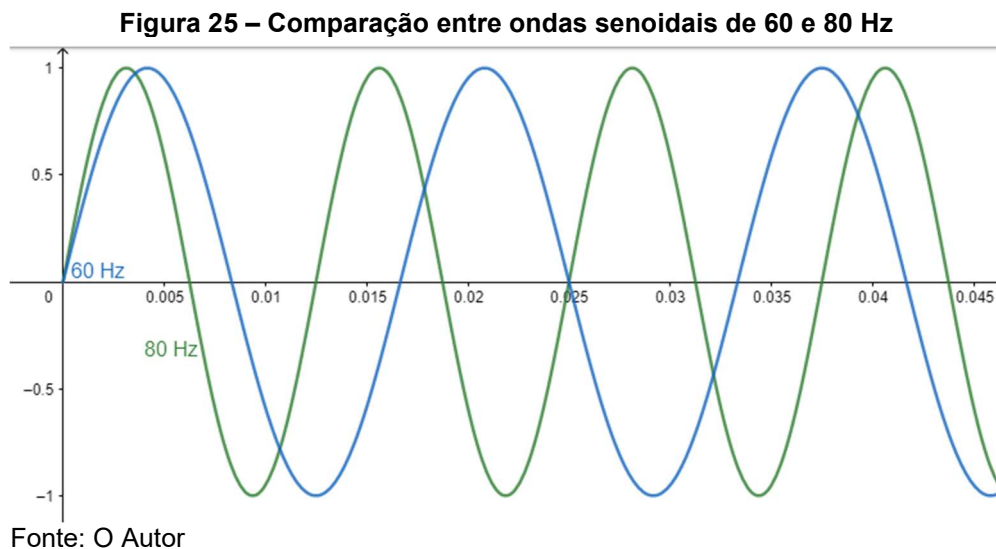
Como dito anteriormente, em cada instante de tempo existe um valor diferente, analisando-se o caso da Figura 23 e Figura 24 acima, têm-se que, no instante igual a π segundos, a onda com formato de seno possui um valor de 0 V no eixo y, enquanto que, a onda do cosseno possui valor de -1 V no eixo y. Esses dois valores são os valores instantâneos de ambas ondas, onde, através do gráfico, é possível analisar os valores instantâneos da onda senoidal.

Entretanto, para descobrir-se o valor instantâneo de uma onda senoidal sem a necessidade do gráfico, é necessário utilizar a equação (7) abaixo, onde $v(t)$ representa o valor instantâneo no instante t , V_m o valor da amplitude da senoide, ω a frequência angular em radianos/segundos, t o instante de tempo em segundos que se deseja descobrir o valor instantâneo e ϕ a fase caso a onda esteja deslocada. Segundo Alexander e Sadiku (2013), o termo da expressão $(\omega t + \phi)$ é o argumento e ϕ é a fase, onde ambos podem ser em radianos ou graus.

$$v(t) = V_m \text{sen}(wt + \phi) \quad (7)$$

A variável w que representa a frequência angular pode ser calculada de acordo com a equação (8) abaixo, onde f é a frequência da onda em Hertz (Hz). Dessa forma, pode-se dizer que, uma onda de maior frequência terá mais passagens pelo eixo das abscissas (eixo x) em um tempo de t segundos do que uma onda de menor frequência, assim como ilustrado na Figura 25, onde a onda azul representa uma senoide de 60 Hz e a onda verde uma de 80 Hz.

$$w = 2\pi f \quad (8)$$



Para se descobrir o período de uma onda em segundos, ou seja, o tempo que a onda leva para realizar seu movimento uma única vez, voltando novamente ao ponto de módulo zero inicial, é igual ao que está descrito na equação (9) abaixo. Como um exemplo, pode-se analisar as ondas de 60 e 80 Hz na Figura 25 acima, onde seus respectivos períodos são de aproximadamente 0,0167 e 0,0125 segundos.

$$T = \frac{2\pi}{w} = \frac{1}{f} \quad (9)$$

Para se descobrir a potência instantânea de um equipamento, é realizada a multiplicação do valor da tensão instantânea pelo valor da corrente instantânea

para obter seu valor. Dessa forma, a potência instantânea pode ser descrita pela equação (10) abaixo, onde $p(t)$ representa a potência instantânea, $v(t)$ a tensão instantânea e $i(t)$ a corrente instantânea, sendo todos argumentos referentes ao mesmo instante de tempo t .

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (10)$$

As variáveis $v(t)$ e $i(t)$ podem ser expressas pelas equações (11 e (12, onde V_m e I_m correspondem às amplitudes (ou valores de pico) de tensão e corrente, respectivamente, enquanto que, θ_v e θ_i correspondem aos ângulos de fase da tensão e da corrente, respectivamente.

$$v(t) = V_m \cos (wt + \theta_v) \quad (11)$$

$$i(t) = I_m \cos (wt + \theta_i) \quad (12)$$

“A potência instantânea varia com o tempo, sendo, portanto, difícil de ser medida. Já a potência média é mais conveniente de ser medida. De fato, o wattímetro, o instrumento usado para medir potência, indica média.” (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Segundo Nilsson e Riedel (2016), a potência média associada a sinais senoidais se trata da média das potências instantâneas durante um período de tempo, dessa forma, a equação (13) abaixo é utilizada para calcular a potência média de uma onda senoidal, onde, T representa o período da onda, t_0 o instante de tempo inicial a ser analisado e $p(t)$ o módulo de potência instantânea.

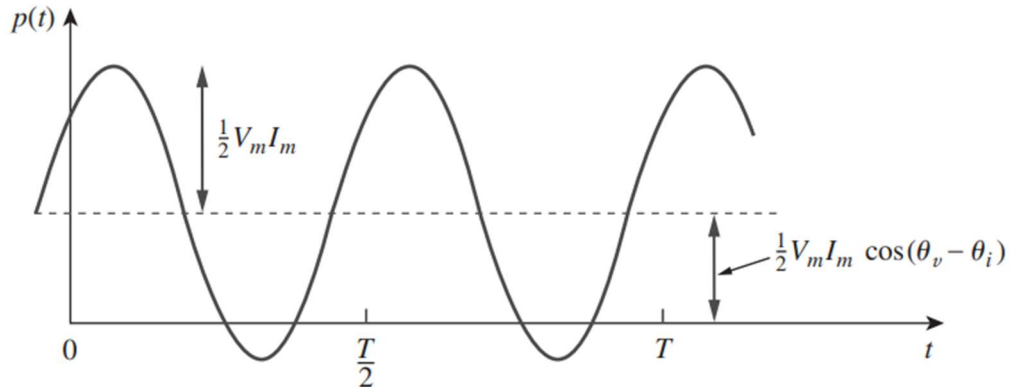
$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt \quad (13)$$

Conforme Alexander e Sadiku (2013), ao substituir a variável $p(t)$ na equação (13) pelas variáveis $v(t)$ e $i(t)$ presentes nas equações (11) e (12), respectivamente, é possível, após aplicar identidade trigonométrica e algumas simplificações, chegar na equação abaixo para potência, onde não se precisa ter em

mãos a onda da potência para realizar o cálculo. A Figura 26 ilustra como fica graficamente o valor médio da senoide,

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (14)$$

Figura 26 – Valor médio de uma senoide graficamente



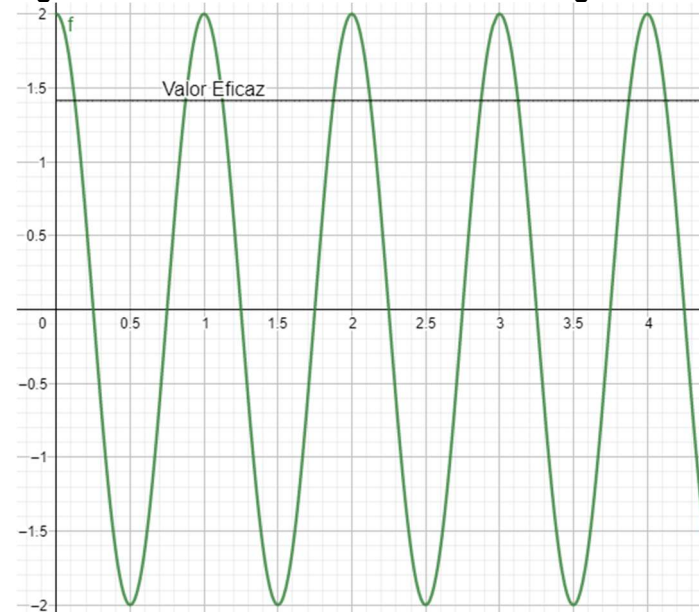
Fonte: Alexander e Sadiku (2013)

Uma carga resistiva (R) sempre absorve potência, enquanto uma carga puramente reativa (L ou C) não absorve nenhuma potência média, visto que, no caso da carga puramente resistiva, a equação $\theta_v - \theta_i$ ficaria com valor igual a 90° , dessa forma, $P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(90^\circ) = 0$ (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

2.4.2 Valor RMS ou eficaz

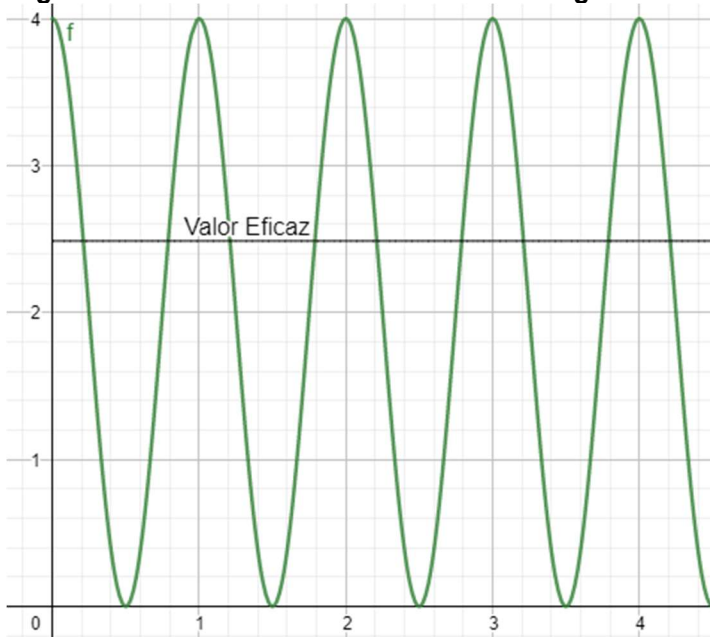
O conceito de valor eficaz provém da necessidade de medir a eficácia de uma fonte de tensão ou de corrente na liberação de potência para uma carga resistiva. O valor eficaz de uma corrente periódica é a corrente CC que libera a mesma potência média para um resistor que a corrente periódica (ALEXANDER; SADIKU, 2013). As figuras logo abaixo ilustram ondas de corrente senoidal, juntamente com seu valor eficaz, de modo que a Figura 27 ilustra uma senoide com valor médio de 0 V e a Figura 28 uma senoide com valor médio igual a 2 V.

Figura 27 – Sinal senoidal com valor médio igual a zero



Fonte: O Autor

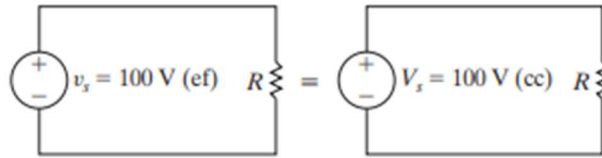
Figura 28 – Sinal senoidal com valor médio igual a dois



Fonte: O Autor

Como um exemplo para entender melhor a relação entre o nível CC e o valor eficaz, Nilsson e Riedel (2016) comentam que, uma fonte CC de 100V, fornece a mesma energia em t segundos que uma fonte senoidal de 100 V eficazes, admitindo-se resistências de cargas equivalentes. A Figura 29 abaixo, ilustra o circuito do exemplo supramencionado.

Figura 29 – Circuito exemplo para o valor eficaz



Fonte: Nilsson e Riedel (2016)

De acordo com Nilsson e Riedel (2016), a utilização do valor eficaz para tensões e correntes elétricas senoidais em cálculos de potência é tão ampla, que os valores nominais de tensões e correntes de circuitos e equipamentos elétricos são dados em termos de valores eficazes. Em análise de potência é conveniente expressar tensão e corrente elétrica em seus valores RMS, assim como os voltímetros e os amperímetros analógicos são projetados para mostrarem diretamente o valor RMS da tensão e da corrente, respectivamente (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), quando uma tensão ou uma corrente senoidal é especificada, normalmente ela é expressa em termos de seu valor máximo (ou pico) ou de seu valor RMS, já que o valor médio é zero. A indústria do setor de energia elétrica especifica as magnitudes em termos de seus valores RMS e não em termos de seus valores de pico. Por exemplo, os 127 ou 220V disponíveis em nossas residências, que correspondem ao valor RMS da tensão entregue pela concessionária de energia elétrica.

Para Alexander e Sadiku (2013), é possível calcular o valor eficaz de qualquer função periódica $x(t)$, sendo utilizada a equação (15).

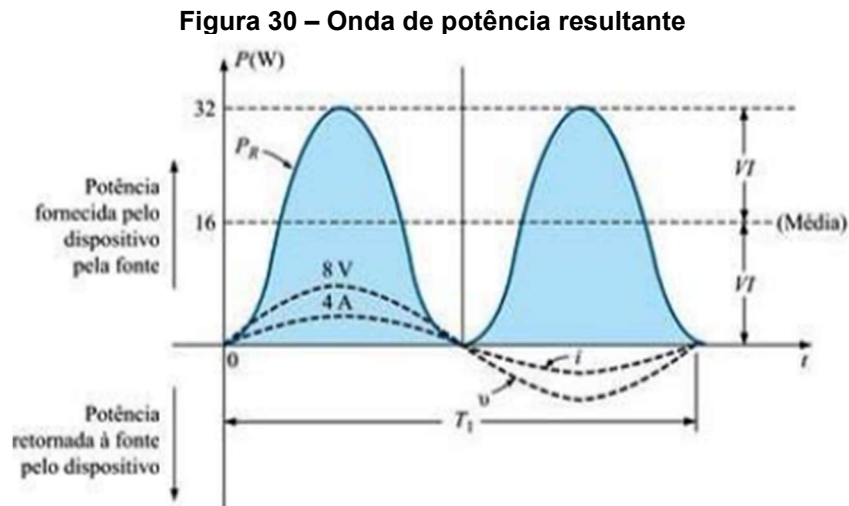
$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (15)$$

Para ondas senoidais onde sua função possua apenas uma constante multiplicando uma função senoidal, ou seja, uma função do tipo $x \cos(\omega t + \phi)$, com a utilização da equação (15) após simplificações, encontra-se que, para ondas senoidais, o valor eficaz é igual a $\frac{x}{\sqrt{2}}$. Para o caso da potência elétrica, de maneira similar, pode ser definida como a equação (16).

$$P = \frac{V_M I_M}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \cos(\theta_v - \theta_i) =$$

$$V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta_v - \theta_i) = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (16)$$

Segundo Boylestad (2012), embora a corrente e tensão revertam o sentido e a polaridade, respectivamente, a potência é fornecida à carga em cada instante do tempo. A Figura 30 ilustra três ondas, sendo duas delas a de tensão e corrente em fase, enquanto que, a terceira onda é referente a onda de potência elétrica resultante das ondas de tensão e corrente.



Fonte: Boylestad (2012)

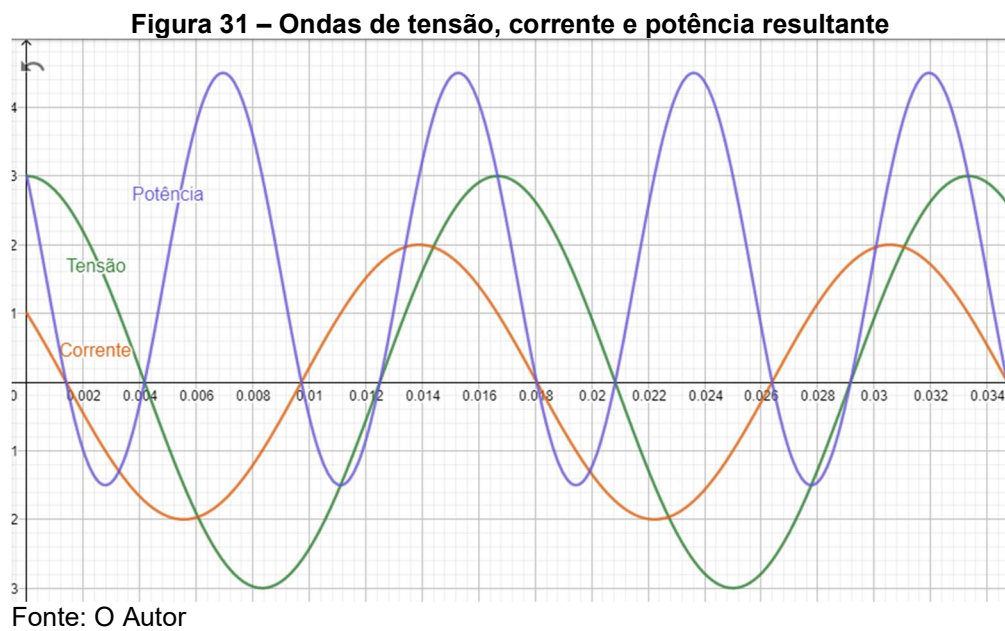
2.5 Potência em circuitos alternados

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), a potência é o valor mais importante em sistemas de energia elétrica, eletrônicos e de comunicação, pois envolvem a transmissão de energia de um ponto ao outro. Além disso, a forma mais comum de energia elétrica é a energia CA com 50 ou 60 Hz de frequência. A escolha de CA e não de CC, é o que permitiu a transmissão de energia em alta tensão da usina geradora até o consumidor.

A potência instantânea $p(t)$ da Equação (10) é o produto entre a corrente $i(t)$ e tensão $v(t)$ para um dado instante de tempo t . Dessa forma, de acordo com Gussow (2009), no momento que as ondas $v(t)$ e $i(t)$ forem ambas positivas ou negativas, seu produto será positivo, representando uma potência que está sendo gasta, denominada potência ativa, entretanto, caso o sinal de $v(t)$ e de $i(t)$

possuírem sinais diferentes, o produto terá um valor negativo, esse valor de “potência negativa” não está disponível para realização de trabalho, sendo denominado potência reativa.

Na Figura 31 abaixo, têm-se o gráfico de uma onda de potência gerada a partir de duas ondas senoidais de tensão e corrente defasadas, desta forma, a onda de potência possui valores positivos e negativos.



2.5.1 Potência aparente e fator de potência

Na subseção 2.4.2 anterior, foi introduzida a equação (16 da potência RMS, onde, apenas o produto $V_{RMS}I_{RMS}$ sem o argumento $\cos(\theta_v - \theta_i)$ representa o valor RMS da potência aparente, que é representada pela letra “S”, dessa forma, a equação referente à potência aparente é:

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (17)$$

A potência aparente é medida em Volt-Ampère (VA), sendo assim nomeada porque parece que deve ser o produto tensão-corrente, por analogia com os circuitos resistivos em CC, conseguindo assim distingui-la da potência média ou real, que é medida em Watts (ALEXANDER; SADIKU, 2013). O fator de potência é adimensional e se trata da razão entre a potência real e a potência aparente, ou

ainda, do cosseno do ângulo de defasagem entre a onda de tensão e corrente (ALEXANDER; SADIKU, 2013), assim como mostrado na equação (18).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (18)$$

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), entende-se que a potência P (ativa) é a potência que realmente realiza trabalho, enquanto que, a potência S (aparente) se trata da potência total que foi dissipada. A razão entre P e S, ou seja, o fator de potência, é um valor que varia entre zero e a unidade, onde, quando a carga é puramente resistiva, as ondas de tensão e corrente estão em fase, resultando em um fator de potência unitário, dessa forma, a potência P é igual à potência S, devido ao fato de não haver uma potência reativa.

Ainda segundo Alexander e Sadiku (2013), caso a carga for puramente reativa, têm-se que $\theta_v - \theta_i = \pm 90^\circ$, dessa forma, o fator de potência é igual a zero. Dessa forma, a potência ativa é zero, enquanto que, a potência aparente é igual a potência reativa. Nesse caso extremo, diz-se que o fator de potência está adiantado ou atrasado, onde, um fator de potência adiantado significa que a corrente está adiantada em relação à onda de tensão, implicando que a carga reativa é do tipo capacitiva. O contrário também é válido, onde caso o fator de potência esteja atrasado, significa que a corrente está atrasada em relação à onda de tensão, implicando que a carga reativa é do tipo indutiva.

2.5.2 Potência complexa

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), a potência complexa é importante na análise de potência por conter todas as informações pertinentes à potência absorvida por uma determinada carga. A potência complexa pode ser expressa em termos de impedância local (Z), onde a impedância pode ser escrita como a equação (19) abaixo.

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \angle \theta_v - \theta_i \quad (19)$$

A potência ativa (P) é a parte real, enquanto que, a potência reativa (Q) é a parte imaginária da potência complexa (ALEXANDER; SADIKU, 2013), assim como mostrado nas equações (20) e (21) logo abaixo, onde R é a resistência da carga e X a reatância.

$$P = \text{Re}(S) = I_{RMS}^2 R \quad (20)$$

$$Q = \text{Im}(S) = I_{RMS}^2 X \quad (21)$$

“A potência complexa (em VA) é o produto do fasor de tensão RMS e o conjugado complexo do fasor de corrente RMS. Por ser um número complexo, sua parte real é a potência real P (ativa) e sua parte imaginária é a potência reativa Q.” (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Dessa forma, obtêm-se as seguintes equações:

$$S = P + jQ = |V_{RMS}| |I_{RMS}| \angle \theta_v - \theta_i \quad (22)$$

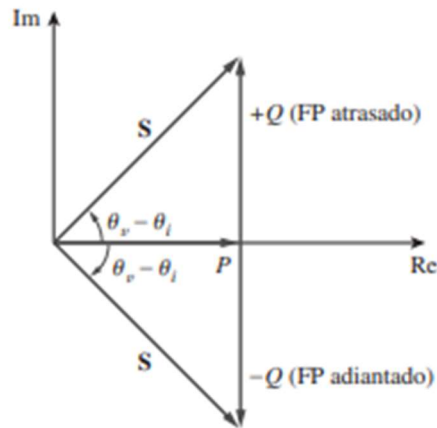
$$S = |S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (23)$$

$$P = \text{Re}(S) = S \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (24)$$

$$Q = \text{Im}(S) = S \text{sen}(\theta_v - \theta_i) \quad (25)$$

Alexander e Sadiku (2013) afirmam que, é prática comum representar S, P e Q na forma de um triângulo, conhecido como triângulo de potência. O triângulo de potência possui quatro parâmetros: potência aparente, potência real, potência complexa e ângulo do fator de potência. Na Figura 32 está ilustrado o triângulo de potências.

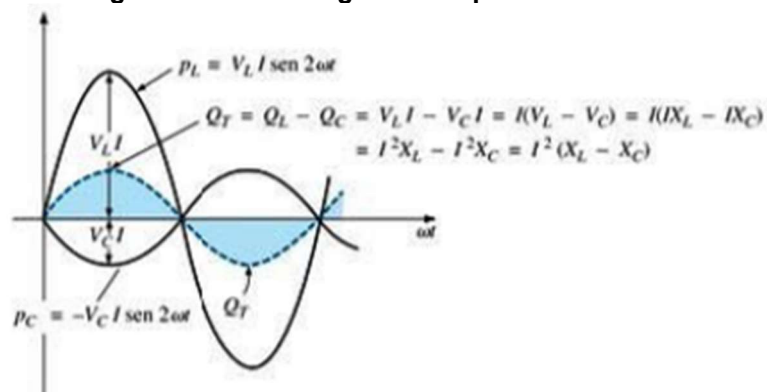
Figura 32 – Triângulo de potência



Fonte: Alexander e Sadiku (2013)

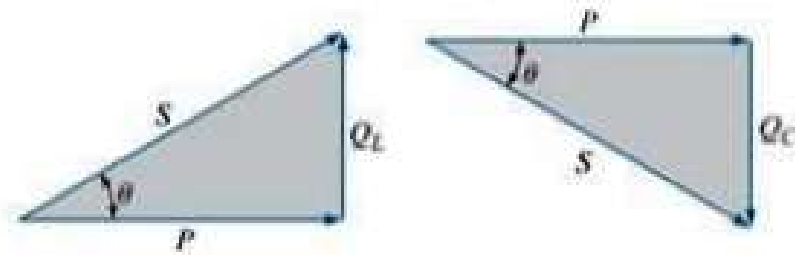
Segundo Boylestad (2012), ao analisar a equação 22, pode-se dizer que, para uma carga indutiva, o valor de Q será positivo, enquanto que, para uma carga capacitiva, o valor de Q será negativo. Boylestad (2012) também afirma que, se um circuito elétrico contém elementos capacitivos e indutivos, a componente reativa é determinada pela diferença entre as potências reativas fornecidas a esses elementos. A Figura 33 ilustra como funciona esse cálculo, onde P_L é a potência indutiva, P_C é a potência capacitiva e Q_T é a potência reativa resultante. Já na Figura 34, são ilustradas duas representações de triângulos de potência, onde o da esquerda é para uma potência reativa resultante indutiva e o da direita com potência reativa resultante capacitiva.

Figura 33 – Cálculo gráfico da potência reativa



Fonte: Boylestad (2012)

Figura 34 – Triângulo de potência para carga indutiva e capacitiva



Fonte: Boylestad (2012), adaptado pelo Autor

2.6 Transformadores

Segundo Chapman (2013), a finalidade principal de um transformador é a de converter a potência elétrica CA de um nível de tensão, em potência elétrica CA de mesma frequência, entretanto, com outro nível de tensão. Os transformadores também são utilizados para outros propósitos, como amostragem de tensão, amostragem de corrente e transformação de impedância.

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), o transformador é um dispositivo magnético que tira proveito do fenômeno da indutância mútua, onde geralmente é um dispositivo de quatro terminais formado por duas (ou mais) bobinas acopladas magneticamente.

2.6.1 Transformador de corrente

Conforme diz Mamede Filho (2005), os transformadores de corrente são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente, sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados. Em sua forma mais simples, possuem um primário, geralmente de poucas espiras, e um secundário, no qual possui a saída de corrente transformada.

Ainda segundo Mamede Filho (2005), os transformadores de corrente, são utilizados para suprir aparelhos que apresentam baixa resistência elétrica, tais como amperímetros, relés, entre outros. Sua relação de transformação das correntes primária e secundária é inversamente proporcional à relação entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário.

A Figura 35 ilustra um transformador de corrente com relação de espiras 1:2000, ou seja, sua corrente no secundário possui uma razão de $\frac{1}{2000}$ em relação à corrente no primário. O transformador de corrente em questão foi o utilizado para o projeto, onde caso for aplicado a corrente máxima permitida de 100 A RMS em seu primário, é possível obter uma corrente de 50 mA RMS em seu secundário.

Figura 35 – Transformador de corrente utilizado no projeto



Fonte: O Autor

2.6.2 Transformadores de tensão

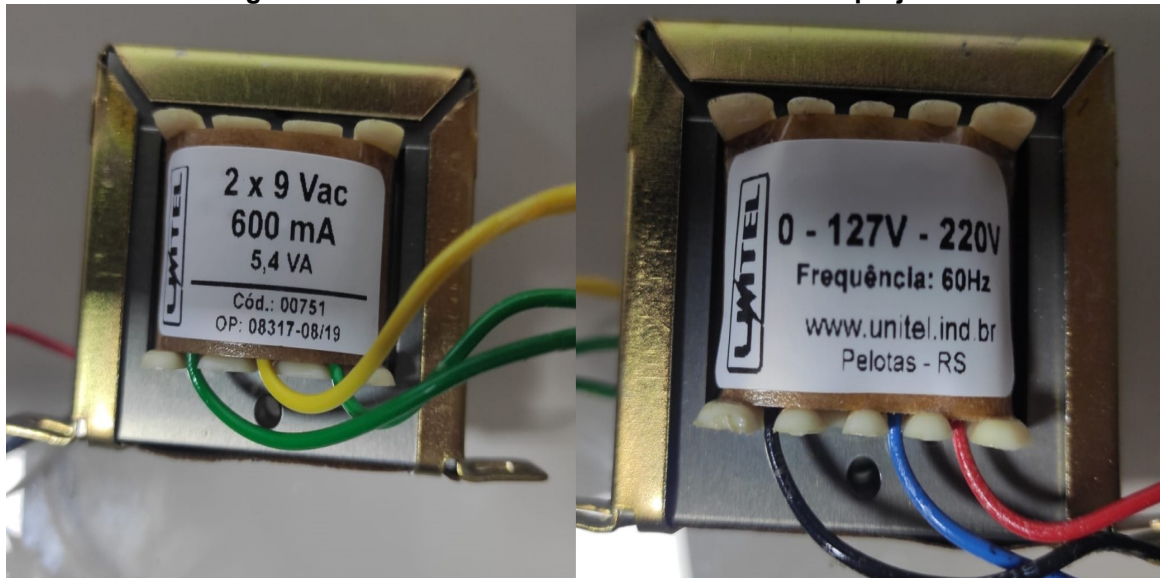
Segundo Mamede Filho (2005), os transformadores de tensão são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuir tensão de isolamento de acordo com a rede à qual estão ligados (no caso deste projeto, é de 220 V RMS). Em sua forma mais simples, os transformadores de tensão possuem um enrolamento primário de muitas espiras e um enrolamento secundário através do qual se obtém a tensão elétrica desejada.

Ainda de acordo com Mamede Filho (2005), eles são equipamentos utilizados para suprir aparelhos que apresentam elevada impedância, tais como voltímetros, relés de tensão, entre outros. São utilizados indistintamente nos sistemas de proteção e medição de energia elétrica.

A Figura 36 ilustra um transformador de tensão com relação de espiras 220:9, ou seja, caso o secundário possua 9 espiras, em seu primário, serão 220 espiras. Logo, como sua tensão primária é de 220 Vac RMS, serão 9 Vac RMS em seu secundário, dessa forma, a onda em seu secundário terá um valor de pico de

aproximadamente 12,73 V. O transformador de tensão da figura em questão foi o utilizado para o projeto, possuindo uma corrente máxima de operação de 600 mA.

Figura 36 – Transformador de tensão utilizado no projeto



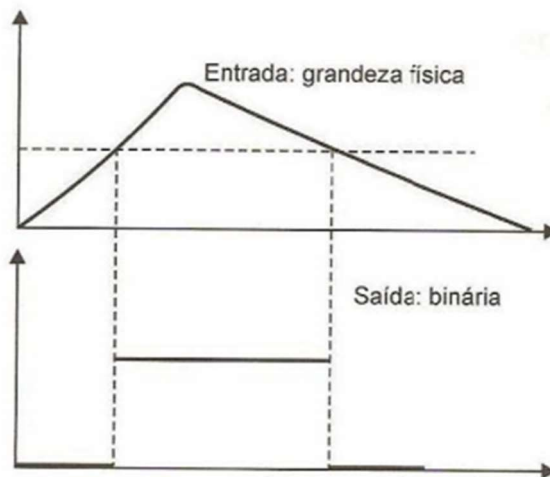
Fonte: O Autor

2.7 Sensores

De acordo com Inmetro (2012), o sensor é um elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida. Já no caso do termo transdutor, utiliza-se para definir um dispositivo, utilizado em medição, que fornece uma grandeza de saída, a qual tem uma relação especificada com uma grandeza de entrada.

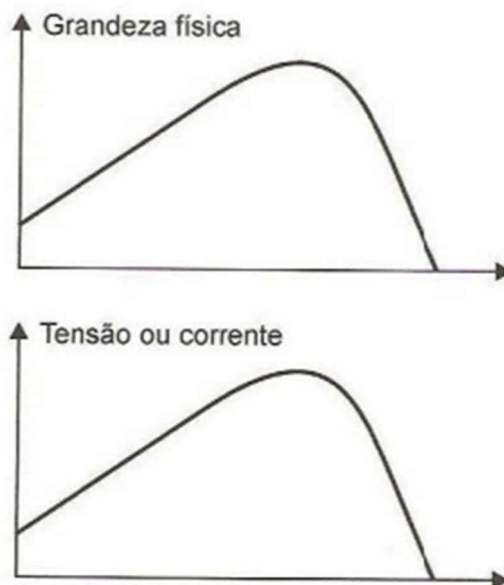
2.7.1 Tipos de saída

Segundo Thomazini e Albuquerque (2018), os transdutores podem ter dois tipos de saída, uma saída do tipo digital ou do tipo analógica. O dispositivo que possui o tipo de saída digital (também conhecida como saída binária), tem sua saída discreta, sendo assim, só assume valores “0” ou “1” lógicos, indicando apenas se uma grandeza física atingiu um valor predeterminado (exemplos: pressostatos, termostatos, etc.). A Figura 37 abaixo, ilustra a saída de um sensor com saída do tipo digital.

Figura 37 – Saída digital de um transdutor

Fonte: Thomazini e Albuquerque (2018)

Já para o tipo de saída analógica, Thomazini e Albuquerque (2018) comentam que, o transdutor possui uma saída contínua, sendo sua saída basicamente uma réplica da grandeza física da entrada. Alguns exemplos de transdutores com saída analógica são as células de carga, transdutores de pressão analógicos, etc. A Figura 38 abaixo, ilustra o gráfico de saída de um transdutor analógico de acordo com a grandeza física na entrada.

Figura 38 – Saída analógica de um transdutor

Fonte: Thomazini e Albuquerque (2018)

2.7.2 Classificação dos sensores

Segundo Thomazini e Albuquerque (2018), os sensores podem ser classificados quanto à localização, onde pode ser um instrumento de painel de uso interno ou um instrumento de campo, e quanto à função, podendo ser um medidor, indicador, registrador, controlador ou alarme.

Entretanto, Fraden (2010) oferece três métodos diferentes de classificação dos sensores, sendo o primeiro deles a simples indagação sobre o sensor ser ativo ou passivo, onde um sensor passivo se trata de um sensor que não necessita nenhuma energia adicional, gerando diretamente um sinal elétrico em resposta a um estímulo externo. Já no caso do sensor ativo, ele necessita de uma energia externa para sua operação, energia essa denominada como sinal de excitação, onde o sinal medido é modificado para que o sensor consiga gerar o sinal de saída.

O segundo método depende da referência selecionada, podendo ser classificado entre absoluto ou relativo. Um sensor absoluto detecta um sinal de estímulo, transformando-o diretamente para outra grandeza mensurável, por exemplo um sensor de pressão que tem sua saída de acordo com a entrada, mas diretamente proporcional ao vácuo, considerado como zero absoluto na escala de pressão. Já no caso de um sensor relativo, têm-se como exemplo um sensor de pressão que produz o sinal de saída de acordo com uma escala onde o valor zero não se trata do vácuo, por exemplo, considerando o valor zero como a pressão atmosférica.

Já o terceiro método, se trata de considerar algumas das propriedades que podem ser de interesse específico, sendo elas as especificações do sensor, material do sensor, método de detecção, fenômeno de conversão, campos de aplicação, unidades de medida utilizada e tipos de estímulo. O anexo A possui as tabelas de exemplos dessas propriedades dos sensores, tabelas essas retiradas de Fraden (2010).

2.7.3 Sensor de corrente

De acordo com Platt e Jansson (2016), um sensor de corrente mede o fluxo de eletricidade através de um cabo ou dispositivo, tendo uma saída que pode

ser interpretada visualmente ou por um microcontrolador que forneça uma medida em ampères ou frações de ampères. Platt e Jansson (2016) em seu livro menciona três tipos de sensores de correntes, sendo eles o amperímetro, um resistor em série e o sensor Hall.

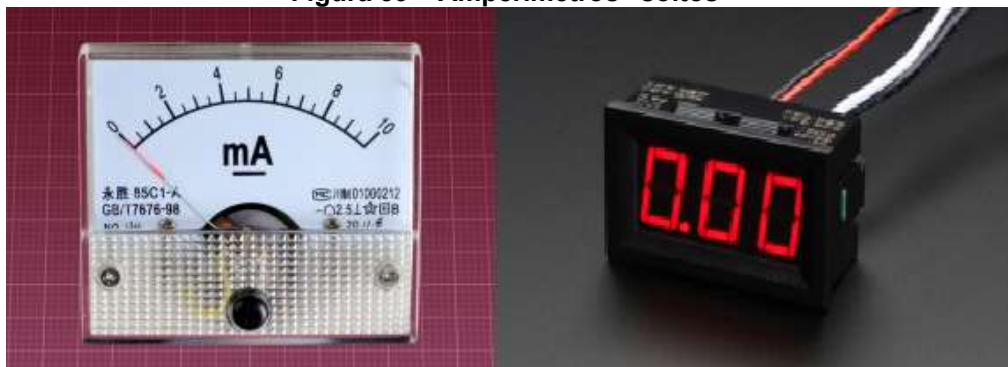
Já no livro de Thomazini e Albuquerque (2018), os sensores de corrente são divididos em sensores de corrente CC e corrente CA, onde os sensores de corrente contínua são: o supramencionado sensor Hall, o resistor shunt, o transformador CC e o relé térmico. Já para a corrente CA, assim como para a corrente CC, existem os métodos do resistor shunt e relé térmico, entretanto, o dispositivo mais utilizado é o transformador de corrente CA (TC).

2.7.3.1 Amperímetro

Segundo Platt e Jansson (2016), o amperímetro é geralmente descrito como um medidor de teste, geralmente visto construído junto a um multímetro. O amperímetro “solto”, é desenvolvido para instalação permanente em um dispositivo ou protótipo, sendo um tipo de painel medidor. Dessa forma, existem basicamente 2 tipos de amperímetros, os “soltos” que podem ser analógicos ou digitais e os embutidos em multímetro, também com escalas analógica e digital, onde, no caso do multímetro, a medição pode ser feita ou via cabo ou com a “garra” caso for um multímetro com alicate amperímetro.

A Figura 39 abaixo, ilustra os amperímetros “soltos”, onde o da esquerda possui escala analógica e o da direita escala digital, enquanto que, a Figura 40 ilustra os multímetros que possuem um amperímetro, onde o da esquerda a medição é feita com cabos e o da direita com a garra.

Figura 39 – Amperímetros “soltos”



Fonte: Platt e Jansson (2016), adaptado pelo Autor

Figura 40 – Multímetro com e sem alicate amperímetro

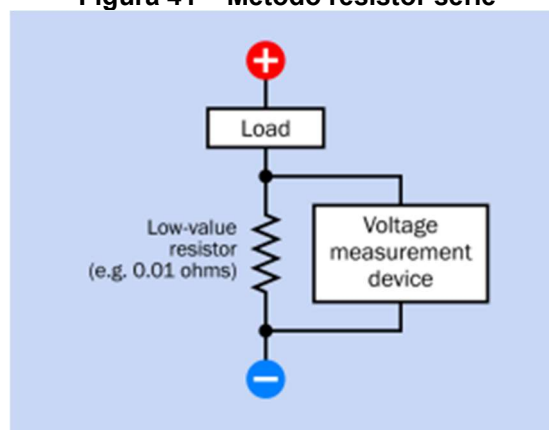


Fonte: Fluke Academy⁶

2.7.3.2 Resistor série

De acordo com Platt e Jansson (2016), o resistor série basicamente se trata de um resistor submetido à corrente que se deseja mensurar, onde sua variação será mensurada por um dispositivo medidor de tensão em paralelo com o resistor, utilizando-se para isso a lei de Ohm, onde $I = \frac{V}{R}$. A Figura 41 abaixo ilustra como é feito este tipo de medição.

Figura 41 – Método resistor série



Fonte: Platt e Jansson (2016)

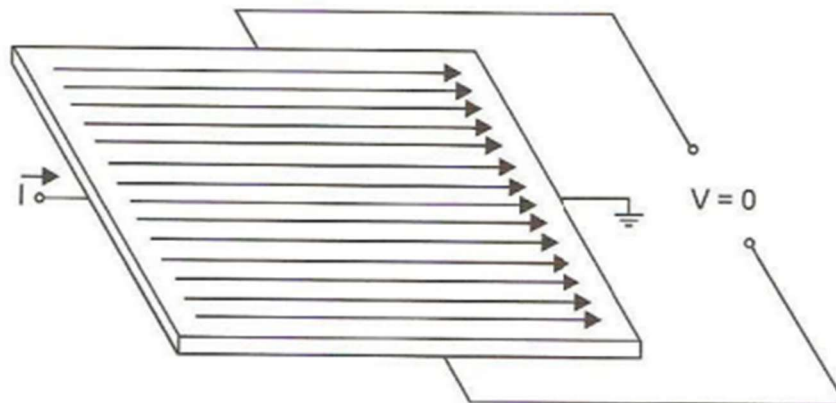
⁶ Disponível em: https://www.flukeacademy.com.br/blog/post/59/qual_a_diferença_entre_multímetro_e_alicate_amperímetro. Acesso em jul. 2021.

2.7.3.3 Efeito Hall

Na visão de Platt e Jansson (2016), o funcionamento do sensor de efeito Hall se trata da resposta quanto exposto a um campo magnético, gerando uma pequena tensão elétrica, que é geralmente amplificada via transistor já incluído com o sensor (formando o transdutor). Basicamente o que acontece é que, quando uma corrente está transitando em um condutor exposto a um campo magnético, é gerada uma força sobre o condutor exposto, causando o afastamento dos elétrons e lacunas, de modo que haja um acúmulo assimétrico nos lados opostos, gerando assim, uma tensão elétrica.

Já Thomazini e Albuquerque (2018), descreve o efeito Hall como sendo o efeito devido ao aparecimento de campo elétrico transversal em um condutor percorrido por uma corrente elétrica, quando ele se encontra mergulhado em um campo magnético. A Figura 42 ilustra um material semiconductor percorrido por uma corrente elétrica constante, onde ainda não foi mergulhado em um campo magnético.

Figura 42 – Semicondutor percorrido por corrente elétrica

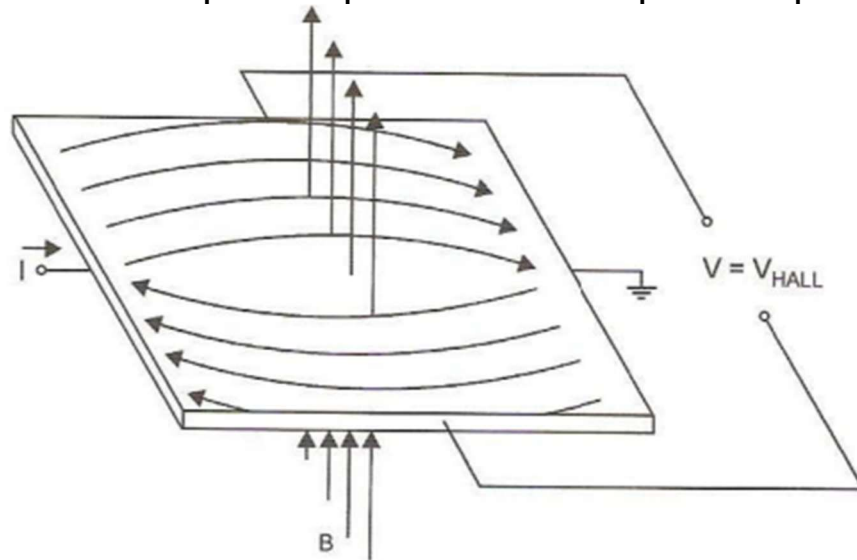


Fonte: Thomazini e Albuquerque (2018)

Já na Figura 43, é ilustrado o mesmo semicondutor percorrido por uma corrente elétrica, entretanto, agora mergulhado em um campo magnético. A equação (26) descreve como se dá o comportamento da tensão gerada pela diferença de cargas nas extremidades, onde V_{HALL} representa a tensão gerada nas extremidades do meio condutor, k representa uma constante definida pela geometria do plano condutor e pela temperatura ambiente, I representa a corrente elétrica que flui

através do elemento e $B \sin(\theta)$ representa o componente do campo magnético perpendicular ao condutor.

Figura 43 – Semicondutor percorrido por corrente elétrica exposto à campo magnético



Fonte: Thomazini e Albuquerque (2018)

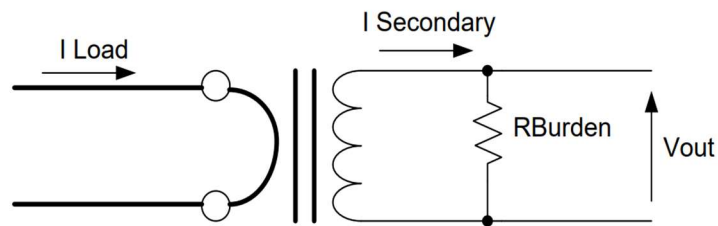
$$V_{HALL} = k I B \sin(\theta) \quad (26)$$

2.7.3.4 Resistor Shunt

Segundo Thomazini e Albuquerque (2018), o método de medição de corrente com o uso do resistor *shunt* consiste em: uma resistência de baixo valor colocada em paralelo com o circuito que se pretende medir a corrente. É medida então a queda de tensão entre os terminais do dispositivo, amplificando-se para análise posterior.

A Figura 44 ilustra como é feito esse arranjo para o caso de um transformador de corrente, onde I_{Load} representa a corrente no primário, $I_{Secondary}$ a corrente no secundário, R_{Burden} o resistor de carga ou resistor *shunt* e V_{out} a queda de tensão no resistor. A equação (27) exhibe a relação entre as variáveis da ligação, onde N representa a relação de espiras entre o primário e secundário do transformador de corrente.

Figura 44 – Método resistor shunt



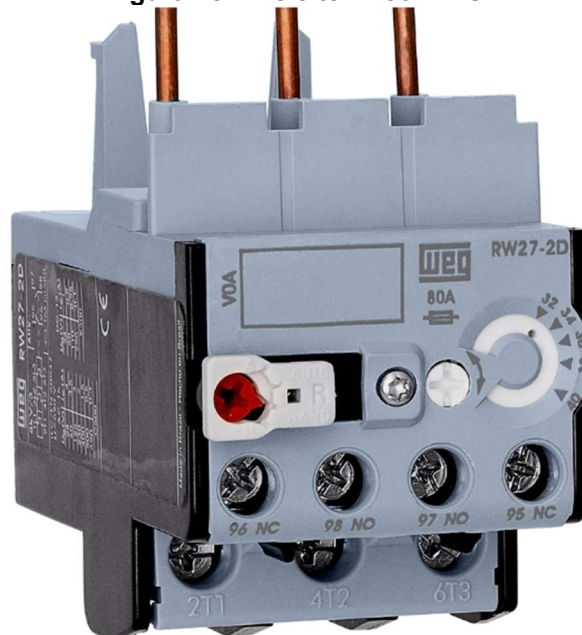
Fonte: Teridian Semiconductor Corporation (2010)

$$V_{out} = \frac{R_{Burden} \times I_{Load}}{N} \quad (27)$$

2.7.3.5 Relé térmico

Segundo Thomazini e Albuquerque (2018), se trata basicamente de um dispositivo de proteção para motores de corrente alternada, cuja operação é produzida por movimento mecânico sob a ação de determinados valores de corrente nos circuitos de entrada. De acordo com Electronics (2021), O relé térmico basicamente é um atuador de corrente que, após detectada uma sobrecarga de corrente, suas lâminas internas aquecem e dilatam, desarmando o circuito em que está conectado. A Figura 45 ilustra um relé térmico da marca WEG.

Figura 45 – Relé térmico WEG



Fonte: Catálogo WEG⁷

⁷ Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automação-e-Control-Industrial/Controls/c/BR_WDC_IA_CTL. Acesso em jul. 2021.

2.8 Amplificador Operacional

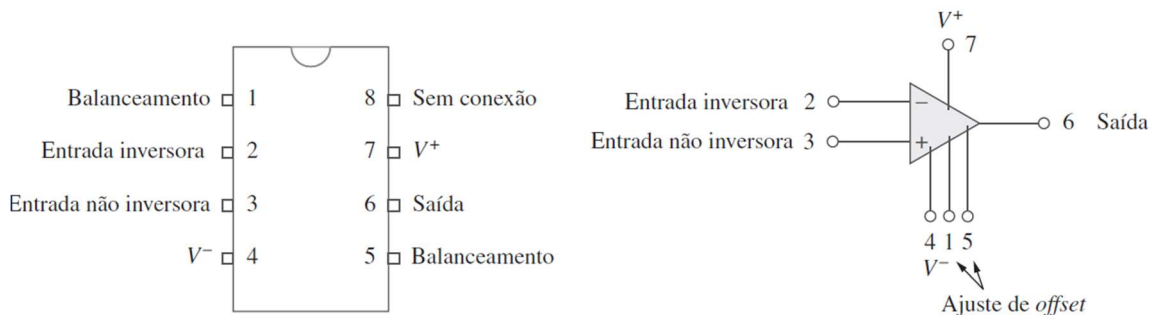
De acordo com Alexander e Sadiku (2013), o amplificador operacional é uma unidade eletrônica que se comporta como uma fonte de tensão controlada por tensão, sendo ele um componente básico dos circuitos. Além disso, Alexander e Sadiku (2013) também comentam que o amplificador operacional é um elemento de circuito ativo, projetado para executar operações matemáticas de: adição, subtração, multiplicação, divisão, diferenciação e integração.

O amplificador operacional surgiu por volta de 1940, com o intuito de ser utilizado em computadores analógicos e, atualmente, encontra vasta aplicação no projeto de circuitos, em consequência dos avanços na tecnologia dos circuitos integrados (IRWIN, 2010). Ainda de acordo com Irwin (2010), apesar de sua construção aparentar ser simples, na realidade envolve o uso de inúmeros componentes discretos, incluindo resistores, capacitores e transistores, enquanto que, Alexander e Sadiku (2013), mencionam também a presença de diodos.

Para Balbinot e Brusamarello (2011), atualmente, o amplificador operacional é um dos principais componentes no projeto de condicionadores de sinais e pode ser encontrado com diversas características. De acordo com Boylestad e Nashelsky (2013), o amplificador operacional, ou amp-op, é um amplificador diferencial de ganho muito alto, alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Ainda segundo Boylestad e Nashelsky (2013), suas utilizações típicas compreendem alterações em valores de tensões (amplitude e polaridade), osciladores, filtros e diversos tipos de circuitos de instrumentação. O amplificador operacional é utilizado em uma ampla gama de aplicações, desde sistemas de controle de motores até fornos micro-ondas (IRWIN, 2010).

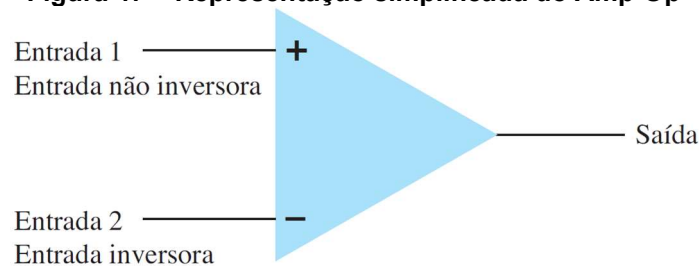
Para Alexander e Sadiku (2013), os amplificadores operacionais são encontrados no mercado em circuitos integrados (CIs) sob diversas formas, onde um encapsulamento conhecido é o *Dual In-line Package* (DIP) de oito pinos. A Figura 46 logo abaixo ilustra a pinagem do CI e sua respectiva representação em circuitos. Já a Figura 47 ilustra a representação em circuitos em sua forma simplificada.

Figura 46 – Amplificador operacional: pinagem do CI e respectiva representação



Fonte: Alexander e Sadiku (2013)

Figura 47 – Representação simplificada do Amp-Op



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013)

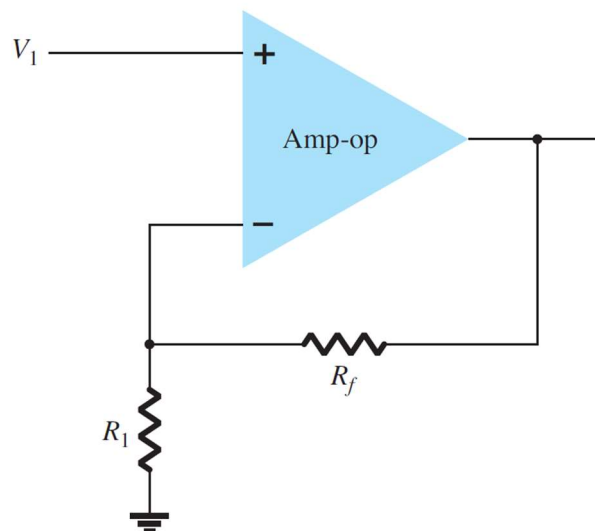
Dependendo da configuração que o amplificador operacional é utilizado, ele pode desempenhar diferentes funções como supramencionado. Entretanto, para este projeto, foram utilizadas apenas duas dessas funções, a função de multiplicação e a função de seguidor de tensão ou *buffer*.

2.8.1 Amplificador não inversor

Nesta configuração, os sinais de entrada e saída continuam em fase, entretanto, o módulo da saída é igual ao módulo de entrada multiplicado por um fator, fator esse descrito pela equação (28), onde v_s é a tensão de saída e v_e a tensão de entrada. A Figura 48 logo abaixo ilustra como é feita a configuração do amplificador não inversor, enquanto que, a Figura 49 ilustra como se comporta a saída quando há uma amplificação de 11 vezes (com uma alimentação de 15 V).

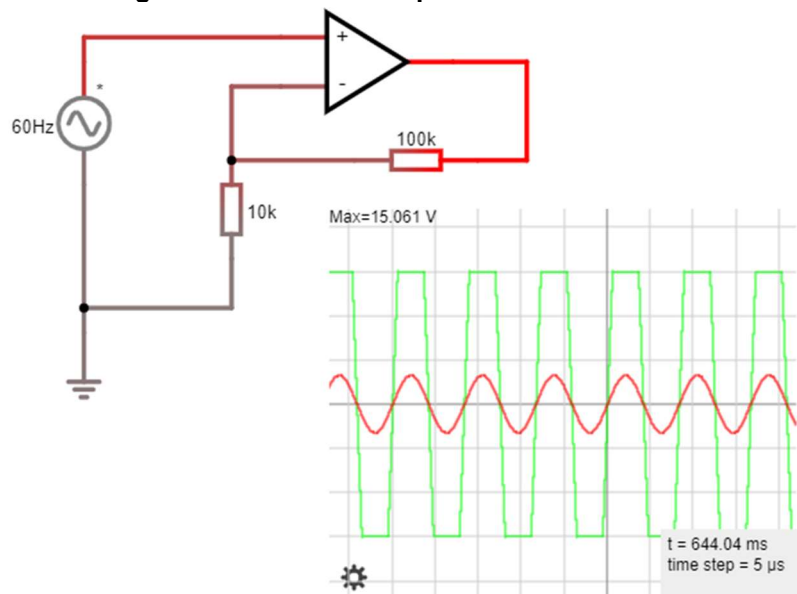
$$v_s = v_e \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (28)$$

Figura 48 – Amplificador não inversor



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013), adaptado pelo Autor

Figura 49 – Saída do amplificador não inversor



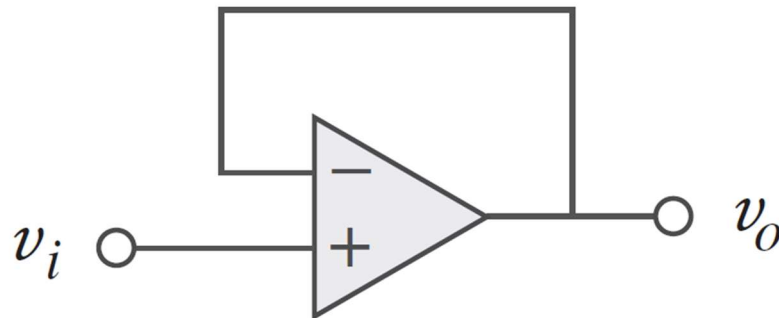
Fonte: O Autor

Analisando-se a equação (28) acima, percebe-se que, o fator de amplificação é definido basicamente pela razão entre os resistores R_1 e R_2 , além da limitação por parte da tensão de alimentação. Na Figura 49, pode-se perceber essa limitação por parte da alimentação, onde seu valor máximo está sendo limitado a 15 V assim como visto na onda verde no gráfico, que é, justamente, o valor da alimentação do circuito integrado.

2.8.2 Seguidor de tensão ou *Buffer*

Esse tipo de configuração é muito útil, pois apresenta uma impedância muito alta na entrada, e uma impedância muito baixa na saída, sendo bastante utilizado para isolar etapas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). Um exemplo onde é utilizado este tipo de configuração, é para garantir que um divisor de tensão não seja influenciado por outras impedâncias, garantindo assim a correta divisão da tensão, ou, ainda outro exemplo, seria o caso utilizado para este projeto, onde esta configuração foi utilizada para cortar a parte negativa do sinal, pois este pode danificar o Arduino. A Figura 50 abaixo ilustra a montagem desta configuração.

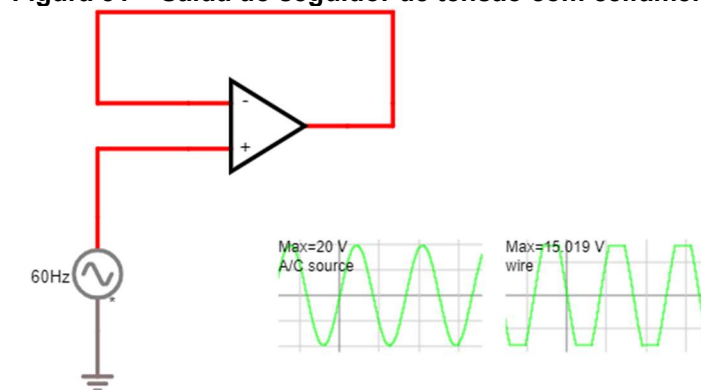
Figura 50 – Configuração seguidor de tensão ou *Buffer*



Fonte: Alexander e Sadiku (2013)

Na Figura 51, é ilustrada a configuração montada, com os gráficos da entrada (esquerda) e saída (direita) da configuração, quando sua entrada é uma tensão senoidal com 20 V de pico. Pode-se perceber que, a saída basicamente é a réplica da tensão na entrada, com a diferença na limitação por parte da alimentação do circuito integrado, que neste caso é de +15 e -15 V.

Figura 51 – Saída do seguidor de tensão com ceifamento



Fonte: O Autor

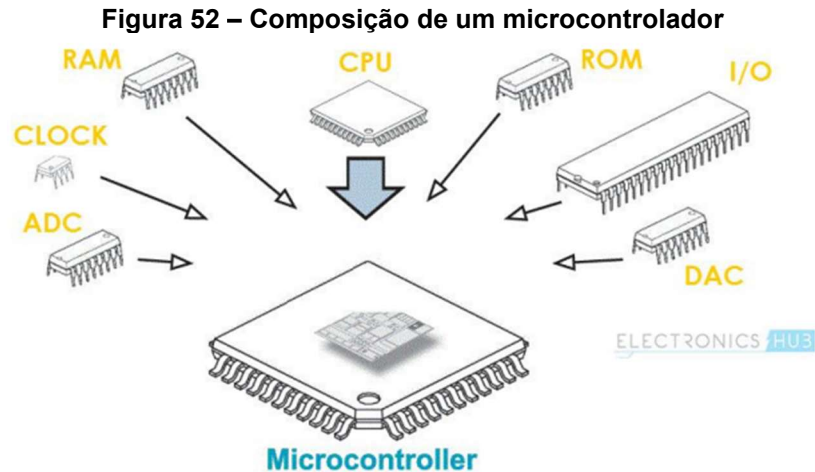
2.9 Arduino

Segundo Arduino (2018), o Arduino se trata de uma plataforma eletrônica de código aberto ou *open source*, baseada em software e hardware de fácil utilização. As placas Arduino conseguem ler sinais em suas entradas, acionar um sensor com suas saídas, acionar um motor e até mesmo publicar algo online. É possível comandar a placa enviando um conjunto de instruções ao microcontrolador presente na placa, onde, para isso, é utilizada a linguagem Arduino (baseada em *Wiring*) em conjunto com o software Arduino (ambiente de desenvolvimento integrado ou IDE), que é baseado na linguagem *Processing*.

De acordo com McRoberts (2015), a placa Arduino, colocando em termos leigos, é um computador minúsculo que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos que conectar a ele. O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada.

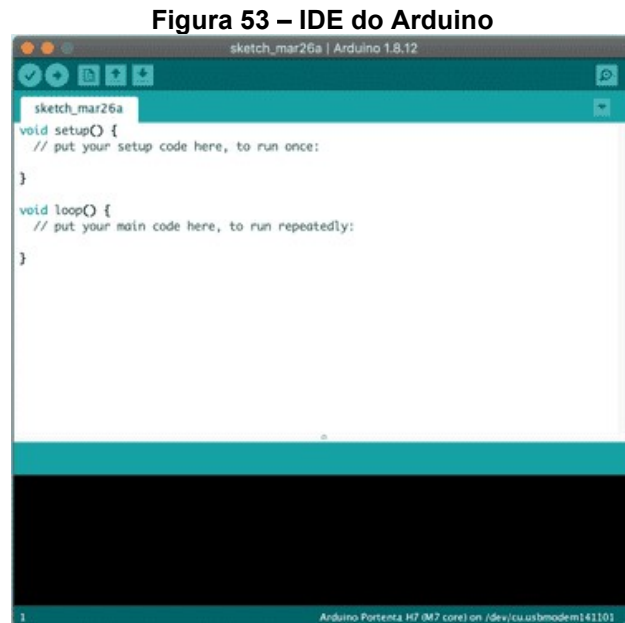
Segundo Oliveira e Shin-Ting (2019), um microcontrolador é considerado um sistema computacional de baixo custo, de baixo consumo de energia, entretanto, robusto suficiente para executar uma tarefa específica em condições de operação bem diversas, tendo embutido nele os seguintes componentes: unidade de processamento central, memória para instruções (ROM ou flash), memória para dados (RAM), temporizadores e contadores, portas de entrada/saída, interfaces de comunicação serial, circuito de relógio e mecanismo de interrupção.

Conforme dizem Mazidi, McKinlay e Causey (2008), a diferença entre um microprocessador de uso geral, como por exemplo um processador de computador residencial, e um microcontrolador, está na memória RAM, memória ROM e portas de entradas e saídas, onde, apenas estão presentes no microcontrolador. A Figura 52 logo abaixo ilustra a composição de um microcontrolador.



Fonte: Oliveira e Shin-Ting (2019)

A Figura 53 abaixo ilustra como é a interface da IDE do Arduino, que é utilizada para configurar e carregar a programação desejada para o microcontrolador presente na placa Arduino.



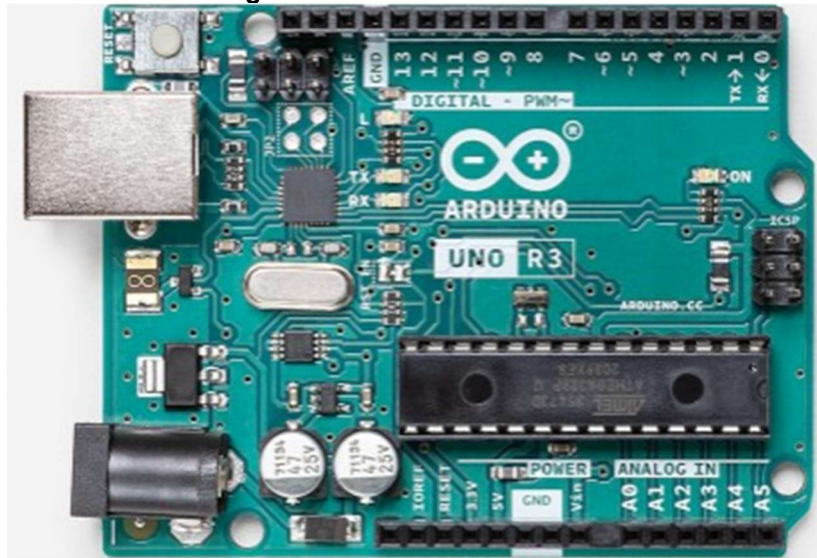
Fonte: Ambiente Arduino⁸, alterada pelo Autor

Existem vários tipos de placas Arduino, algumas com o mesmo microcontrolador, mas com diferenças, enquanto que, outras com um microcontrolador totalmente diferente. Segundo Mitchell (2018), o Arduino UNO é o Arduino mais popular, contando com um microcontrolador Atmega328 operando em

⁸ Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>. Acesso em jul. 2021.

uma frequência de 16 MHz, além disso, possui alimentações de 5 e 3.3V. A Figura 54 ilustra a placa Arduino UNO supramencionada.

Figura 54 – Placa Arduino UNO



Fonte: Loja Arduino⁹

2.10 Protocolo LoRa

LoRa (abreviação de *long range*, ou traduzindo para o português, longo alcance), segundo Semtech (2021), se trata de uma técnica de modulação de espectro de propagação, derivada do espectro de propagação chirp (*chirp spread spectrum* ou CSS). Os dispositivos LoRa da Semtech e a tecnologia de radiofrequência sem fio, se tratam de uma plataforma sem fio de longo alcance e baixa potência que é a plataforma sem fio da Internet das Coisas (IoT).

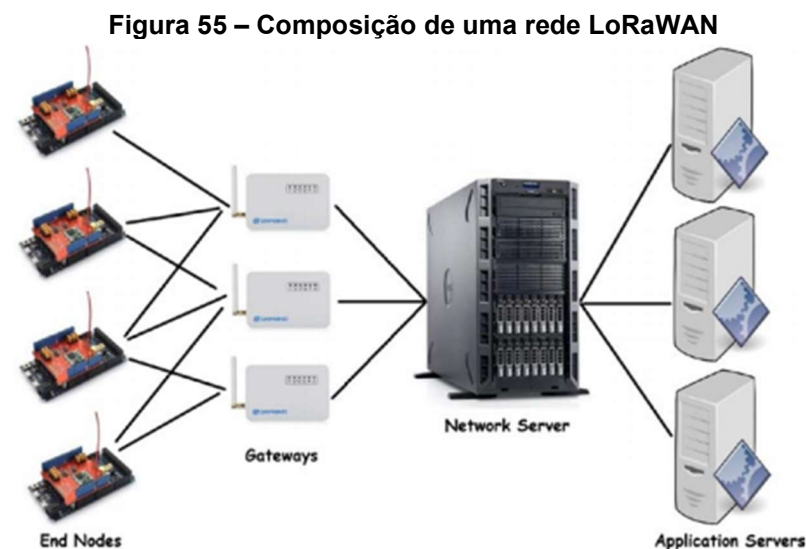
Para Seneviratne (2019), o protocolo de comunicação LoRa fornece uma transmissão de longo alcance, baixo consumo de potência, baixa taxa de dados com segurança. Ele pode ser utilizado tanto para redes públicas, privadas ou híbridas, fazendo com que possua um alcance maior que redes *cellular*, além disso, o protocolo LoRa pode ser facilmente implementado em redes já existentes, permitindo assim criar dispositivos IoT de baixo consumo, alimentados apenas por bateria.

⁹ Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em jul. 2021.

2.10.1 LoRaWAN

O protocolo LoRa consegue realizar a comunicação entre dispositivos com um baixo consumo e em grandes distâncias. Entretanto, ao conectar os dispositivos a um *Gateway* (concentrador), e posteriormente a um servidor, têm-se uma rede LoRaWAN. Segundo Seneviratne (2019), LoraWAN (*Long Range Wide Area Network*) é o protocolo de comunicação e o sistema de arquitetura para a rede, onde a comunicação LoRa permite a comunicação a longas distâncias. O protocolo LoRaWAN tem efeito nos seguintes aspectos: tempo de vida da bateria do dispositivo, capacidade de rede, qualidade de serviço, segurança e aplicativos atendidos pela rede.

Ainda de acordo com Seneviratne (2019), uma rede LoRaWAN consiste de dispositivos (*end nodes* ou nós), *gateways*, um servidor de rede e servidores de aplicações. Nessa rede LoRaWAN, as informações enviadas pelos *end nodes* são geralmente recebidas por múltiplos *gateways* e, quando recebidas, são enviadas para o servidor de rede via *cellular*, *Ethernet*, *Wifi* ou até mesmo por satélite. A Figura 55 ilustra a composição de uma rede LoRaWAN.



Fonte: Seneviratne (2019)

2.10.2 End Nodes

Segundo Seneviratne (2019) a empresa Semtech oferece vários modelos de placas para montar *end devices*, trabalhando com diferentes faixas de frequência.

Na Tabela 2 logo abaixo estão ilustrados os modelos de placas e suas respectivas faixas de frequência de operação.

Tabela 2 – Modelos de placas de comunicação LoRa da marca Semtech

Modelo	Faixa de frequência (MHz)
SX 1272	860-1000
SX 1276	137-1020
SX1278	137-525

Fonte: Seneviratne (2019)

Na Figura 56 está ilustrado a placa LoRa utilizada para o projeto, sendo ela utilizada para operar como receptor para o *Gateway* e transmissor para os *end nodes* (circuitos de medição).

Figura 56 - Placa LoRa SX1276 utilizada



Fonte: O Autor

2.10.3 Frequências LoRaWAN

De acordo com Seneviratne (2019), a LoRa *Alliance* define quais os valores de frequência a serem utilizados para diferentes regiões do mundo. Na Tabela 3 abaixo estão listados alguns países e suas respectivas faixas de frequência disponíveis para implementação de uma rede LoRaWAN.

Tabela 3 – Países e suas respectivas frequências permitidas para uso da rede LoRaWAN

Country	Band/Channels	Channel Plan
United States	902–928 MHz	US902-928, AU915-928
United Kingdom	433.05–434.79 MHz	EU433
	863–873 MHz	EU863-870
	918–921 MHz	Other
Canada	902–928 MHz	US902-928, AU915-928
Australia	915–928 MHz	AU915-928, AS923
India	865–867 MHz	IN765-867
France	433.05–434.79 MHz	EU433
	863–870 MHz	EU863-870
Sri Lanka	433.05–434.79 MHz	EU433

Fonte: Seneviratne (2019)

Segundo Anatel (2020), a tecnologia LoRa, assim como sua concorrente SigFox, utilizam faixas de frequências não licenciadas, que no Brasil são reguladas pela Resolução nº 680/2017 que se trata da regulação sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. No Brasil, segundo a resolução supramencionada, as faixas de frequência disponíveis para utilização da comunicação LoRa são as faixas de 902 até 907,5 MHz e 915 até 928 MHz.

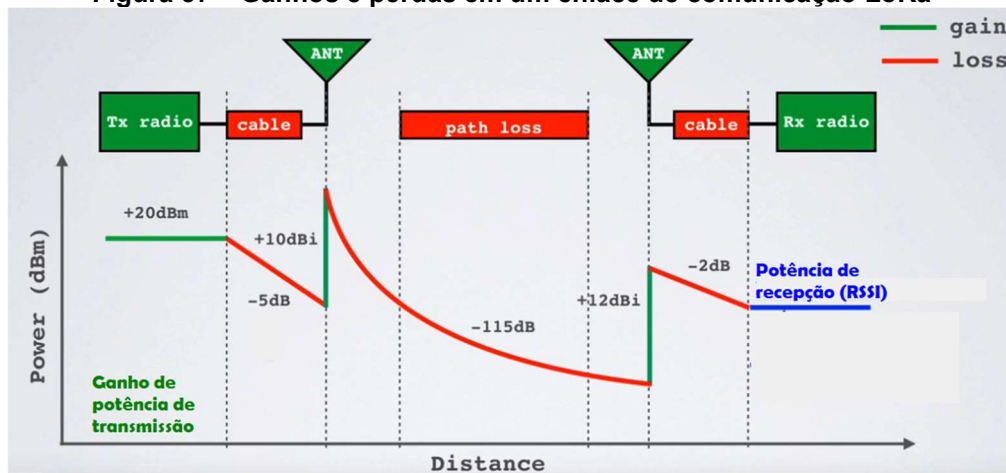
Assim como pode-se visualizar na Figura 56, na parte de trás da placa LoRa existe uma lista das frequências mais utilizadas pela placa SX1276, dessa forma, para cumprimento da Resolução nº 680/2017, no Brasil, utiliza-se placas LoRa que operem com frequência de 915 MHz.

2.10.4 Parâmetros de transmissão

Segundo Matondang (2018), o dispositivo LoRa pode ser configurado utilizando diferentes parâmetros de transmissão, sendo alguns deles o ganho de potência na transmissão, fator de espalhamento (SF), largura de banda (BW) e taxa de código (CR).

O ganho na transmissão do dispositivo LoRa utilizado permite uma configuração que varia de 0 dBm até 20 dBm, permitindo passos de 1 dBm. Para ilustrar melhor o efeito deste ganho na potência de recepção, toma-se como referência a Figura 57 logo abaixo com valores de exemplo.

Figura 57 – Ganhos e perdas em um enlace de comunicação LoRa



Fonte: Mobilefish(2018), adaptado pelo Autor

Analisando-se a Figura 57 acima, o primeiro valor de +20 dBm é o valor da potência de saída configurado na transmissão, sendo representado por TxOut na equação (29) abaixo, enquanto que, o valor de -5 dB é referente à perda no cabo da antena, representada por P_{CABO} e o valor de +10 dBi é referente ao ganho da antena do dispositivo transmissor, representado por G_{ANTENA} . Nota-se também que, as linhas verdes representam algum ganho no sinal durante o processo até o transmissor, enquanto que, as linhas vermelhas representam alguma perda.

$$P_{OUT} = TxOut + P_{CABO} + G_{ANTENA} \quad (29)$$

Na equação (29) acima, a variável P_{OUT} representa o ganho do sinal que está sendo enviado ao dispositivo receptor, desconsiderando as perdas que irá sofrer no caminho. Dessa forma, em um caso hipotético onde haja uma perda de 2 dB no cabo da antena, um ganho na saída TxOut de 17 dB e um ganho na antena de transmissão de 7 dBi, o valor de P_{OUT} seria igual a 22 dB.

Agora para falar acerca do fator de espalhamento, primeiramente deve-se entender do que se tratam os símbolos no protocolo de comunicação LoRa. Segundo Matondang (2018), o símbolo é uma representação dos dados sendo enviados, sendo representado por bits. Sua representação dependerá diretamente do valor do fator de espalhamento (SF), que irá definir em quantas partes esses bits de dados serão divididos para o envio. O número possível de valores disponíveis em um símbolo é definido diretamente pelo fator de espalhamento, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Símbolo} = 2^{SF} [\text{chips}] \quad (30)$$

Esse número possível de valores em um símbolo é chamado de chips. De acordo com Matondang (2018), o tempo necessário para enviar um símbolo é descrito pela equação logo abaixo, que depende tanto do fator de espalhamento (SF) quanto da largura de banda (BW).

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (31)$$

Para Matondang (2018), a largura de banda se trata da largura do espectro do sinal transmitido em Hertz, podendo também aparecer com a unidade chips por segundo ao invés de Hertz. Essa configuração da largura de banda, afeta diretamente a duração de tempo de cada chip, que é contido no símbolo, assim como visto na equação (31) acima. A duração de cada chip é definida de acordo com a equação (32) abaixo.

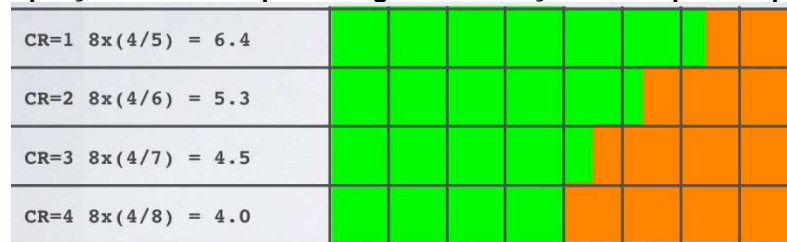
$$\text{Duração Chip} = \frac{1}{BW} \left[\frac{s}{\text{chip}} \right] \quad (32)$$

Segundo Mobilefish(2018), a comunicação LoRa utiliza os seguintes valores padrões de largura de banda: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz (algum dos valores podem não ser permitidos dependendo da região). Entretanto, para os dispositivos de comunicação LoRa disponíveis no mercado, a largura de banda que vem configurada como padrão é de 125 kHz. Usualmente se utiliza um valor fixo para a largura de banda, modificando-se o valor do fator de espalhamento dependendo da situação.

Já no caso da taxa de código (CR), de acordo com Matondang (2018), se trata da proporção de bits enviada que realmente carregam os dados desejados e o restante é utilizado para verificação e correção de erros. Por exemplo, em uma transmissão com um fator de espalhamento igual a 8, serão transmitidos 8 bits e, dependendo do valor da taxa de código, uma certa parte será alocada para bits de correção.

A Figura 58 logo abaixo ilustra o exemplo supramencionado para os valores de taxa de código disponíveis para a comunicação LoRa, onde a parte verde representa os bits preenchidos com a informação que se deseja enviar e a parte laranja representa os bits com dados utilizados para verificação e correção de erros.

Figura 58 – Proporção entre bits que carregam informação e bits que são para verificação



Fonte: Mobilefish(2018)

2.10.5 Parâmetros de recepção

Para verificar a qualidade do sinal recebido pelo outro dispositivo, é analisada a relação entre o sinal e ruído (SNR), o indicador de força do sinal recebido (RSSI) e a taxa de erros de pacotes (PER).

Segundo Mobilefish(2018), a relação sinal-ruído (SNR), assim como o próprio nome indica, se trata de uma comparação entre a potência do sinal recebido e a potência do ruído de fundo. Geralmente é medido em decibéis (dB), e, quanto maior seu valor, maior o indicativo de que o sinal está bom e sem interferência de ruídos. Logo abaixo, consta a equação para realizar este cálculo, entretanto, para o caso da biblioteca LoRa, existe uma fórmula que retorna o valor do SNR aproximado no recebimento de um pacote.

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{Sinal}{Ruído} \right) \quad (33)$$

Já para o caso do Indicador de força do sinal recebido (RSSI), Mobilefish explica que se trata de uma estimativa do quanto o dispositivo consegue detectar um sinal transmitido, sendo esta estimativa um valor de potência em miliwatts que é medida em dBm. De acordo com Semtech (2020), o valor medido do RSSI para o dispositivo utilizado basicamente varia de 0 até -127 dBm, onde quanto maior o

valor, ou seja, mais perto de zero, mais forte é a intensidade e melhor é a qualidade do sinal recebido.

Para Mobilefish (2018), o valor do RSSI pode mudar devido ao aumento da distância entre os dispositivos, mudança no fator de espalhamento e potência de transmissão. Caso o valor do RSSI esteja em um valor menor ou próximo de -120 dBm, o sinal é considerado um sinal fraco, enquanto que, caso esteja em um valor maior ou próximo de -30 dBm, é considerado como sendo um sinal forte.

Por último, têm-se a medida da taxa de erro de pacotes (PER), que, de acordo com Test And Measurement World (2021), se trata da relação entre pacotes perdidos e pacotes enviados, sendo esse indicativo um dos mais importantes, pois é com ele que é possível descobrir o quão sério seria uma incorreta configuração dos parâmetros de transmissão. A equação (34) abaixo ilustra o cálculo da taxa de erro de pacotes.

$$PER = \frac{\text{Pacotes perdidos}}{\text{Pacotes enviados}} \quad (34)$$

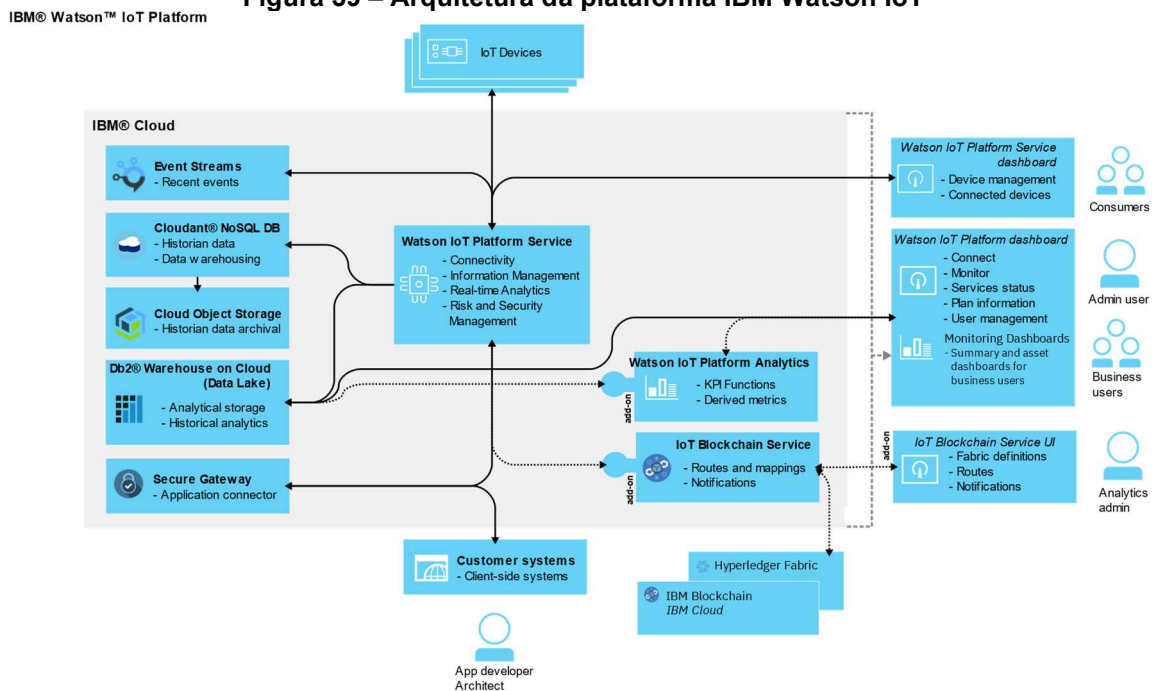
2.11 Plataforma IBM Watson IoT

De acordo com IBM (2021), a plataforma oferece um conjunto de serviços da IBM *Cloud* como sendo um único *software* como serviço (SaaS), sendo gerenciado pela própria IBM que permite coletar e analisar dados de desempenho, uso e eficácia para os dispositivos habilitados para IoT. Além disso, IBM (2021) comenta que a plataforma é uma oferta de serviço em nuvem totalmente gerenciada de ponta a ponta que consegue integrar um conjunto de serviços pré-selecionados para formar uma solução SaaS pública e multilocatária na estrutura de nuvem IBM.

O termo utilizado para arquitetura multilocatária, segundo Salesforce (2013), se trata de um espaço onde todos usuários compartilham a mesma infraestrutura e versão da plataforma, onde, neste caso, atualizações são feitas automaticamente para todos os usuários.

A Figura 59 abaixo ilustra a arquitetura da plataforma IBM Watson IoT, onde o *gateway* corresponde ao bloco IoT *Devices*.

Figura 59 – Arquitetura da plataforma IBM Watson IoT



Fonte: IBM (2021)

Apesar de várias ferramentas disponíveis na plataforma necessitarem algum tipo de adesão de plano, algumas delas são possíveis de se configurar e utilizar mesmo sem pagar, entretanto, existem algumas limitações. Nas ferramentas desenvolvidas neste projeto, as limitações mais impactantes estão no número de conexões de dispositivos e na velocidade de envio. As tabelas comparativas dos planos estão presentes no Anexo B retirados de IBM (2021).

2.12 Node-Red

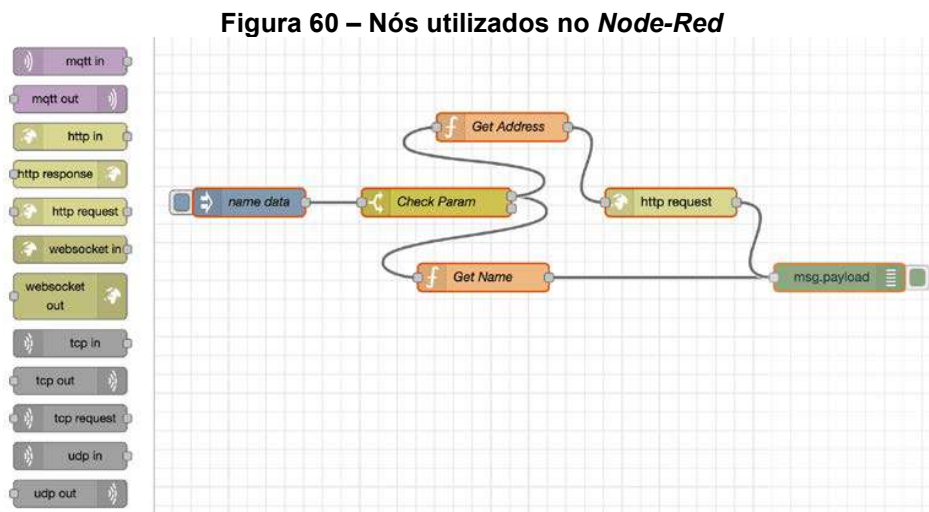
Segundo Hagino (2021), *Node-Red* se trata de uma ferramenta baseada na programação de fluxo, tendo sido desenvolvida pela IBM, entretanto, atualmente, está aos cuidados da *OpenJS Foundation*. Ainda de acordo com Hagino (2021), por se tratar de um ambiente virtual que combina diferentes dispositivos, interface de programação de aplicação (API) e serviços online em um navegador, consegue fornecer as seguintes características: Interface de usuário em navegador; funcionalidade com a linguagem Node.js e consequente leveza; possibilidade de inclusão da função em um nó; possibilidade de criar seus próprios nós com o código desejado e fácil acesso aos serviços da *IBM Cloud*.

Na concepção de Hagino (2021), o *Node-Red* é adequado para a Internet das Coisas, levando em conta os três principais pontos:

- Possibilidade de rodar em dispositivos periféricos, como em um Raspberry, sendo assim ideal para manipulação de dados na camada do dispositivo;
- Possibilidade de rodar apenas na nuvem, dessa forma, garantindo facilidade para conectar a parte de armazenamento e a parte de processamento;
- Abrangência do uso do protocolo de comunicação, podendo ser tanto via MQTT como via HTTP, tornando-se assim, relativamente fácil de haver troca de dados entre os dispositivos físicos e o servidor na nuvem.

:

Na Figura 60 é ilustrado alguns dos nós utilizados para programar o ambiente virtual *Node-Red*.

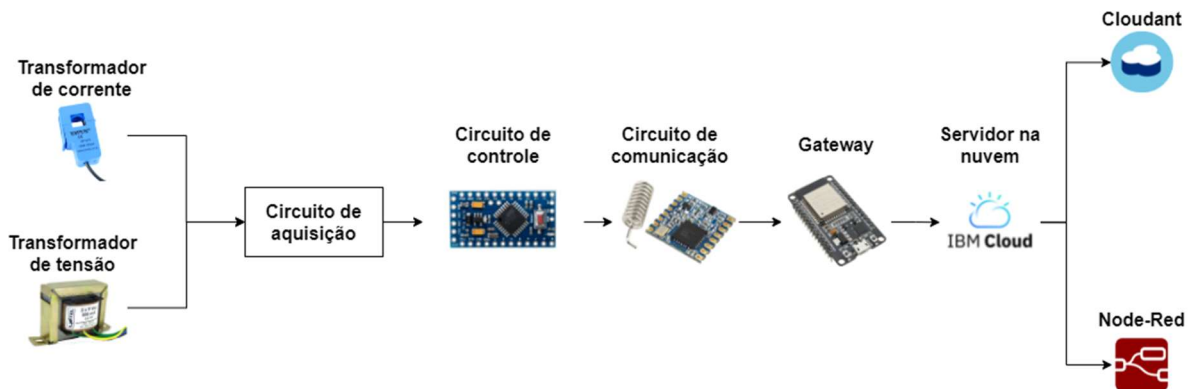


Fonte: Hagino (2021)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

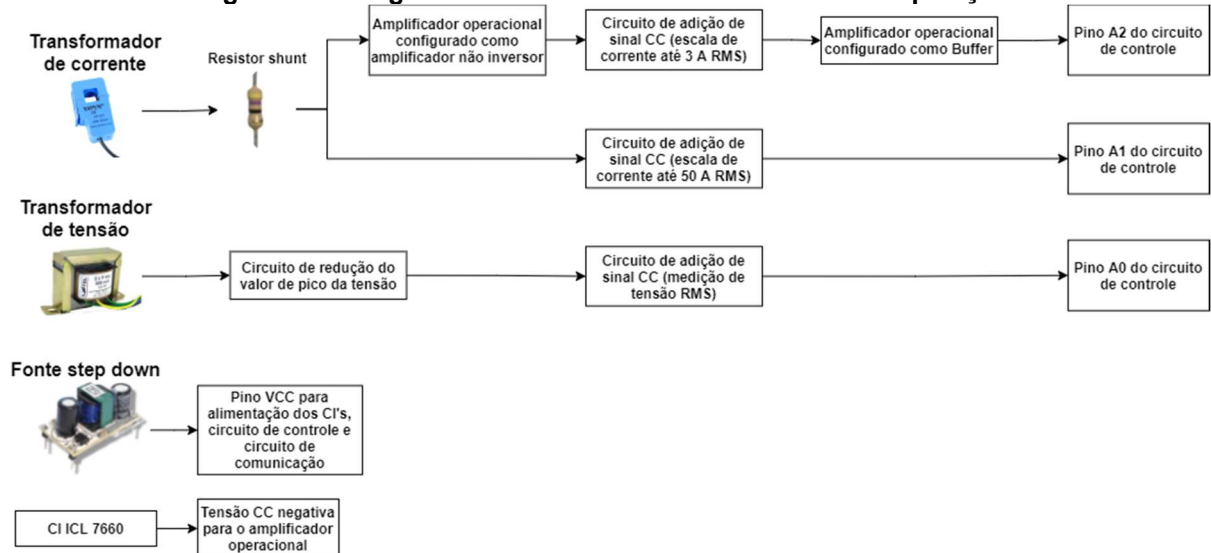
Nas subseções a seguir serão explicados os materiais e métodos utilizados durante o projeto. Na Figura 61 abaixo, está ilustrado o diagrama geral do projeto, enquanto que, na Figura 62, está ilustrado o diagrama do circuito de aquisição mais detalhado.

Figura 61 – Diagrama geral do projeto



Fonte: O Autor

Figura 62 – Diagrama melhor detalhado do circuito de aquisição



Fonte: O Autor

3.1 Transformador de corrente

Devido ao fato de haver possibilidade da corrente a ser medida ter um valor alto, fazendo com que, uma medição direta seja inviável devido ao custo de componentes adequados para a corrente, foi implementado no projeto um

transformador de corrente. Dessa forma, a medição de corrente adquirida pelo circuito de aquisição, se trata do sinal original após ter sido transformado.

A onda é medida com o uso do método do resistor *shunt* supramencionado na subseção 2.7.3.4., onde a equação (27) é utilizada para descobrir-se a corrente que passará pelo resistor *shunt*. A equação (35) logo abaixo ilustra a mesma equação (27), entretanto, modificada para se calcular a resistência *shunt*, onde, V_{REF} se trata da tensão de pico máxima desejada sob o resistor e I_{Load} se trata da corrente máxima a ser medida no primário do transformador.

$$R_{shunt} = \frac{V_{REF} \times N}{I_{Load}} \quad (35)$$

O transformador utilizado no projeto possui uma razão entre o secundário e primário de 2000, ou seja, a corrente no secundário será igual à corrente no primário dividida por 2000. Considera-se que, como a corrente máxima na residência de teste não ultrapassa 50 A RMS, a corrente máxima exigida pelo circuito de aquisição será de no máximo 50 A RMS, dessa forma, o termo I_{Load} pode ser substituído por $50 \times \sqrt{2}$ e o termo N pelo valor 2000.

A tensão que se deseja medir no circuito de controle não pode ultrapassar o valor 3,6 V, sendo seu valor nominal 3,3 V, além disso, o valor não pode ter parte negativa, assim sendo, o resistor *shunt* será calculado de forma que a onda possua um valor de pico máximo de 1,65 V, quando o transformador é submetido a uma corrente de 50 A RMS. Dessa forma, posteriormente, adicionando-se um valor CC de 1,65 V ao sinal, foi obtida uma onda de valor máximo de 3,3 V e valor mínimo de 0 V, de forma que o circuito de controle consiga uma melhor relação sinal-ruído (SNR) e erro de quantização menor, pois engloba toda a faixa de leitura de tensão do circuito de controle, de 0 até 3,3 V.

Colocando-se na equação os dados de V_{REF} como sendo 3,3 V dividido por 2 (pois é desejado um valor de pico de 1,65 V) e a corrente máxima no primário como sendo 50 A RMS, têm-se que, o valor da resistência necessária para obter a onda desejada, é de aproximadamente 47 Ω , assim como mostrado na equação (36) abaixo.

$$R_{shunt} = \frac{3,3 \times 2000}{2 \times \sqrt{2} \times 50} \cong 47\Omega \quad (36)$$

3.2 Adição de sinal CC

Para adicionar um sinal CC à onda presente na saída dos transformadores de corrente e tensão, foi utilizado um circuito de acoplamento capacitivo juntamente com um divisor de tensão. Para calcular o valor do capacitor, considerando que os resistores seriam de $100\text{ k}\Omega$, foi utilizada a equação (37) abaixo, de forma que, a composição arranjada pelos resistores e capacitor, formassem um filtro passa alta para conseguir retirar a frequência do sinal CC (0 Hz). Assim sendo, calculou-se o capacitor de forma que permitisse a passagem de ondas senoidais com frequência maior que 10 Hz.

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 30 \times \frac{100k}{2}} \cong 106\text{ nF} \quad (37)$$

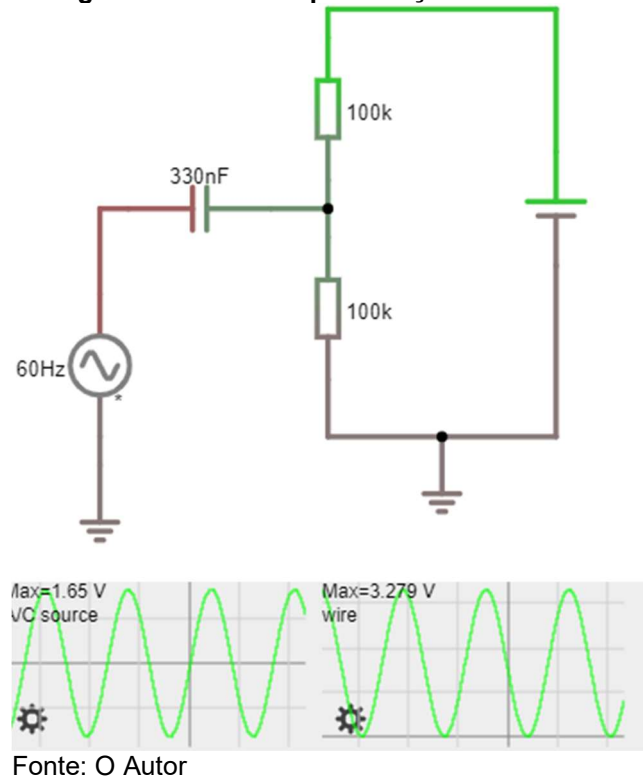
Na equação (37) acima, a resistência considerada foi igual a metade dos dois resistores, visto que a resistência equivalente na saída do capacitor, é igual a associação em paralelo dos dois resistores. Devido ao fato de não haver um capacitor com esse valor em mãos, foi utilizado o mais próximo de maior valor, correspondendo a um capacitor de 330 nF. Com esse capacitor, assim como mostrado na equação (38) abaixo, é possível filtrar as frequências menores que 10 Hz.

$$f = \frac{1}{2 \times \pi \times \frac{100k}{2} \times 330n} = 9,646 \cong 10 \quad (38)$$

A onda CA com frequência de 60 Hz irá passar pelo capacitor devido ao fato de possuir frequência maior que 10 Hz, dessa forma, a etapa da adição do valor de tensão CC será separada da fonte (saída do sensor), formando assim, um acoplamento capacitivo para a correta adição do sinal CC. A Figura 63 logo abaixo, ilustra o circuito utilizado, onde a onda verde do gráfico da esquerda, representa o

signal de tensão CA de entrada e a onda verde do gráfico da direita, representa a onda de tensão CA já com a adição do valor de tensão CC.

Figura 63 – Circuito para adição de sinal CC

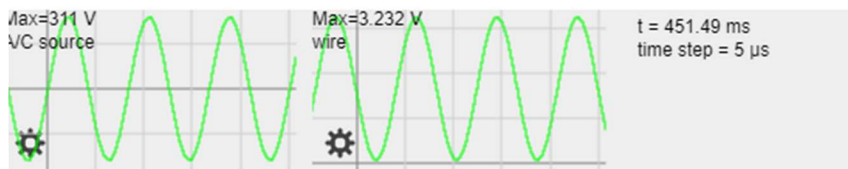
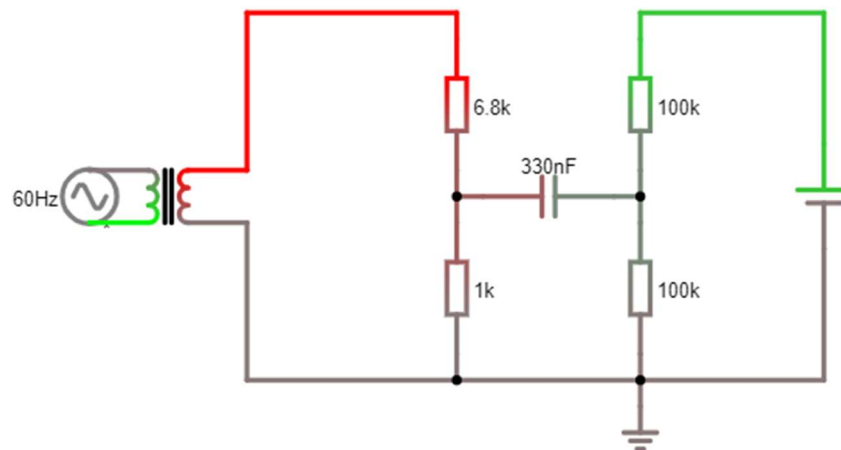


3.3 Redução do valor de pico da tensão

Antes do método final utilizado no projeto para medição da tensão da rede, foi utilizado um sensor de tensão. No Apêndice A está contido a descrição acerca deste método.

Para o projeto final, foi utilizado um transformador para reduzir a tensão de 220 V RMS da residência para 9 V RMS no secundário do transformador e, após passar por um divisor de tensão e adicionar o valor de tensão CC, o sinal que chega ao circuito de controle, quando o transformador é submetido a uma tensão senoidal de 220 V RMS, é uma onda senoidal de 0,0825 a 3,2175 V de pico. A Figura 64 abaixo ilustra o circuito utilizado para modificar a onda de 220 V RMS para poder ser analisada pelo circuito de controle, onde na parte dos gráficos, o gráfico da esquerda indica a tensão de entrada e o da direita o sinal que é lido pelo circuito de controle.

Figura 64 – Circuito utilizado para condicionar o sinal de tensão



Fonte: O Autor

O modelo do transformador de tensão utilizado para o projeto final está ilustrado na Figura 36 contida na subseção 2.6.2.

3.4 Circuito de aquisição

Foram montadas no total três versões do circuito de aquisição, onde as duas primeiras foram substituídas pela versão final. No Apêndice A, está contido as duas versões anteriores do circuito de aquisição, explicando o motivo para seus respectivos descartes.

Para o circuito final, foram utilizados os sinais da saída do transformador de corrente e do transformador de tensão, após as devidas operações para que o sinal possa ser corretamente medido sem prejudicar a segurança do circuito de controle com sinais negativos. O fator de potência é calculado através da relação de potências, onde o fator de potência é descoberto pela equação (18), dessa forma, ao contrário dos circuitos anteriores mencionados no Apêndice A, onde o fator de potência é calculado através da diferença do tempo, neste circuito de aquisição, o fator de potência é calculado através da equação da relação de potências, onde a

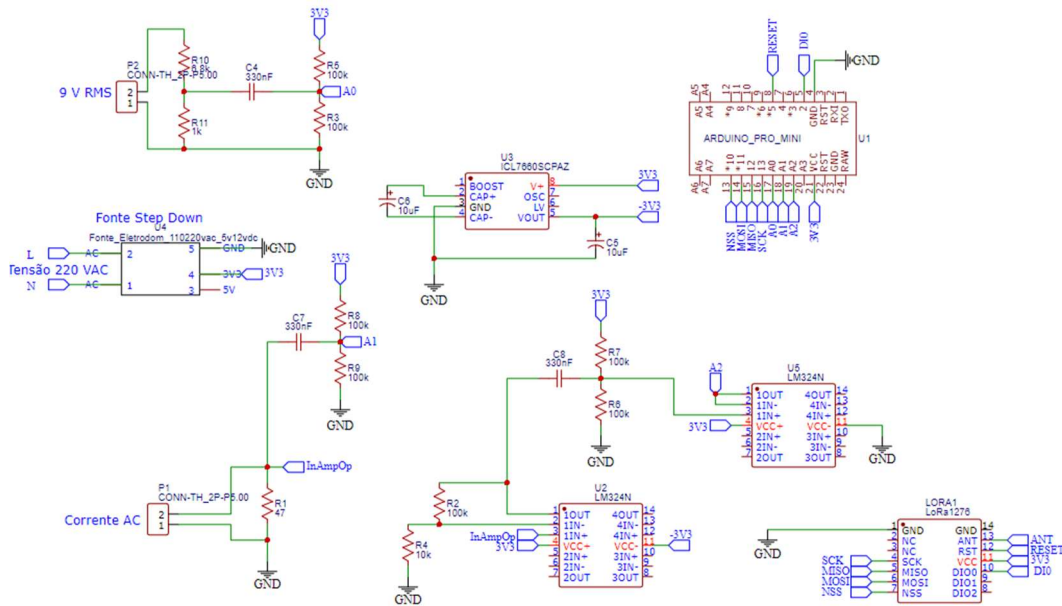
potência real se trata da potência instantânea e a potência aparente se trata do produto entre V_{RMS} e I_{RMS} .

No circuito de medição final, foram feitas duas escalas para medição da corrente, onde a primeira escala permite a medição máxima de 50 A. Essa configuração foi montada de forma que a saída do sensor de corrente é conectada ao resistor *shunt*, sendo então conectado ao circuito de adição de sinal CC, abordado na subseção 3.2, que, posteriormente, envia o sinal ao pino A1 do circuito de controle.

Já a segunda escala de medição de corrente elétrica, permite a medição de correntes de menor valor, variando de 0 até aproximadamente 3 A. Sua montagem foi feita de forma que o sinal do sensor de corrente é conectado ao resistor *shunt* e, posteriormente, é feita a conexão na entrada de um amplificador operacional na configuração amplificador não inversor, onde o CI é alimentado com tensões de 3,3 e -3,3 V. Na saída do amplificador, é obtido o sinal amplificado em aproximadamente 11 vezes, que é prontamente filtrado e feita a adição do sinal CC, conforme visto na subseção 3.2. Entretanto, para garantir que não haja um valor negativo no sinal, que possa, de alguma maneira afetar o circuito de controle, foi colocado um amplificador operacional na configuração buffer antes do circuito de controle, com alimentações de 3,3 e 0 V, dessa forma, apenas o sinal positivo estará presente na saída, sendo então, conectado ao pino A2 do circuito de controle.

O circuito de aquisição final montado para realizar as medições está sendo ilustrado na Figura 65.

Figura 65 – Circuito de aquisição montado



Fonte: O Autor

3.5 Códigos utilizados no circuito de controle

Para o circuito de controle, foram criadas três funções principais, a função *void medicoes()*, que é utilizada para realizar as médias das variáveis da rede elétrica onde o circuito de medição é instalado, a função *String criaPayload()*, utilizada para criar a mensagem a ser enviada para o *gateway* e a função *void sendPacket()*, utilizada para realizar o envio das médias já calculadas e organizadas em uma mensagem.

3.5.1 Função para cálculo das medições

Para medir a tensão e corrente com o circuito de controle, utilizou-se a biblioteca *EmonLib.h*, onde se analisa a onda da tensão e corrente CA, sem prévia transformação em onda quadrada como no caso das versões anteriores mencionadas no Apêndice B.

A função *void medicoes()* foi utilizada para calcular a medição das variáveis tensão elétrica, corrente elétrica, potência aparente, potência ativa e fator de potência da rede da residência. As medições são feitas durante um período configurável, sendo utilizado 60 segundos como padrão, onde então realiza-se um somatório dos valores de tensão, corrente, potência ativa, potência aparente e fator

de potência. Passado o tempo configurado, todas as variáveis que armazenam os valores dos somatórios são divididos pelo número de medidas realizadas durante o tempo transcorrido, sendo então, chamada a função *void sendPacket()* para envio das médias via protocolo LoRa.

Após executar a função *sendPacket()*, todas as variáveis que até então armazenavam os somatórios, bem como a variável contador, são limpas para que um novo ciclo seja executado. A descrição da função *void medicoes()* está presente no Apêndice B.

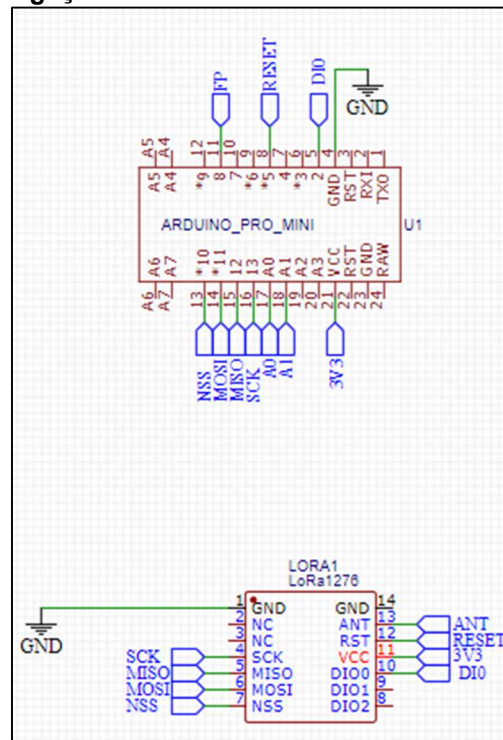
3.5.2 Funções para criar e enviar mensagem ao *Gateway*

Para realizar a comunicação LoRa, tanto para o dispositivo de medição quanto para o *gateway*, foram utilizadas placas do modelo SX1276, operando na faixa de frequência de 915 MHz. O circuito de ligação do dispositivo LoRa com o circuito de controle, bem como a tabela de conexões feitas, estão ilustrados na Figura 66 e Tabela 4, respectivamente.

A função *void sendPacket()* foi utilizada para enviar os dados já calculados pela função *void medicoes()* mencionada na subseção 3.5.1. A função *void sendPacket()*, ao ser chamada, realiza a chamada da função *String criaPayload()*, que, como o nome já diz, possui a finalidade de criar a mensagem que será enviada ao *Gateway*. A mensagem é então organizada de maneira que os dados sejam enviados de acordo com a ordem: Tensão elétrica, corrente elétrica, fator de potência, potência ativa, potência aparente, contador e identificador do dispositivo, sendo os valores separados pelo caractere "|".

Ambas as funções *void sendPacket()* e *String criaPayload()*, estão presentes no Apêndice C.

Figura 66 – Ligações entre o circuito de controle e a placa LoRa



Fonte: O Autor

Tabela 4 – Ligações entre a placa LoRa SX1276 e o Arduino

LoRa	Arduino
GND	GND
SCK	13
MISO	12
MOSI	11
NSS	10
RESET	5
3V3	VCC
DIO	2

Fonte: O Autor

3.6 Códigos utilizados no Gateway

Para o Gateway, foram utilizadas três funções principais, a função *void receivePacket()*, que é utilizada para receber as mensagens enviadas pelos circuitos de medição, a função *void enviaMensagemIBM(String topico[], float valor[])*, utilizada para enviar a mensagem recebida pelo Gateway para o servidor da IBM Cloud e a função *void reconnect()*, utilizada refazer a conexão com o servidor da IBM Cloud, bem como com a internet, no caso de não ter conseguido enviar a mensagem.

3.6.1 Função para receber mensagens do circuito de medição

A função *void receivePacket()* foi utilizada para receber as mensagens enviadas pelos circuitos de medição. A função, ao ser chamada, verifica o tamanho da mensagem antes de receber suas informações, caso o tamanho for nulo, não executa nenhuma função. Já no caso de um tamanho não nulo, dá-se início à leitura da mensagem, armazenando o valor em um vetor, mas sempre verificando se há presença do caractere “[”.

Quando houver leitura do caractere, o índice do vetor será incrementado, dessa forma, o vetor que armazena a mensagem possui os valores separados em suas diferentes posições. Logo após, é feita uma conversão do vetor para garantir que todos os valores armazenados sejam do tipo *float* e o vetor, juntamente com um *array* de *String*, é passado como argumento para a chamada da função que realiza o envio da mensagem recebida do circuito de medição ao servidor da IBM *Cloud*.

A função *void receivePacket()* está presente no Apêndice D.

3.6.2 Função para realizar o envio para o servidor da IBM Cloud

A função *void enviaMensagemIBM(String topico[], float valor[])* foi utilizada para realizar o envio das mensagens recebidas dos circuitos de medição para o servidor da IBM *Cloud*. A função recebe como argumento um *array* do tipo *String* e do tipo *float*, com o uso desses argumentos é criado então o *payload* na formatação *JavaScript Object Notation* (JSON), de forma que, a mensagem enviada fique da seguinte forma: $\{d:\{\text{nome do tópico}[i]:\text{valor}[i]\}$ onde o caractere “i” representa a posição do *array*, dessa forma, a mensagem será preenchida com todos os valores contidos nos *arrays* passados como argumentos para a função.

Após isso, é criada uma mensagem que será recebida com o nome do tópico da mensagem enviada, sendo esse tópico igual a: *iot-2/evt/medidas/fmt/json*. O *payload* anteriormente criado, é então enviado para o servidor IBM *Cloud* com o tópico *medidas* e, caso ocorra falha no envio, é chamada a função *void reconnect()* para realizar a reconexão com o servidor e com a internet.

Ambas as funções *void enviaMensagemIBM(String topico[], float valor[])* e *void reconnect()*, estão presentes no Apêndice E.

3.7 Teste de distância

Para o teste de verificação da distância máxima de envio de mensagens via protocolo LoRa, foram utilizadas duas placas modelo SX1276, onde uma é conectada ao Arduino Pro Mini, operando como *sender*, e a outra, é conectada ao ESP32, operando como *receiver*. As mensagens são enviadas a cada um segundo e meio, sendo calculada a média aritmética ao completar dois minutos de envio.

A cada mensagem que o *receiver* recebe, é enviada uma mensagem com o mesmo conteúdo ao *sender*. O *sender*, por sua vez, ao receber uma mensagem do *receiver*, realiza uma comparação entre a mensagem recebida e a última mensagem enviada. Caso sejam iguais, é feita uma incrementação no contador de mensagens recebidas, caso contrário, a mensagem recebida não será contabilizada.

Ao receber uma mensagem, o *sender* realiza a somatória do RSSI e SNR da mensagem recebida e, ao final do período de dois minutos, são calculadas e exibidas suas respectivas médias, junto com a informação da taxa de erro de pacotes (PER) e da quantidade de mensagens recebidas e enviadas.

O Apêndice G mostra o código implementado no *sender*, enquanto que, o Apêndice H exibe o código implementado no *receiver*.

3.8 Plataforma IBM

Para enviar dados ao servidor da IBM *Cloud*, foi primeiramente criado o serviço IBM Watson IoT Platform no site da própria IBM, para então cadastrar o tipo de dispositivo que se desejava conectar. No caso deste projeto, após criar o serviço, foi então cadastrado o tipo de dispositivo, sendo dado para este o nome de *testDispositive*. Foi cadastrado o dispositivo a ser utilizado como *gateway*, sendo o endereço (ID) do dispositivo cadastrado como CC3159BF713C, ID este correspondendo ao Endereço do Controle de Acesso de Mídia (MAC Address) do ESP32, utilizado como *Gateway*.

Ao cadastrar o tipo de dispositivo e o dispositivo em si, recebeu-se um token de segurança que foi armazenado para não se perder, pois é preciso para conectar ao servidor. Através do ESP32, configurando-o com as credenciais corretas e com o token recebido, foi possível então conectar à plataforma criada, por meio do serviço IBM Watson IoT *Platform*.

Na Figura 67 está ilustrado a plataforma após ter sido configurada com o tipo de dispositivo, além do cadastro do *gateway*. Apesar de já conseguir enviar os dados para a plataforma, eles ainda não são armazenados, dessa forma, apesar de ser possível visualizar os dados recebidos em tempo real na ferramenta *Boards* do serviço, não se consegue ter acesso aos dados que foram recebidos antes da página do serviço ter sido aberta. Na próxima subseção, será abordado sobre como foi feita a configuração do serviço *Node-Red*, essencial para posteriormente configurar o serviço que irá realizar o armazenamento dos dados.

Figura 67 – Plataforma da IBM Watson IoT

Device ID	Status	Device Type	Class ID	Date Added
CC3159BF713C	Disconnected	testDispositive	Device	13 Apr 2021 18:51

Identity	Device Information	Recent Events	State	Logs
Device ID	CC3159BF713C			
Device Type	testDispositive			
Date Added	13 Apr 2021 18:51			
Added By	dbleonhardt@gmail.com			
Connection Status	Disconnected			
	Last Connected: 15 Apr 2021 18:59			
	Client Address: 186.225.225.99 Insecure			
	Duration: an hour			
	Data Transferred: 141.5 KB			

Fonte: IBM¹⁰

3.9 Interface Node-Red

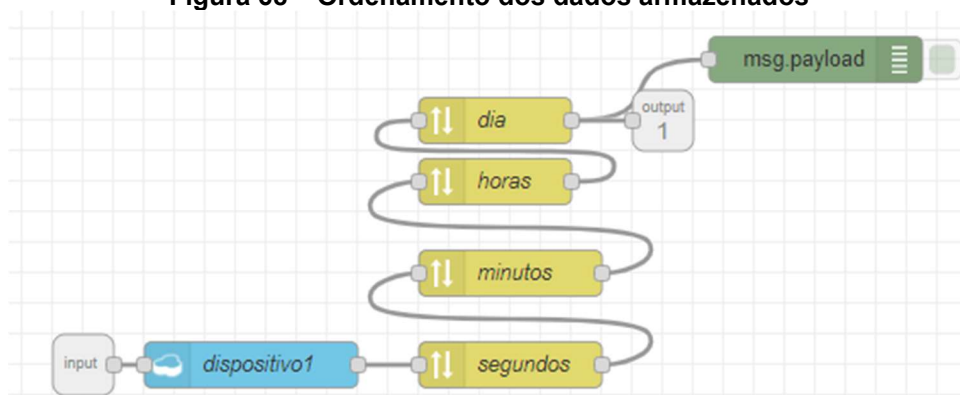
Com o auxílio deste serviço, conseguiu-se utilizar os dados enviados ao serviço IBM Watson IoT *Platform* em tempo real, mostrando-os ao usuário por meio de gráficos e outras ferramentas. Além disso, foi possível também armazenar os dados com o uso da ferramenta *Cloudant*, podendo alterá-los antes ou após armazenar conforme necessidade.

Para utilizar os dados recebidos, foram criadas funções para que as mensagens do tipo JSON recebidas do *Gateway* possam ser separadas em variáveis para utilização em funções posteriores. O código ilustrado no Apêndice F, sob o nome de Função 1 - Separação de variável, exemplifica como foi feita a função para realizar a separação dos valores contidos na mensagem JSON.

¹⁰ Disponível em: <https://cloud.ibm.com>. Acesso em ago. 2021.

Ainda ilustrado no Apêndice F, mas sob o nome de Função 2 – Adição de variáveis de tempo à mensagem, é ilustrado o código utilizado para adicionar à mensagem JSON recebida do *gateway*, os valores do horário atual, valores estes variando de segundos até o ano que a mensagem foi recebida. Para realizar o ordenamento dos dados previamente armazenados no *database*, foram utilizados os “nós” ilustrados na Figura 68 abaixo, de forma que, as mensagens sejam organizadas de acordo com o horário em que são recebidas pelo servidor da IBM *Cloud*.

Figura 68 – Ordenamento dos dados armazenados



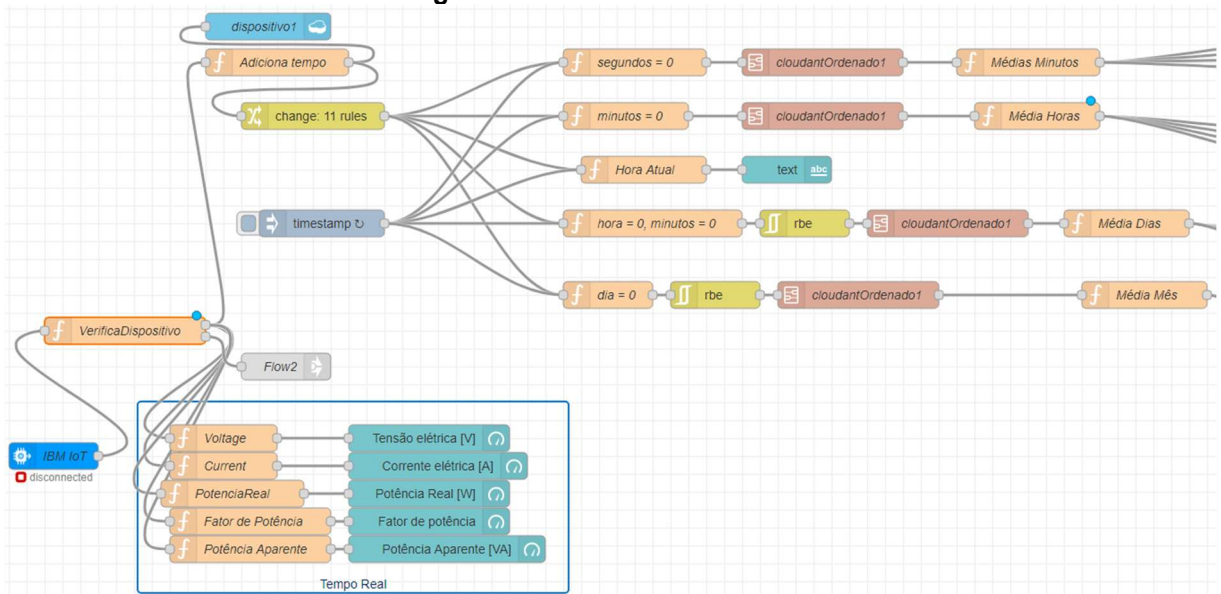
Fonte: IBM¹¹

Já a Função 3 – Cálculo da média diária, também presente no Apêndice F, se trata do código utilizado para realizar a média diária das mensagens enviadas durante o período de 24 horas, onde, a mesma lógica foi aplicada para realizar a média a cada 5 minutos, a cada hora e também para a média mensal.

Na Figura 69 abaixo, é possível visualizar o ambiente 1 onde foi feita a lógica de programação em *.java* para receber os dados, adicionar o tempo do servidor, e, calcular suas respectivas médias, onde, o “nó” média dias corresponde à Função 4 presente no Apêndice F. Já na Figura 70, é possível ver o grupo de blocos utilizados para exibir os dados em tempo real no formato de medidores para o usuário.

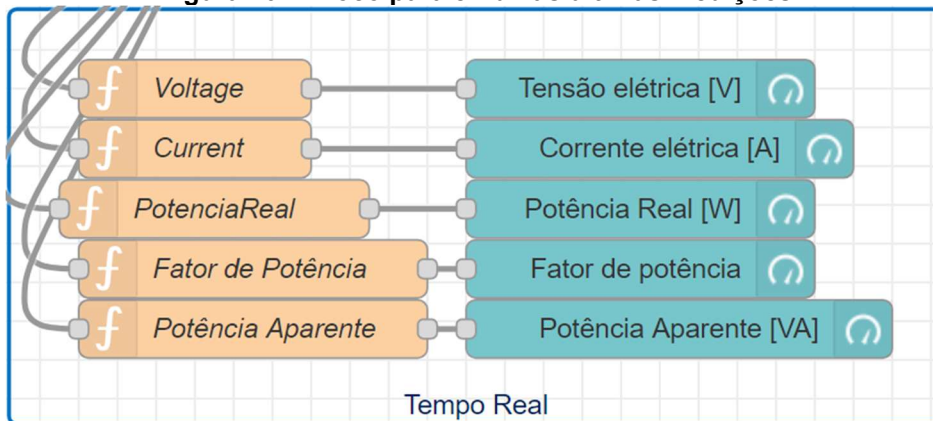
¹¹ Disponível em: <https://cloud.ibm.com>. Acesso em ago. 2021.

Figura 69 – Ambiente Node-Red



Fonte: Node-Red (2021)

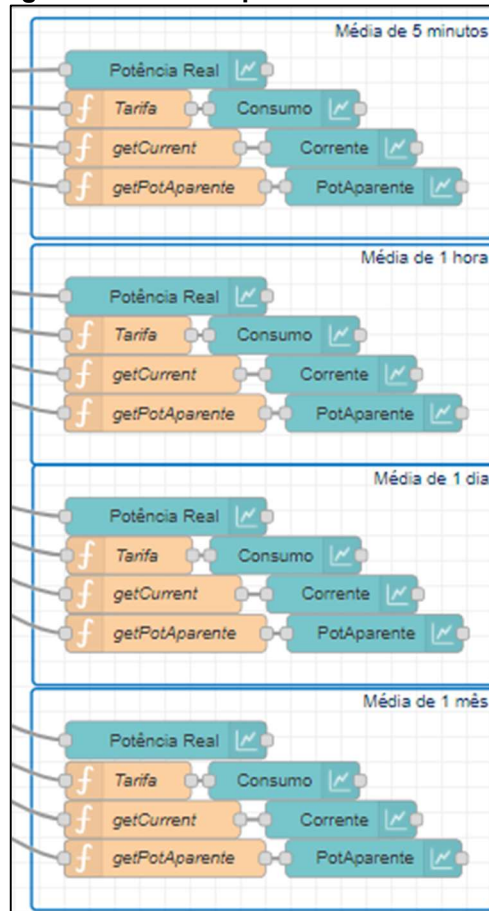
Figura 70 – Bloco para exibir as últimas medições



Fonte: Node-Red (2021)

A Figura 71 abaixo ilustra os blocos utilizados para calcular e exibir as médias de cinco minutos, uma hora, um dia e um mês ao usuário.

Figura 71 – Blocos para exibir as médias



Fonte: Node-Red (2021)

3.10 Armazenamento

Para o armazenamento, foram testados dois tipos diferentes de *databases*, primeiramente foi testado o *database SQL*, entretanto, não se conseguiu armazenar com sucesso as mensagens. Posteriormente, optou-se pelo *database cloudant* que é justamente para mensagens em formato JSON e com suporte à ferramenta *Node-Red*. Dessa forma, conseguiu-se fazer com que por meio de programação, dentro da ferramenta, houvesse o armazenamento de dados recebidos, assim como também a remoção de dados, podendo filtrá-los como for necessário.

Na Figura 72 abaixo, pode-se visualizar o *database* com algumas mensagens já recebidas, para executar um filtro dentro do *cloudant* deve-se criar um código definindo o índice para utilizar como ordenamento, além do modo de ordenamento, assim como pode-se ver na Figura 73 e Figura 74. Entretanto, antes disso, deve-se criar outro código na parte de índices do *cloudant* para que a variável

com que se deseja utilizar como índice, seja adequadamente reconhecida como índice, caso contrário, o armazenamento não irá reconhecer a variável como um índice válido. Na Figura 74 está presente o código feito para reconhecer a variável Contador como um índice.

Figura 72 – Mensagens previamente recebidas pelo Node-Red

id	key	value
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b7ec1	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b7ec1	{"rev": "1-c35df224c23b726d2983f22475..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b844f	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b844f	{"rev": "1-fa0102c3d31ce08a9cae168c131..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b8fb9	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b8fb9	{"rev": "1-b57dabe0ad3f1bdc84e1ffe3b6e7..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b9c79	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1b9c79	{"rev": "1-8d6e17adf640300214820b4d06..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1ba42d	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1ba42d	{"rev": "1-12c93bb4c94b1afa5fb443e15344..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bac9	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bac9	{"rev": "1-1a2f98011e074439dd7a4898c..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bb70a	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bb70a	{"rev": "1-d250ae1fa213fb2a24c2080042f..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bb855	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bb855	{"rev": "1-ada4a6db5645ba9aeb8d4aed71d..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bc263	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bc263	{"rev": "1-88e4ecd28bb875f5e97acce75e..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bcb8	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bcb8	{"rev": "1-c4473c1b336f2ceda861202d90..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bdb88	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bdb88	{"rev": "1-2080039410f46a77eddab3190d..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1be763	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1be763	{"rev": "1-b9b29749e9d0807d5b87543e49..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1beb02	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1beb02	{"rev": "1-09195d1949160577210ec6a895..."}
036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bf46d	036edfe1da8786a6e1fec91b9b1bf46d	{"rev": "1-bf9065c49d16ee27541e974d52..."}

Fonte: IBM¹²

Figura 73 - Seleção do modo de ordenamento

```

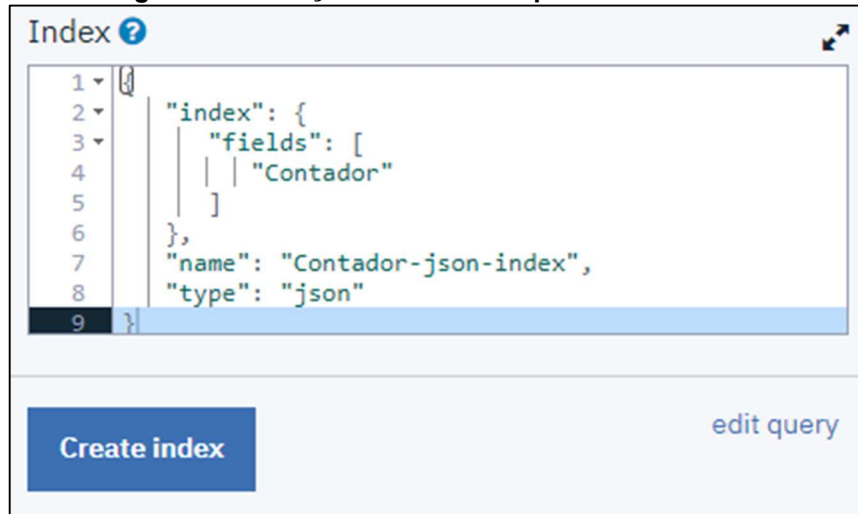
1 {
2   "selector": {
3     "id": {
4       "$gt": "0"
5     }
6   },
7   "fields": [
8     "Contador",
9     "Voltage",
10    "Current",
11    "FatorDePotencia"
12  ],
13  "sort": [
14    {
15      "Contador": "asc"
16    }
17  ]
18 }
    
```

Fonte: IBM¹³

¹² Disponível em: <https://cloud.ibm.com>. Acesso em ago. 2021.

¹³ Disponível em: <https://cloud.ibm.com>. Acesso em ago. 2021.

Figura 74 – Criação de um índice para ordenamento



Fonte: IBM¹⁴

Apesar de existir esta maneira de executar um filtro no database, com o uso do serviço *Node-Red*, o ordenamento pode ser feito diretamente, assim como supramencionado na subseção 3.9, sem haver necessidade de entrar na página do *database*. É necessário, apenas, criar e configurar uma pasta separada no *cloudant* para as mensagens recebidas pelo *Node-Red*, onde a parte de manipulação pode ser feita diretamente por código no *Node-Red*.

3.11 Teste com dois circuitos medidores

Este teste foi realizado com o intuito de verificar se haveria algum tipo de conflito em mandar mensagens ao servidor com dois transmissores, de forma que o servidor consiga armazenar as mensagens de cada transmissor em diferentes *databases*. Para realizar a diferenciação entre os dois medidores, foi adicionada uma variável ao final da mensagem, que para facilitar, foi definida por meio de um número inteiro. O primeiro medidor envia a mensagem com o campo final contendo o número 1, enquanto que, o segundo transmissor envia a mensagem com o campo final contendo o número 2.

Devido ao fato de o teste possuir como principal objetivo encontrar uma possível falha na comunicação conjunta entre os três dispositivos, para o segundo circuito medidor foi somente implementado o circuito de controle juntamente com o

¹⁴ Disponível em: <https://cloud.ibm.com>. Acesso em ago. 2021.

circuito de comunicação, onde é enviada uma mensagem com dados randômicos ao servidor.

O *gateway*, ao receber a mensagem do circuito de medição principal, executa a tarefa de publicar no servidor da IBM Cloud que, por sua vez, irá armazenar a mensagem no *database* correspondente ao número final contido na mensagem recebida. Logo após enviar a mensagem ao servidor, o *gateway* envia uma mensagem com o valor 7548 ao circuito de controle em conjunto com o circuito de comunicação, que, por sua vez, ao receber a mensagem e verificar seu valor, irá efetuar o envio de seus dados gerados em formato de mensagem ao *gateway*, que posteriormente envia a mensagem ao servidor da IBM Cloud novamente.

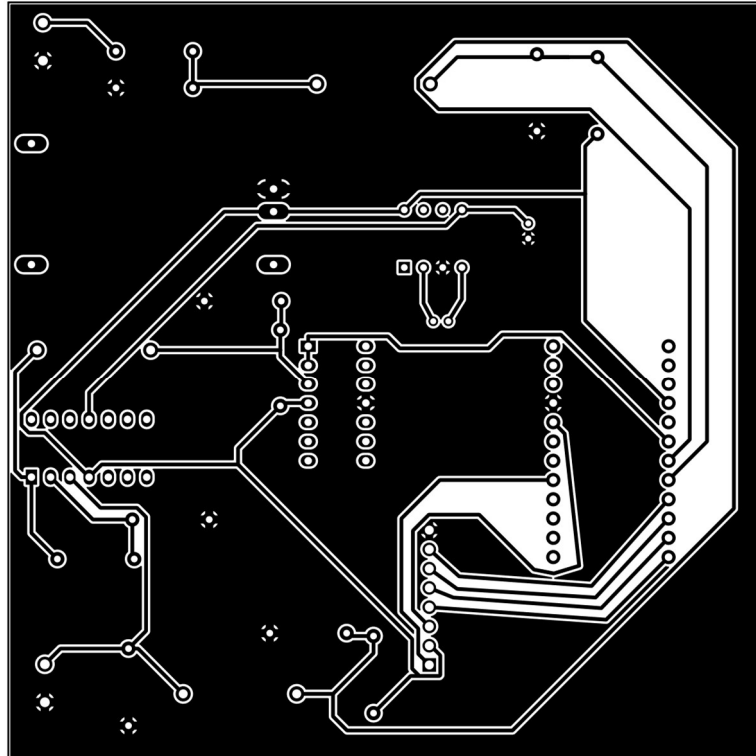
O servidor da IBM Cloud, quando recebe uma mensagem do medidor, realiza uma verificação do identificador final da mensagem, onde, se for igual ao número 1, armazena e exibe os dados da mensagem na aba referente ao circuito de medição 1, enquanto que, se for igual ao número 2, armazena e exibe os dados da mensagem na aba referente ao circuito de medição 2.

O Apêndice I possui o código implementado no circuito de controle em conjunto com o circuito de comunicação, atuando como um circuito de medição para realização de testes na comunicação via protocolo LoRa e MQTT.

3.12 Confeção da placa de circuito impresso

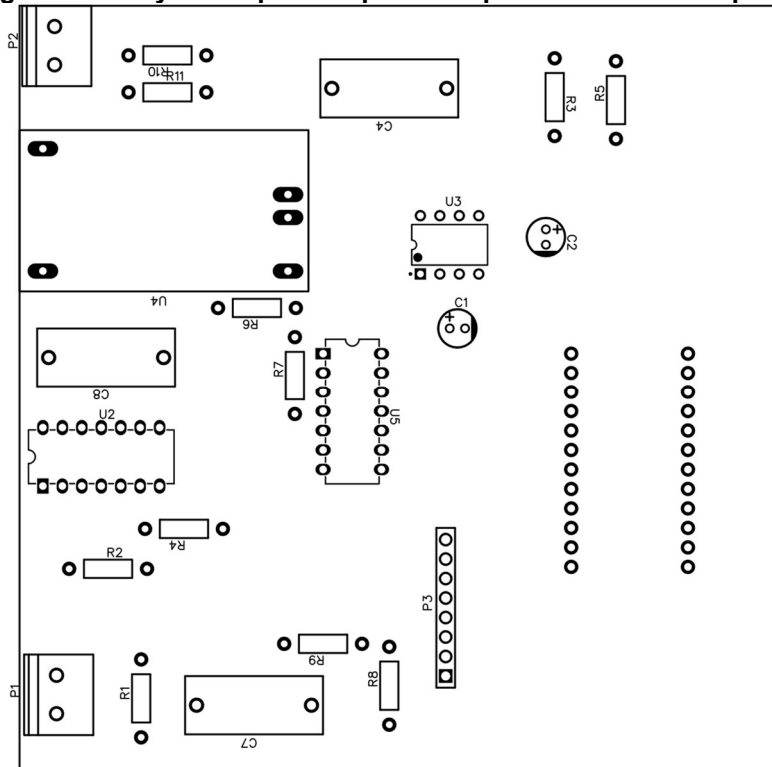
A placa do circuito de medição está ilustrada na Figura 65 da subseção 3.4, enquanto que, o layout da placa de circuito impresso a ser confeccionada, com pinos para conexão do circuito de comunicação, está ilustrado na Figura 75, Figura 76 e Figura 77. Onde a Figura 75, ilustra o layout da parte de baixo da placa, contendo as trilhas de cobre, a Figura 76, ilustra a parte superior contendo o layout de alguns componentes e a Figura 77, ilustra o modelo 3d do projeto de como ficaria montada.

Figura 75 – Layout da parte inferior da placa de circuito impresso



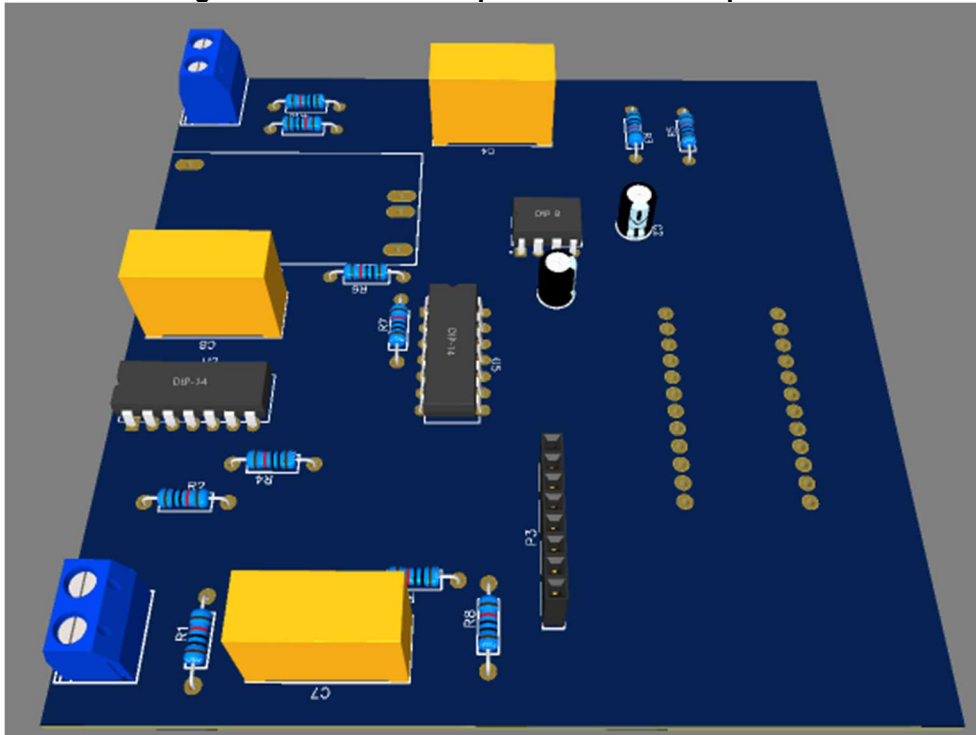
Fonte: O Autor

Figura 76 – Layout da parte superior da placa de circuito impresso



Fonte: O Autor

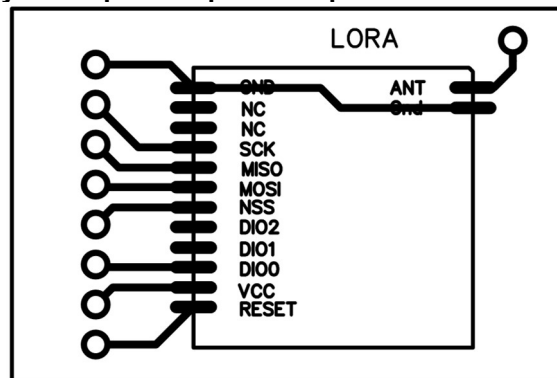
Figura 77 – Visão 3D da placa de circuito impresso



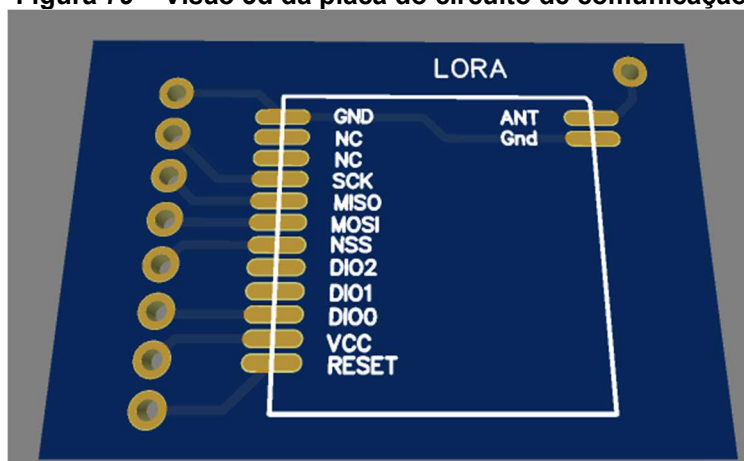
Fonte: O Autor

O layout da placa do circuito de comunicação está ilustrado na Figura 78 e Figura 79, onde a Figura 78 ilustra a parte superior da placa a ser confeccionada e a Figura 79 ilustra a placa em visão 3D.

Figura 78 – Layout da parte superior da placa do circuito de comunicação

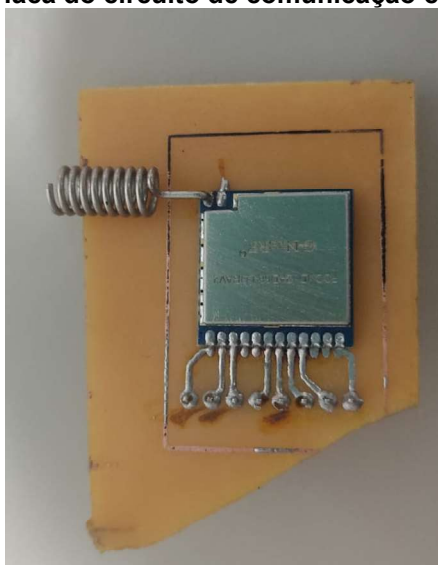


Fonte: O Autor

Figura 79 – Visão 3d da placa do circuito de comunicação

Fonte: O Autor

A Figura 80 abaixo ilustra a placa do circuito já confeccionada. A PCB do circuito de medição não foi confeccionada devido ao fato das trilhas não transferirem corretamente para o cobre, dessa forma, optou-se por manter o circuito de aquisição e de controle na protoboard.

Figura 80 – Placa do circuito de comunicação confeccionada

Fonte: O Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Verificação e ajuste

O ajuste do circuito de medição foi feito utilizando-se multímetros e/ou um osciloscópio, averiguando se o valor calculado pelo circuito de controle era próximo ou não do valor medido pelos equipamentos. Antes de ser utilizado o circuito de aquisição final, utilizou-se um sensor de tensão ZMPT101B, entretanto, para o cálculo do fator de potência, havia uma defasagem entre a onda da tensão e a onda da corrente mesmo para cargas puramente resistivas.

Esta diferença na defasagem deve-se ao fato de o sensor de tensão ser alimentado com uma tensão de 5 V DC, tendo em sua saída uma onda CA com um sinal DC de 2,5 V. Para realizar o ajuste da onda para uma melhor análise com o circuito de controle, deve-se passar por dois acoplamentos capacitivos, um para retirar o sinal DC de 2,5 V e o outro para adicionar o sinal DC de 1,65 V.

Dessa forma, o sinal de tensão possui mais reatância capacitiva do que o sinal de corrente, causando assim uma defasagem entre as ondas de tensão e corrente maior do que a esperada para a carga. Portanto, para o circuito de aquisição final, o sensor de tensão ZMPT101B foi trocado por um transformador de tensão. Os métodos utilizados para montar as versões anteriores do circuito de aquisição, bem como seus resultados, estão presentes no Apêndice A.

O multímetro utilizado para realizar as verificações e ajustes da corrente e tensão elétrica foi o multímetro de modelo MD-6120 da ICEL, não tendo sido efetuada sua calibração. A medição para uma tensão elétrica alternada de 220 V possui uma incerteza de aproximadamente $\pm 7,64$ V, enquanto que, para a medição de uma corrente elétrica alternada de 8 A, possui uma incerteza de aproximadamente $\pm 0,7$ A.

4.1.1 Tensão elétrica

O ajuste do valor da tensão elétrica prosseguiu de modo que, a medição da tensão elétrica era feita com o uso de um multímetro conectado à rede e, na programação do circuito de controle, era alterado o valor de ganho da tensão, de maneira que, o valor calculado ficasse o mais próximo possível do valor medido.

Este valor de ganho alterado, se trata do valor “220.2” presente na seguinte função: `medidor.voltage(A0, 200.2, 1.7)`;

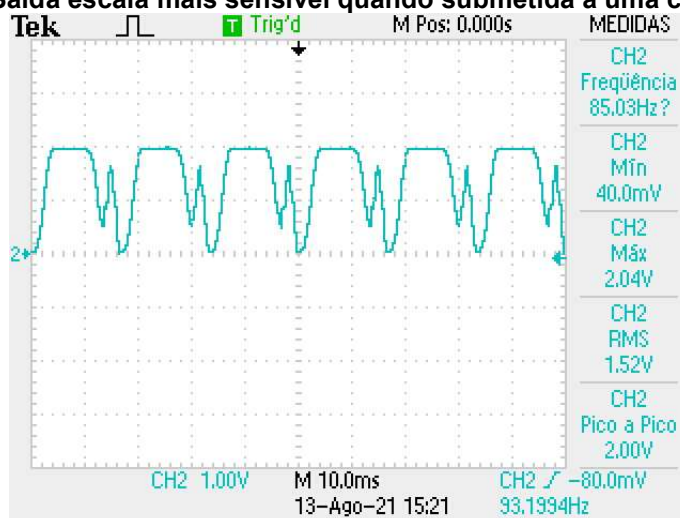
Após realizar as devidas modificações no valor do ganho, chegou-se ao valor de 220,2, conseguindo assim, obter valores calculados para a tensão de aproximadamente 225 V, mesma medida que foi mensurada no multímetro quando medida a tensão elétrica da rede do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Após isto, foi testado mais uma vez, mas na residência do Autor, onde observou-se uma medição de aproximadamente 215,3 V no multímetro, enquanto que, no circuito de controle, o valor de tensão elétrica calculado era de aproximadamente 215,2 V.

A função supramencionada implementada no circuito de controle, utilizada para realizar a medição da tensão elétrica, está presente na linha 34, no código presente no Apêndice B.

4.1.2 Corrente elétrica

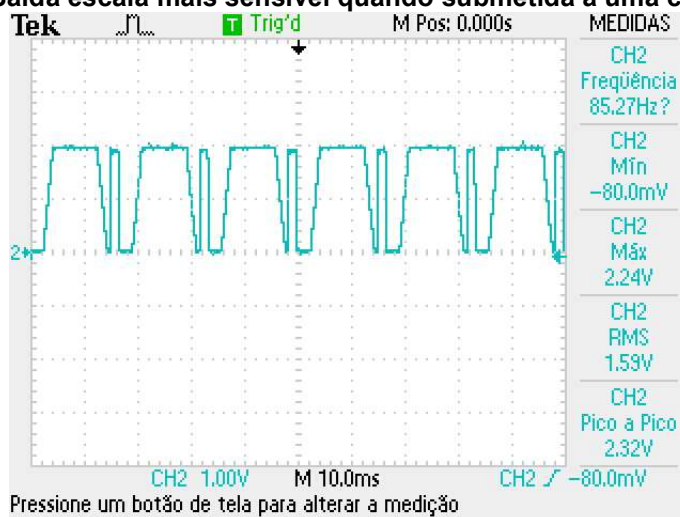
Foram construídas duas escalas para medir a corrente elétrica da residência, onde em uma delas é possível medir correntes pequenas, de até aproximadamente 3 A, e com a outra escala, sem amplificação, é possível medir correntes de até 50 A. Quando a escala para correntes menores é submetida a uma corrente superior, a saída do amplificador operacional fica saturada, assim como ilustrado na Figura 81 e Figura 82. A Figura 81 ilustra a onda de corrente da escala mais sensível quando submetida a um secador de cabelo no médio, consumindo aproximadamente 5,19 A, enquanto que, a Figura 82 ilustra a escala mais sensível quando submetida à carga de um secador de cabelo no máximo, que consome aproximadamente 8,46 A.

Figura 81 – Saída escala mais sensível quando submetida a uma carga de 5,19 A



Fonte: O Autor

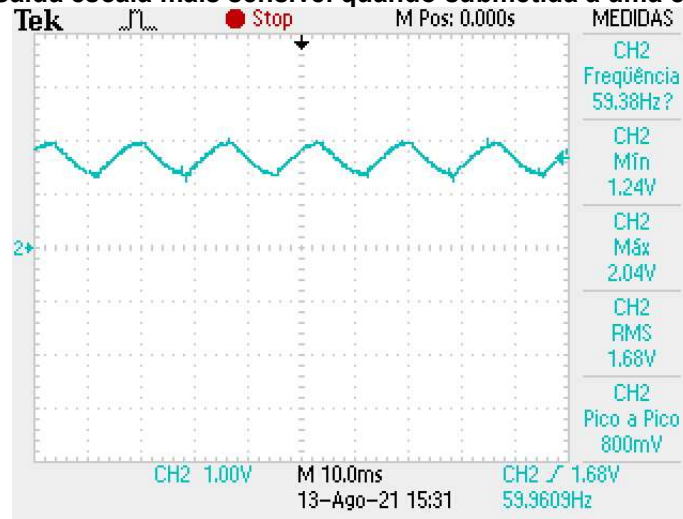
Figura 82 – Saída escala mais sensível quando submetida a uma carga de 8,46 A



Fonte: O Autor

A escala mais sensível foi ajustada com o uso de uma fritadeira elétrica com apenas seu ventilador ligado como carga, onde de acordo com o multímetro utilizado, correspondia a uma corrente de 0,25 A, dessa forma, o programa foi configurado de modo que a o cálculo da corrente para esta carga fosse igual a 0,25 A. A Figura 83 abaixo ilustra a onda de corrente na saída da escala mais sensível quando submetida à carga do ventilador interno da fritadeira elétrica.

Figura 83 – Saída escala mais sensível quando submetida a uma carga de 0,25 A



Fonte: O Autor

Para a escala maior, foi utilizado o mesmo método, de forma que a corrente da carga era medida diretamente na tomada para não haver interferências. Para seu ajuste, foi utilizado apenas o secador, entretanto, foi operado em duas velocidades diferentes. O programa foi configurado quando o secador era operado na velocidade máxima, onde a corrente medida no multímetro foi igual a 8,46 A.

Ao mudar a velocidade do secador, foi medida uma corrente de 5,19 A com o multímetro, enquanto que, no programa foi identificada uma corrente de aproximadamente 5,17 A.

4.1.3 Fator de potência

Para o fator de potência, foi feito primeiramente o ajuste da tensão e corrente elétrica, onde, após isso, era verificado o valor do fator de potência. Quando o circuito era submetido a uma carga de um secador de cabelo, quando operado com apenas metade de sua resistência ligada e seu ventilador no máximo, foi observado um fator de potência de aproximadamente 0,99. Já para o secador operando com a resistência de aquecimento ao máximo, bem como seu ventilador, foi constatado um fator de potência unitário.

Para os testes feitos em outros equipamentos puramente resistivos, como o chuveiro e o forno elétrico, também se constatou um fator de potência unitário. Os testes supramencionados foram realizados com correntes superiores a 3 A, logo, a escala de corrente utilizada para fazer a medição de corrente, foi a escala maior.

Quando utilizada como carga uma fritadeira elétrica, que era operada de modo que apenas seu ventilador fosse ligado, onde a corrente era medida com a escala de até 3 A, observou-se um fator de potência de aproximadamente 0,62.

4.2 Dados recebidos no servidor da IBM Cloud

Os dados medidos da residência são recebidos pelo servidor Cloud da IBM, onde são exibidos em forma de gráficos, tanto por meio de médias mensais, médias diárias, por hora, a cada 10 minutos e também exibindo a última mensagem recebida com seus respectivos dados.

4.2.1 Última mensagem recebida

Nesse campo, é mostrado ao usuário a última medição de dois minutos feita pelo circuito de medição, onde são exibidos os dados da potência real, potência aparente, tensão elétrica, corrente elétrica e fator de potência. Apesar de ser apenas uma mensagem que não foi realizada uma média no servidor, ainda assim, foi realizada uma média de dois minutos no circuito de controle, antes de ser propriamente enviada ao servidor da IBM Cloud. A Figura 84 abaixo está ilustrando como os dados são exibidos ao usuário quando se deseja visualizar a última mensagem.

Para os medidores ilustrados na Figura 84 abaixo, a tensão elétrica varia de 214 até 226 V RMS, assim como supramencionado na subseção 3.2, onde 3,2175 corresponde a uma tensão de aproximadamente 220 V RMS. Já para o caso do medidor de corrente elétrica, sua variação é de 0 até 50 A RMS, enquanto que, os medidores de potência real e potência aparente, variam de 0 até seu valor máximo possível, que corresponde ao produto da tensão máxima, corrente máxima e fator de potência unitário.

Figura 84 – Dados da última mensagem recebida



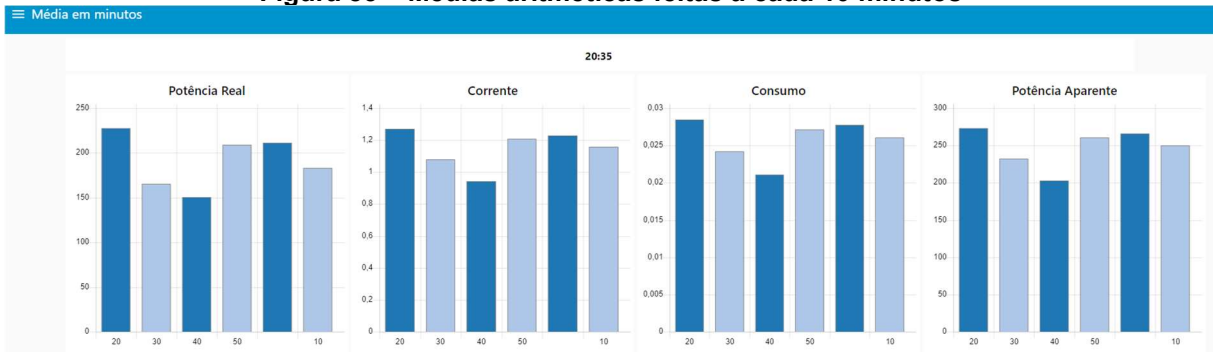
Fonte: O Autor

4.2.2 Média dos valores a cada 10 minutos

A cada 10 minutos é realizado a média dos valores recebidos, onde é realizada a média aritmética das mensagens recebidas nos últimos 10 minutos. A Figura 85 abaixo ilustra os valores representados na forma de gráficos de barras, onde o eixo x representa os minutos em que as médias foram realizadas e o eixo y os resultados das médias da respectiva variável.

Caso seja feita uma nova média aritmética que corresponda a um período já ilustrado no eixo x, a barra será simplesmente substituída pela nova média.

Figura 85 – Médias aritméticas feitas a cada 10 minutos



Fonte: O Autor

4.2.3 Média dos valores por hora

A cada hora é realizado a média dos valores recebidos, onde é realizada a média aritmética das mensagens recebidas nos últimos 60 minutos. A Figura 86

abaixo ilustra os valores representados na forma de gráficos de barras, onde o eixo x representa as horas em que as médias foram realizadas e o eixo y os resultados das médias da respectiva variável.

Caso seja feita uma nova média aritmética que corresponda a um período já ilustrado no eixo x, a barra será simplesmente substituída pela nova média.

Figura 86 – Médias aritméticas feitas a cada hora



Fonte: O Autor

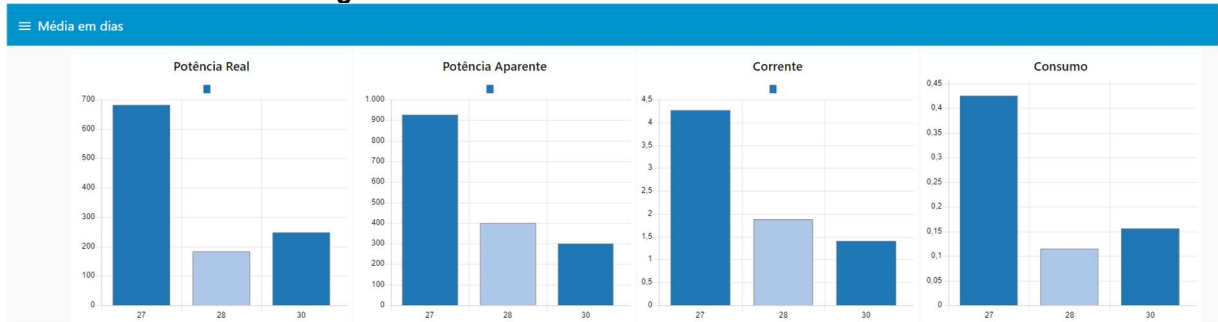
Ao analisar-se o gráfico, percebe-se que os picos no consumo da residência são durante os horários das 9, 13 e 23 horas (convertidas para UTC-3), onde foram utilizados equipamentos como a secadora de roupas ou chuveiro.

4.2.4 Média diária dos valores

A cada início de novo dia é realizado a média dos valores recebidos, onde é realizada a média aritmética das mensagens recebidas durante as últimas 24 horas. A Figura 87 abaixo ilustra os valores representados na forma de gráficos de barras, onde o eixo x representa os dias em que as médias foram realizadas e o eixo y os resultados das médias da respectiva variável.

Caso seja feita uma nova média aritmética que corresponda a um período já ilustrado no eixo x, a barra será simplesmente substituída pela nova média.

Figura 87 – Médias aritméticas feitas a cada dia



Fonte: O Autor

4.2.5 Média mensal dos valores

A cada início de um novo mês é realizado a média dos valores recebidos, onde é realizada a média aritmética das mensagens recebidas durante o mês anterior. A Figura 88 abaixo ilustra os valores representados na forma de gráficos de barras, onde o eixo x representa os meses em que as médias foram realizadas e o eixo y os resultados das médias da respectiva variável.

Caso seja feita uma nova média aritmética que corresponda a um período já ilustrado no eixo x, a barra será simplesmente substituída pela nova média. Como a média é apenas calculada após o fechamento do mês, os gráficos ficam aguardando até o início do próximo mês para receber os dados calculados.

Figura 88 – Médias aritméticas feitas a cada mês



Fonte: O Autor

4.3 Teste com dois medidores

Conforme mencionado anteriormente, os dados do dispositivo 1 foram medidos e enviados ao servidor, enquanto que, o segundo medidor se trata de um

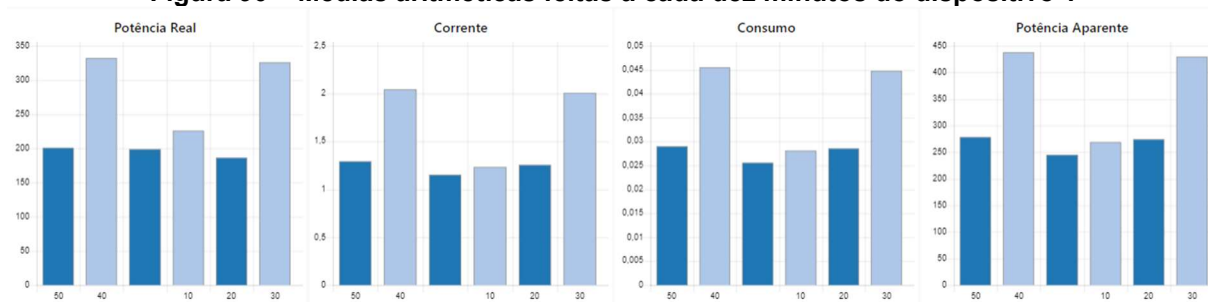
circuito de controle em conjunto com um circuito de comunicação que envia dados randômicos para verificar o funcionamento da comunicação. A Figura 89, Figura 90 e Figura 91 ilustram, respectivamente, as medidas da última mensagem recebida, a média aritmética de 10 minutos e a média aritmética de 1 hora.

Figura 89 – Medidas da última mensagem do dispositivo 1



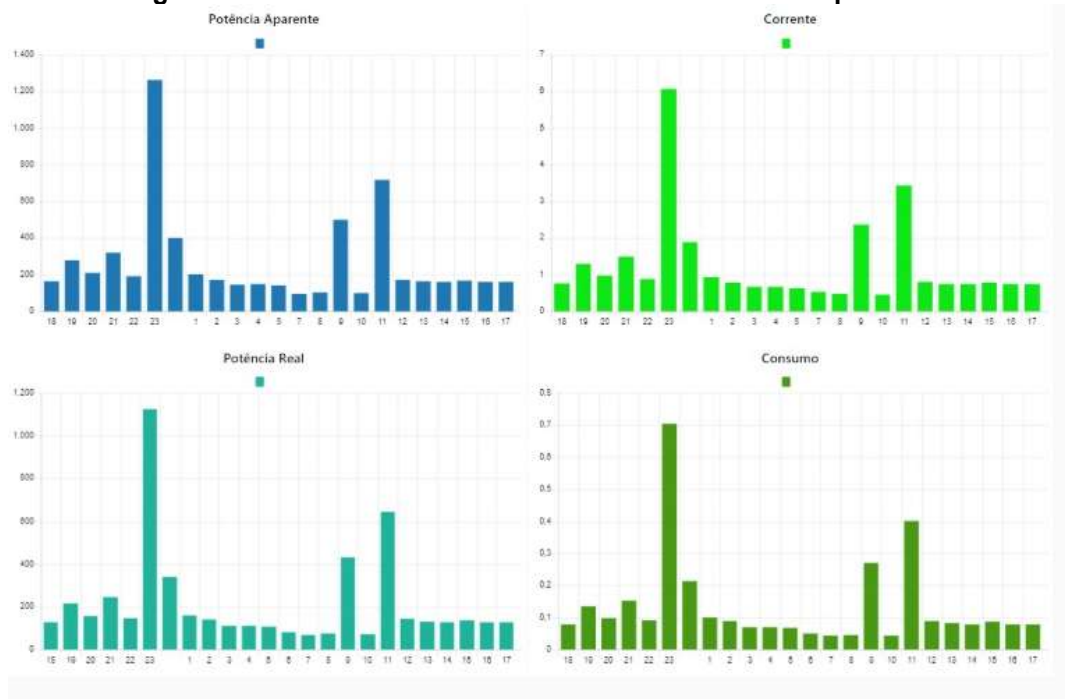
Fonte: O Autor

Figura 90 – Médias aritméticas feitas a cada dez minutos do dispositivo 1



Fonte: O Autor

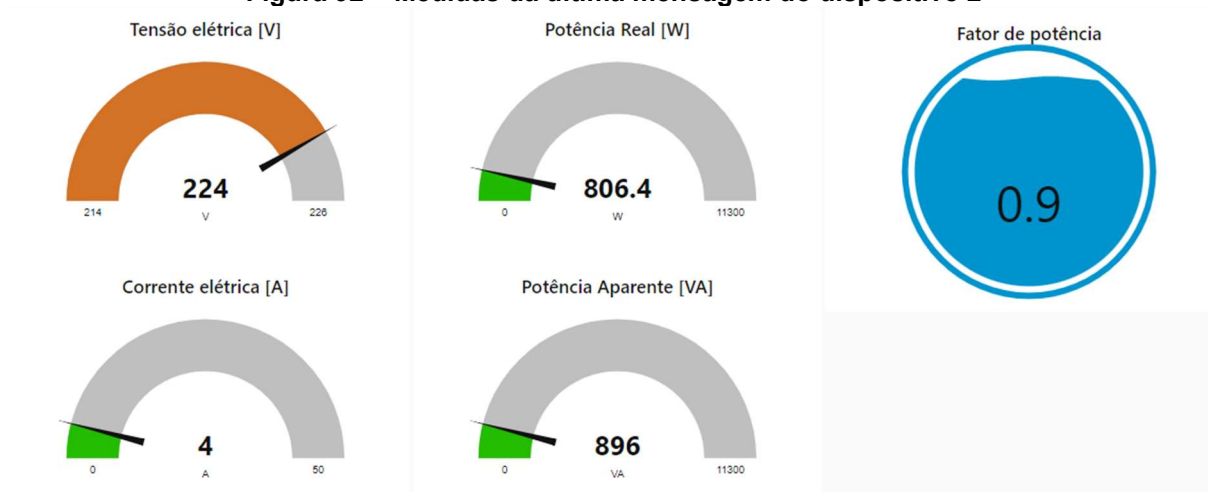
Figura 91 – Médias aritméticas feitas a cada hora do dispositivo 1



Fonte: O Autor

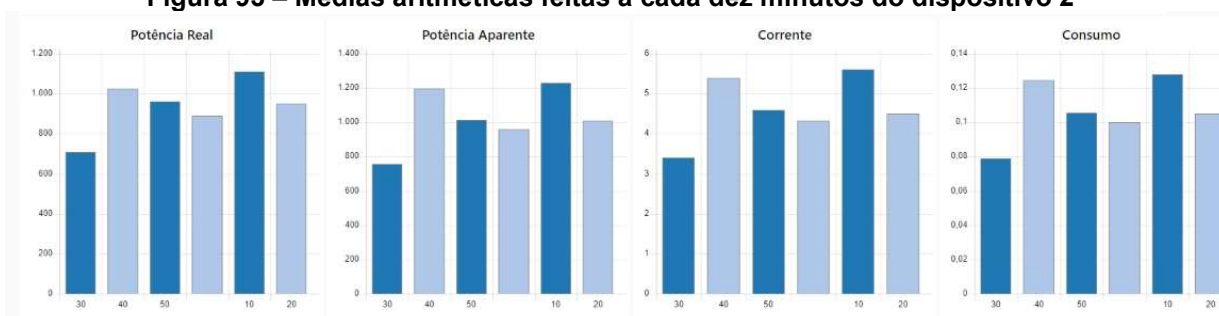
A Figura 92, Figura 93 e Figura 94 ilustram, respectivamente, as medidas da última mensagem recebida, a média aritmética de 10 minutos e a média aritmética de 1 hora.

Figura 92 – Medidas da última mensagem do dispositivo 2



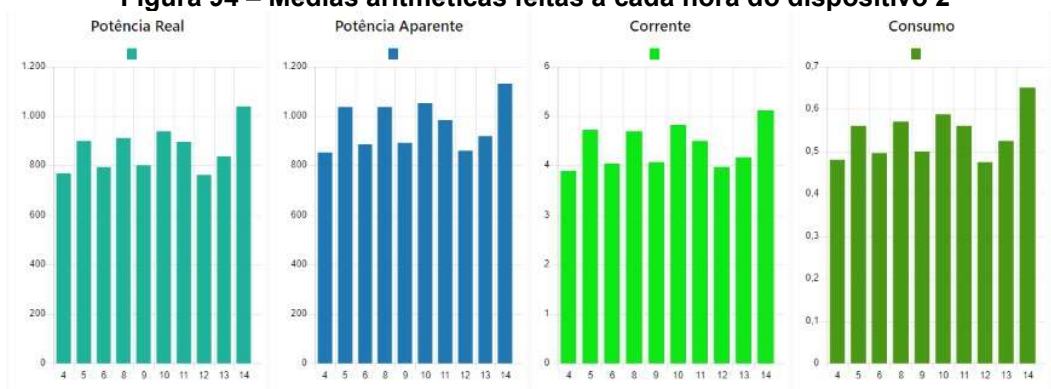
Fonte: O Autor

Figura 93 – Médias aritméticas feitas a cada dez minutos do dispositivo 2



Fonte: O Autor

Figura 94 – Médias aritméticas feitas a cada hora do dispositivo 2



Fonte: O Autor

A Figura 95 abaixo ilustra como ficaram organizadas as guias, tendo cada dispositivo uma guia diferente. A verificação do ID do dispositivo foi feita corretamente, armazenando as mensagens de cada dispositivo no seu próprio *database*, bem como a correta exibição dos dados.

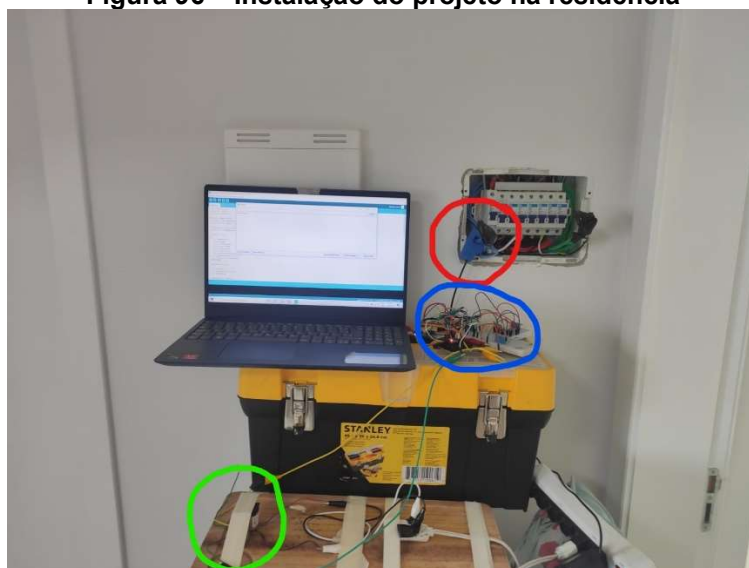
Figura 95 – Guias para exibição dos dados

Fonte: O Autor

4.4 Comparação entre os dados obtidos e o medidor da residência

A Figura 96 e Figura 97 ilustram como foi implementado a instalação do projeto à rede da residência, contando com o sensor de corrente não intrusivo, destacado pelo círculo vermelho, o transformador de tensão alimentado pela tensão 220 V da rede, destacado pelo círculo verde, e o circuito de medição, destacado pelo círculo azul.

Figura 96 – Instalação do projeto na residência



Fonte: O Autor

Figura 97 – Instalação do sensor de corrente no disjuntor geral



Fonte: O Autor

4.4.1 Primeira bateria de testes (22 horas)

Nesta primeira bateria de testes, os dados da residência foram medidos durante um período de aproximadamente 21 horas e 49 minutos, onde, a média aritmética da potência aparente é igual a 247,5 VA. Entretanto, para se saber o valor em VAh e Wh, é feita a multiplicação deste valor por 21,82 (correspondendo ao valor de horas testado), obtendo, assim, o valor de 5401 VAh e 4552,2 Wh. Dessa forma, durante a primeira bateria de testes, o consumo deste período foi igual a 4,5522 kWh e 5,4 kVAh.

A Tabela 5 abaixo contém os valores do medidor da residência, além da data e horário em que foram anotados.

Tabela 5 – Consumo observado no medidor da residência durante o teste de 22 horas

Data	Horário	Consumo (kWh)
23/08	18:04	5917
24/08	09:06	5921
24/08	15:58	5922

Fonte: O Autor

Nota-se que, o consumo observado durante o período da bateria de testes, é igual à diferença entre os valores 5922 e 5917, dessa forma, pode-se afirmar que, o consumo aproximado da residência durante o período de testes, foi de 5 kWh. Dessa forma, comparando-se o consumo do medidor com o consumo de potência aparente medido pelo circuito, encontrou-se um erro percentual de aproximadamente 8%.

No total, durante a execução desta bateria de testes de 21 horas e 49 minutos, foram recebidas aproximadamente 647 mensagens. Os valores médios de tensão elétrica, corrente elétrica, potência real, potência aparente e fator de potência da residência foram, respectivamente, 216,4 V, 1,16 A, 208,6 W, 247,5 e 0,76.

4.4.2 Segunda bateria de testes (52 horas)

Nesta segunda bateria de testes, os dados da residência foram medidos durante um período de aproximadamente 51 horas e 39 minutos, onde, a média aritmética da potência aparente é igual a 298,7 VA. Para descobrir o consumo, foi então multiplicado pelo valor de 51,65 (correspondendo ao valor de horas testado), obtendo, assim, o valor de 15427,64 VAh e 12896,97 Wh. Dessa forma, durante a primeira bateria de testes, o consumo deste período foi igual a 12,897 kWh e 15,428 kVAh.

A Tabela 6 abaixo contém os valores do medidor da residência, além da data e horário em que foram anotados.

Tabela 6 – Consumo observado no medidor da residência durante o teste de 52 horas

Data	Horário	Consumo (kWh)
27/08	19:15	5948
28/08	07:09	5955
28/08	17:34	5957
29/08	10:46	5964
29/08	18:57	5966
29/08	22:52	5968

Fonte: O Autor

O consumo observado durante o período da bateria de testes é igual à diferença entre os valores 5968 e 5948, dessa forma, pode-se afirmar que, o consumo aproximado da residência durante o período de testes, foi de 20 kWh. Dessa forma, comparando-se o consumo do medidor com o consumo de potência aparente medido pelo circuito, encontrou-se um erro percentual de aproximadamente 22,86%.

No total, durante a execução desta bateria de testes de 51 horas e 39 minutos, foram recebidas aproximadamente 1561 mensagens. Os valores médios de tensão elétrica, corrente elétrica, potência real, potência aparente e fator de potência da residência foram, respectivamente, 215,9, 1,39 A, 249,7 W, 298,7 e 0,79.

4.4.3 Terceira bateria de testes (36 horas)

Nesta terceira bateria de testes, os dados da residência foram medidos durante um período de aproximadamente 36 horas e 05 minutos, onde, a média aritmética da potência aparente medida foi igual a 303,03 VA. Para descobrir o consumo, foi então multiplicado pelo valor de 36,0765 (correspondendo ao valor de horas testado), obtendo, assim, o valor de 10932,12 VAh e 8980,66 Wh. Dessa forma, durante a primeira bateria de testes, o consumo deste período foi igual a 8,98 kWh e 10,93 kVAh.

A Tabela 7 abaixo contém os valores do medidor da residência, além da data e horário em que foram anotados.

Tabela 7 – Consumo observado no medidor da residência durante o teste de 36 horas

Data	Horário	Consumo (kWh)
30/08	11:35	5972
30/08	15:29	5972
30/08	20:31	5973
31/08	10:20	5980
31/08	12:01	5980
31/08	13:23	5980
31/08	14:15	5980
31/08	21:11	5982
31/08	23:49	5985

Fonte: O Autor

O consumo observado durante o período da bateria de testes é igual à diferença entre os valores 5985 e 5972, dessa forma, pode-se afirmar que, o consumo aproximado da residência durante o período de testes, foi de 13 kWh. Dessa forma, comparando-se o consumo do medidor com o consumo de potência aparente medido pelo circuito, encontrou-se um erro percentual de aproximadamente 15,92%.

No total, durante a execução desta bateria de testes de 36 horas e 05 minutos, foram recebidas aproximadamente 1561 mensagens. Os valores médios de tensão elétrica, corrente elétrica, potência real, potência aparente e fator de potência da residência foram, respectivamente, 217,11, 1,417 A, 248,93 W, 303,03 e 0,77.

4.5 Distância máxima de comunicação

Para os testes de distância, o dispositivo que envia as mensagens foi afastado do receptor. Foram realizados três testes, sendo o primeiro a 4 metros de distância do receptor, o segundo teste a aproximadamente 110 metros de distância do receptor e o terceiro e último foi realizado na distância máxima onde se conseguia comunicar, de forma que caso fosse afastado mais, se tornaria inviável a comunicação entre os dispositivos.

4.5.1 Distância de 4 m

Este teste foi realizado em uma distância de 4 metros entre o dispositivo que envia a mensagem e o dispositivo que a recebe, entretanto, são separados por

uma parede de alvenaria. Devido ao fato desse teste ser realizado em uma distância pequena, foi utilizado um *spreading factor* (SF) igual a 7.

A Tabela 8 abaixo apresenta os dados referentes às mensagens que voltaram do dispositivo receptor, onde a coluna “enviados” exibe a quantidade de mensagens enviadas ao receptor, “recebidos” indica a quantidade de mensagens que retornaram do receptor, “RSSI” indica a força do sinal recebido em dB, “SNR” indica o nível do sinal em relação ao ruído e “PER”, indica a taxa de erro de pacotes, sendo definida pela equação (39) abaixo.

$$PER = \frac{\text{Pacotes perdidos}}{\text{Pacotes enviados}} \quad (39)$$

Tabela 8 – Indicadores da comunicação LoRa em uma distância de 4 metros com SF = 7

Enviados	Recebidos	RSSI (dB)	SNR (dB)	PER (%)
39	39	-74,33	9,42	0,00
39	39	-73,21	9,43	0,00
40	40	-73,25	9,5	0,00
39	39	-73,38	9,45	0,00
40	40	-73,25	9,46	0,00
39	39	-73,18	9,41	0,00
40	40	-73,2	9,4	0,00
39	39	-77,69	9,37	0,00
40	40	-77,53	9,31	0,00
39	39	-78,23	9,4	0,00
39	39	-74,77	9,47	0,00
40	40	-70,68	9,58	0,00
39	39	-70,31	9,54	0,00
40	39	-70,1	9,53	2,50

Fonte: O Autor

Cada linha da Tabela 8 acima representa uma média de dois minutos de cada variável, ou seja, na terceira linha, na coluna do RSSI, significa dizer que, a média do RSSI dos pacotes recebidos durante dois minutos, é igual a -73.21 dB. A média aritmética do RSSI, SNR e PER é, respectivamente, -73,8 dB, 9,45 dB e 0,18 %.

4.5.2 Distância de 110 metros

Este teste foi realizado em uma distância de aproximadamente 100 metros entre o dispositivo que envia a mensagem e o dispositivo que a recebe, entretanto, são separados por quatro residências. Devido ao fato desse teste ser realizado em uma distância grande, foi utilizado um *spreading factor* (SF) igual a 11.

A Figura 98 abaixo ilustra o local de realização do teste, onde o ponto vermelho indica a posição do dispositivo *sender* e o ponto com o valor de 108,65 m indica a posição do dispositivo receptor. A Tabela 9 abaixo apresenta os dados coletados referentes às mensagens que voltaram do dispositivo receptor.

Figura 98 – Local onde foi feito o teste em distância de 110 metros



Fonte: O Autor

Tabela 9 – Indicadores da comunicação LoRa em uma distância de 110 metros com SF = 11

Enviados	Recebidos	RSSI (dB)	SNR (dB)	PER (%)
34	34	-116,5	-1,56	0,00
35	34	-116,88	-1,53	2,86
34	34	-120,15	-1,42	0,00
34	34	-116,62	-1,04	0,00
35	34	-116,68	-1,76	2,86

Fonte: O Autor

A média aritmética do RSSI, SNR e PER foi, respectivamente, -117,34 dB, -1,46 dB e 1,14 %. Apesar da distância, conseguiu-se bons resultados, possuindo uma perda de pacotes de menos de 2 %.

4.5.3 Distância máxima

Este teste foi realizado em uma distância onde não se conseguia afastar mais sem haver muita perda de pacotes (perda superior a 50 %), resultando em

aproximadamente 120 metros de distância, com uma residência entre o dispositivo que envia a mensagem e o dispositivo que a recebe. Devido ao fato desse teste ser realizado em uma distância grande, foi utilizado um *spreading factor* (SF) igual a 11.

A Figura 99 abaixo ilustra o local de realização do teste, onde o ponto vermelho indica a posição do dispositivo *sender* e o ponto com o valor de 119,87 m indica a posição do dispositivo receptor. A Tabela 10 abaixo apresenta os dados coletados referentes às mensagens que voltaram do dispositivo receptor.

Figura 99 – Local onde foi feito o teste em distância de 120 metros



Fonte: O Autor

Tabela 10 – Indicadores da comunicação LoRa em uma distância de 120 metros com SF = 11

Enviados	Recebidos	RSSI (dB)	SNR (dB)	PER (%)
34	34	-115,15	-0,82	0,00
34	32	-115,66	-0,49	5,88
35	30	-116,07	-0,74	14,29
34	32	-116,13	-0,54	5,88
34	33	-116,55	0,05	2,94
35	32	-116,56	2,16	8,57

Fonte: O Autor

A média aritmética do RSSI, SNR e PER foi, respectivamente, -116,02 dB, -0,063 dB e 6,26 %. Caso o *sender* fosse distanciado mais do *receiver*, ou sua

antena fosse mudada de direção, conseqüentemente gerando um descasamento de polarização, a perda de pacotes aumentava mais do que 50%.

5 CONCLUSÃO

Através deste trabalho, foi possível desenvolver um medidor de consumo de energia elétrica integrado à Internet das Coisas, capaz de mensurar não só o consumo como também o fator de potência. Seus parâmetros foram medidos e comparados com um medidor de consumo elétrico convencional, com o intuito de observar sua exatidão.

Foram realizados testes para determinar se a distância máxima alcançada pela comunicação sem fio LoRa implementada no projeto era suficiente para uma conexão estável caso uma residência seja mais afastada das demais. A distância resultante provou ser aceitável, tendo em vista que caso aplicado a um condomínio, os circuitos medidores poderão criar uma rede entre si para que os dados cheguem ao *gateway* de maneira mais rápida e fácil.

Os testes durante um período prolongado totalizaram aproximadamente cento e dez horas de ensaio, conseguindo dessa forma uma boa quantidade de dados. Os valores analisados não foram satisfatórios, devido ao fato de que houve um erro relativo de aproximadamente 22,86% no pior caso. Verificou-se que, durante a construção da escala para correntes menores, o sinal sofreu adição de harmônicas que não são da própria carga, portanto, deve-se modificar a escala para que seja composta por resistores, de forma que o sinal a ser medido seja o mais fidedigno ao sinal original, assim como pode ser visto no Apêndice J.

O servidor na nuvem conseguiu receber medições a cada dois minutos de dois circuitos de medição, realizando o armazenamento delas no serviço *cloudant*, conseguindo colocar medições em diferentes *databases* dependendo de qual circuito medidor efetuou o envio da mensagem. O site onde está hospedado o *node-red* do projeto é acessível por qualquer dispositivo conectado à internet, dessa forma, é possível acompanhar o consumo tanto pelo smartphone ou computador.

Algumas possíveis melhorias foram observadas para trabalhos futuros, sendo a primeira delas a adição de um módulo RTC ao circuito de medição, de forma que o *timestamp* seja adicionado à mensagem quando ela é medida e não somente quando é recebida pelo servidor na nuvem. Dessa forma, caso haja alguma falha no envio ao servidor, ainda assim, será possível verificar posteriormente o horário em que foi feita a medição.

Outra melhoria observada é a adição de um módulo de SD Card para *backup*, dessa forma, o circuito de medição não só terá mais folga para guardar os dados por mais tempo antes de enviar ao servidor, como também terá uma garantia de que caso não seja possível enviar as medições ao servidor, quando não houver conexão com a internet por um tempo prolongado por exemplo, tenha bastante espaço para armazenar as mensagens para posterior postagem.

Para este projeto não foi utilizado nenhum tipo de *display* para o usuário, pois não houve necessidade devido ao fato de se conseguir visualizar diretamente via computador. Entretanto, para trabalhos futuros, é aconselhável ter um display, seja para exibição da última medição, média de da última hora, ou até mesmo para exibição de mensagens caso haja algum imprevisto na comunicação. Além disto, fica a sugestão da realização de testes com os nós adjacentes, alcançando uma distância de comunicação maior.

Para futuros projetos, fica também a indicação da implementação dos circuitos de medição a uma rede LoRaWAN já existente, bem como a inserção de uma bateria para o circuito de controle, de forma que, o circuito de comunicação possa mandar avisos ao *gateway* em caso de falta de energia elétrica. Além das indicações supramencionadas, têm-se a sugestão do aprimoramento da exatidão do circuito de medição e adição de uma função para realizar o cálculo da distorção harmônica total, do inglês *total harmonic distortion* (THD).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL (Brasília). **Aneel cria nova bandeira tarifária, e conta de luz fica mais cara**: custo de 100 kilowatt-hora passará de R\$ 9,49 para R\$ 14,20 até abril. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-08/aneel-cria-nova-bandeira-tarifaria-e-conta-de-luz-fica-mais-cara>. Acesso em: 29 set. 2021.
- ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O.. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013. 874 p.
- ANATEL. **Internet das Coisas**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/outorga/internet-das-coisas>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- ANEEL. **Bandeiras Tarifárias**. 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 20 ago. 2021.
- ARDUINO. **What is Arduino?** 2018. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Grupo Gen, 2011. 508 p.
- BARBOSA, Heloisa Junqueira. **Smart Meter**: uma abordagem voltada para iot. 2016. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- BECIROVIC, V.; NIKOLIC, B.; TURKOVIC, I.; PAVIC, I.. Development of measurement system for analyzing the power quality. **International Symposium On Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation And Motion**, [S.L.], [S.I.], p. 1283-1289, jun. 2012. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/speedam.2012.6264486>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6264486>. Acesso em: 04 ago. 2021.
- BOYLESTAD, Robert L.. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012. 959 p.
- BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria dos circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013. 766 p.
- BREDA, Jader Fernando Dias; MEDEIROS, Jacilene Martins; ARAÚJO, João Vitor Gomes de. Desenvolvimento de um Medidor de Consumo de Energia Elétrica em Tempo Real por meio de Medidor não Invasivo de Corrente Utilizando a Plataforma Arduino. In: **ANAIS DO 14º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 2019**, Ouro Preto. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbai-2019/papers/desenvolvimento-de-um-medidor-de-consumo-de-energia-eletrica-em-tempo-real-por-meio-de-medidor-nao-invasivo-de-corrente-> Acesso em: 04 out. 2021.

CASTRO, Amanda. **Conta de luz veio mais cara? Aprenda a contestar o valor.** 2020. Disponível em: <https://fdr.com.br/2020/07/11/conta-de-luz-veio-mais-cara/>. Acesso em: 10 abr. 2021.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Organização Social. **Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional.** Brasília: Tatiana de Carvalho Pires, 2012. 172 p. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Redes_Eletricas_Inteligentes_22mar13_9539.pdf/36f87ff1-43ed-4f33-9b53-5c869ace9023?version=1.5. Acesso em: 10 jun. 2021.

CERRI, Alberto. **Consumo consciente de energia.** 2016. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/5179-consumo-consciente-de-energia.html#:~:text=O%20consumo%20consciente%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20%C3%A9%20essencial%20para%20um,o%20consumo%20de%20energia%20el%C3%A9trica.&text=Esse%20%C3%A9%20apenas%20um%20dos,e%20acabar%20com%20o%20desperd%C3%ADcio..> Acesso em: 19 abr. 2021.

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013.

COSTA, Alysson Percicotty da; SERMANN, Fernanda Ciniello; SILVA, Gustavo Grzybowski da. **Desenvolvimento de um protótipo para medição de energia elétrica.** 2016. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

DATATEM. **Medidores inteligentes: qual sua relevância na gestão de medição de energia?.** Qual sua relevância na gestão de medição de energia. 2020. Disponível em: <https://datatem.com.br/blog/medidores-inteligentes/>. Acesso em: 11 abr. 2021.

ELECTRONICS, Athos. **Relé Térmico: o que é e como funciona.** O que é e como funciona. 2016 Disponível em: <https://athoselectronics.com/rele-termico-comandos-eletricos/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

FEITOSA, Sônia Maria Ribeiro; GOMES, Jaíra Maria Alcobaça. **Crescimento da população e o consumo de energia elétrica em Teresina, Piauí, Brasil.** 2009. 12 f. Monografia (Especialização) - Curso de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2009. Disponível em: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal12/Procesosambientales/Usoderecursos/68.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2021.

FLOP, Filipe. **Sensor de Tensão AC 0 a 250V Voltímetro ZMPT101B.** 2020. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-tensao-ac-0-a-250v-voltmetro-zmpt101b/>. Acesso em: 30 jul. 2021.

FRADEN, Jacob. **Handbook of Modern Sensors: physics, designs, and applications.** 4. ed. New York: Springer, 2010.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HAGINO, Taiji. **Practical Node-RED Programming: learn powerful visual programming techniques and best practices for the web and iot.** Birmingham: Packt, 2021.

IBM. **IBM Watson IoT Platform**. 2014 Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/en/watson-iot-platform>. Acesso em: 03 ago. 2021.

INFO, Usina. **Sensor de Tensão AC Zmpt101b**. 2019 Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-tensao-arduino/sensor-de-tensao-ac-zmpt101b-voltmetro-arduino-5658.html>. Acesso em: 30 jul. 2021.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (vim 2012). Duque de Caxias: Luso-Brasileira, 2012.

IRWIN, J. David. **Análise de circuitos em Engenharia**. São Paulo: Pearson, 2010. 848 p.

LORA ALLIANCE. **What is LoRaWAN® Specification**. 2018 Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2005.

MARTINS, Joice Machado. **Sistema de monitoramento de dados provenientes da energia fotovoltaica através de uma plataforma IoT de aquisição e controle**. 2019. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019. Disponível em: <http://bdta.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/643/1/Sistema%20de%20monitoramento%20de%20dados%20provenientes%20da%20energia%20fotovoltaica%20atrav%C3%A9s%20de%20uma%20plataforma%20IOT%20de%20aquisi%C3%A7%C3%A3o%20e%20controle.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2021.

MARTYNOVA, Olesia. **Why LoRa Is the Best Option for Smart City and Smart Building Applications**: all you need to know about using lora and lorawan technologies in connected cities. All you need to know about using LoRa and LoRaWAN technologies in connected cities. 2019. Disponível em: <https://www.intellias.com/why-lora-is-the-best-option-for-smart-city-and-smart-building-applications/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

MATONDANG, Josef. **Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate and Bit Rate in LoRa**. 2018. Disponível em: <https://josefmt.com/2018/08/14/spreading-factor-bandwidth-coding-rate-and-bit-rate-in-lora-english/>. Acesso em: 20 ago. 2021.

MAZIDI, Muhammad Ali; MCKINLAY, Rolin D.; CAUSEY, Danny. **PIC Microcontroller and Embedded Systems**: using assembly and c for pic 18. New Jersey: Pearson, 2008.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2015.

MICROCHIP. **ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P**: megaAVR® Data Sheet. 2018. Disponível em: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1351717/Microchip/ATmega328P/1>. Acesso em: 11 out 2021.

MITCHELL, Robin. **Arduino**: a comparison of popular arduino boards. A comparison of Popular Arduino Boards. 2018. Disponível em: <https://maker.pro/arduino/tutorial/a-comparison-of-popular-arduino-boards>. Acesso em: 28 jul. 2021.

MOBILEFISH. **LoRa**. 2018. Disponível em: lora.readthedocs.io/. Acesso em: 20 ago. 2021.

MOBILEFISH. **LoRaWAN**. 2018. Disponível em: https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html. Acesso em: 20 ago. 2021.

MOTTER, Giuliano G.; FRANÇA, Maria Bernadete de M.. **Proposta de medidor inteligente para consumo e qualidade de energia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - 2020, 1., 2020, Londrina. Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2020. [S.L.]: Sbabra, 2020. v. 2, p. 1-9. Disponível em: sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sba/article/view/1458/1228. Acesso em: 10 jun. 2021.

MQTT. **MQTT: the standard for iot messaging**. The Standard for IoT Messaging. 2020 Disponível em: <https://mqtt.org/>. Acesso em: 08 jun. 2021.

NEWMAN, Jared L. et al. AC Power Monitoring System. **Channels: Where Disciplines Meet**. Cedarville, p. 101-137. nov. 2016.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A.. **Circuitos Elétricos**. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

NODE-RED. **Medições consumo**. 2015 Disponível em: <https://node-red-medicoes-consumo.mybluemix.net/>. Acesso em: 08 ago. 2021.

O GLOBO. **Consumidor poderá instalar medidores próprios para conferir consumo de eletricidade, gás e água: o custo do equipamento e da instalação será do usuário**. O custo do equipamento e da instalação será do usuário. 2017. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/defesa-do-consumidor/consumidor-podera-instalar-medidores-proprios-para-conferir-consumo-de-eletricidade-gas-agua-21651757>. Acesso em: 06 set. 2021.

OLIVEIRA, José Raimundo de; SHIN-TING, Wu. **Microcontroladores**. [S. l.]: Unicamp, 2019.

OUANOUNOU, Emmanuel. **LoRaWAN & MQTT: what to know when securing your iot network**. What to Know When Securing Your IoT Network. 2020. Disponível em: <https://www.cyberark.com/resources/threat-research-blog/lorawan-mqtt-what-to-know-when-securing-your-iot-network>. Acesso em: 08 jun. 2021.

PLATT, Charles; JANSSON, Fredrik. **Encyclopedia of Electronic Components: Sensors**. San Francisco: Maker Media, 2016.

RODRIGUES, Caio Castro et al. **Plataforma de aquisição e controle IoT integrado a sistema de geração fotovoltaica**. Energia Elétrica e Sustentabilidade. Belém, p. 247-257. fev. 2018. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/76153868/e-book-energia-eletrica-e-sustentabilidade-4/2>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SALESFORCE. **Uma arquitetura de multilocatário** 2013. Disponível em: http://www.developerforce.com/guides/br/Fundamentals/Content/adg_intro_multitenant.htm. Acesso em: 03 ago. 2021

SANTIAGO, Abinoan. **Conta de luz no Brasil deve subir 14,5%, em média, em 2021, calcula estudo:** inflação e conta-covid são as vilãs para aumento; centro-oeste e norte deverão ser as regiões com maiores altas. Inflação e Conta-Covid são as vilãs para aumento; Centro-Oeste e Norte deverão ser as regiões com maiores altas. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/2021/02/08/conta-de-luz-no-brasil-deve-subir-ate-14-5-em-media-a-em-2021-calcula-estudo>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SEMTECH. **SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver.** [S.I.]: Semtech Corporation, 2020. Disponível em: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276#download-resources>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SEMTECH. **What is LoRa?** 2018 Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. Acesso em: 28 jul. 2021.

SENEVIRATNE, Pradeeka. **Beginning LoRa Radio Networks with Arduino:** build long range, low power wireless iot networks. New York: Apress, 2019. 309 p.

SILVA JUNIOR, Vidal Pereira da. **Conheça a tecnologia LoRa® e o protocolo LoRaWAN.** 2016. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/conheca-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

SIOSHANSI, Fereidoon. **Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed and Efficient Energy.** Amsterdam: Academic Press, 2011. ISBN 9780123864529. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=407935&lang=pt-br&site=ehost-liv> e. Acesso em: 7 jun. 2021.

SÖNNICHSEN, N.. **Smart meters in Great Britain - Statistics & Facts.** 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/topics/4923/smart-meters-in-the-united-kingdom-uk/>. Acesso em: 17 nov. 2020

SUDESTE, Diário do (org.). **Copel inicia a implantação do Rede Elétrica Inteligente.** 2021. Disponível em: <https://diariodosudoeste.com.br/pato-branco/copel-inicia-a-implantacao-do-rede-eletrica-inteligente/>. Acesso em: 12 abr. 2021.

TERIDIAN SEMICONDUCTOR CORPORATION. **Using Current Transformers with the 78M661x.** Sunnyvale: Teridian Semiconductor Corporation, 2010.

TEST AND MEASUREMENT WORLD. **BER vs PER:** difference between bit error rate and packet error rate. Difference between Bit Error Rate and Packet Error Rate. 2018 Disponível em: <https://www.test-and-measurement-world.com/Terminology/BER-vs-PER.html>. Acesso em: 25 ago. 2021.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores Industriais:** fundamentos e aplicações. 4. ed. [S. I.]: Érica, 2018.

YAO, Hao-Wei et al. **Prediction Method for Smart Meter Life Based On Big Data.** Procedia Engineering. Zhengzhou, p. 1111-1114. mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817363440>. Acesso em: 12 abr. 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Métodos e resultados de outras versões exploradas do circuito de medição

Medição da tensão da rede

Para realizar a redução do valor de pico da tensão da rede, utilizou-se primeiramente um sensor de tensão ZMPT101B, todavia, após testes verificou-se que para o cálculo do fator de potência havia uma defasagem de aproximadamente 18 graus. Dessa forma, ele foi trocado por um transformador de tensão que realiza a diminuição do valor da tensão da rede de 220 V RMS para 9 V RMS e, após um divisor de tensão e adição de sinal CC, têm-se uma onda senoidal de 0 a 3,3 V de pico.

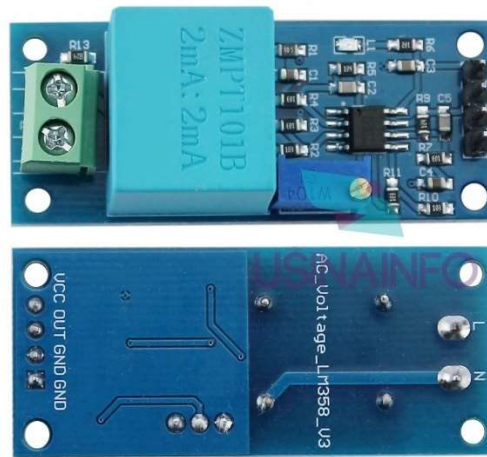
Sensor de tensão ZMPT101B

O sensor de tensão é utilizado para tensões de 0 a 250 V RMS, permitindo identificar a presença de tensão alternada, além disso, é possível utilizá-lo como um medidor (FLOP, 2021). Segundo Info (2021), para ocorrer seu funcionamento, deve-se alimentar o módulo com uma tensão CC de 5 a 30 V, com o intuito de alimentar o CI do circuito, sendo a alimentação feita por meio dos pinos Vcc e Gnd. Ainda de acordo com Info (2021), o princípio do funcionamento do módulo é simples, pois, quando houver uma tensão AC em sua entrada, o módulo libera uma tensão entre os pinos Vout e Gnd em que, quando houver uma variação na entrada, haverá uma variação em sua saída.

O projeto, inicialmente, foi feito com esse módulo, de forma que a tensão de 220 V era transformada para um sinal com um V_{p-p} de 3,135 V. Entretanto, o sinal em sua saída possuía um offset de 2,5 V, que eram retirados para depois ser incluído o offset necessário para o circuito de controle de 1,65 V. Dessa forma, o sinal que inicialmente tinha valores de 0,9325 a 4,0675 era transformado para uma onda com valores de 0,0825 a 3,2175 V. A escolha do valor 3,2175 e não 3,3 V deve-se ao fato da consideração de uma sobretensão de 5 % na alimentação da residência.

A Figura 100 ilustra o módulo ZMPT101B utilizado previamente no projeto, onde consegue-se visualizar os pinos: Vcc, utilizado para alimentar o módulo com tensão CC de no mínimo 5 V; o pino Gnd com tensão igual a zero volts e o pino Out, onde existe a tensão transformada a partir da tensão elétrica da residência. Além disso, é possível ver em sua outra extremidade, os pinos que recebem a tensão alternada da residência identificados com as letras “L” e “N”.

Figura 100 – Módulo ZMPT101B



Fonte: Info (2021)

Medição do fator de potência

Fator de potência através de duas ondas quadradas

Inicialmente, para este projeto, foi montado um circuito de forma que o fator de potência fosse medido através de duas ondas quadradas, onde elas são originadas das saídas dos sensores após terem sido transformadas em ondas quadradas por meio dos amplificadores operacionais em malha aberta (operando como comparadores) presentes no circuito integrado LM324N, dessa forma, o sinal que era recebido pelo circuito de controle para calcular o fator de potência, se tratava de duas ondas quadradas referentes à tensão e corrente da residência.

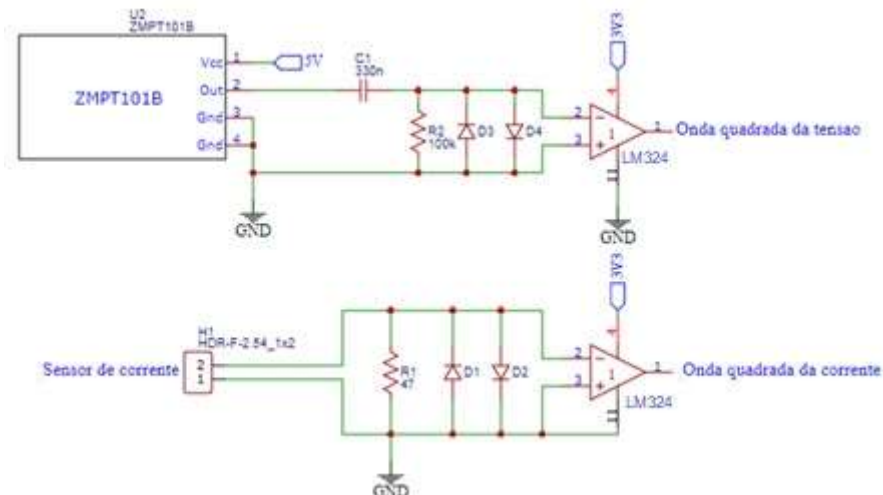
A tabela verdade da porta lógica XOR foi utilizada na programação do circuito de controle, de forma que, o tempo entre os sinais de tensão e corrente comece a ser contado quando um dos sinais estiver na borda positiva e o outro na borda negativa, terminando a contagem quando houver a inversão, ou seja, o sinal

que inicialmente estava positivo se torna zero e o sinal que no início estava com valor zero se torna positivo.

O tempo resultante é dado em microssegundos pois caso medido em milissegundos, a mínima detecção corresponderia a aproximadamente 6 % do período total da onda. Posteriormente, feitas as devidas conversões, era calculado o fator de potência. Entretanto, percebeu-se que os resultados não eram satisfatórios, possuindo um fator de potência inferior a 0,9 para cargas puramente resistivas. Dessa forma, devido à incoerência do valor calculado e do valor esperado, este método foi descartado.

A Figura 101 logo abaixo ilustra o circuito que foi anteriormente utilizado para transformar os sinais de saída do sensor de tensão ZMPT101B e do transformador de corrente, em ondas quadradas, para então calcular o fator de potência. A saída do sensor de corrente será conectada a dois diodos e um resistor *shunt* em paralelo, limitando assim o nível de tensão do sinal que entra no amplificador operacional. Para o caso do sensor de tensão, a única diferença é o capacitor de 330 nF e o resistor de 100 k Ω formando um filtro passa alta, de forma que o sinal CC de 2,5 V da saída do sensor de tensão, seja retirado antes de chegar aos diodos e, conseqüentemente, à entrada do amplificador operacional.

Figura 101 – Circuito utilizado para calcular o fator de potência com ondas quadradas



Fonte: O Autor

Fator de potência com porta XOR

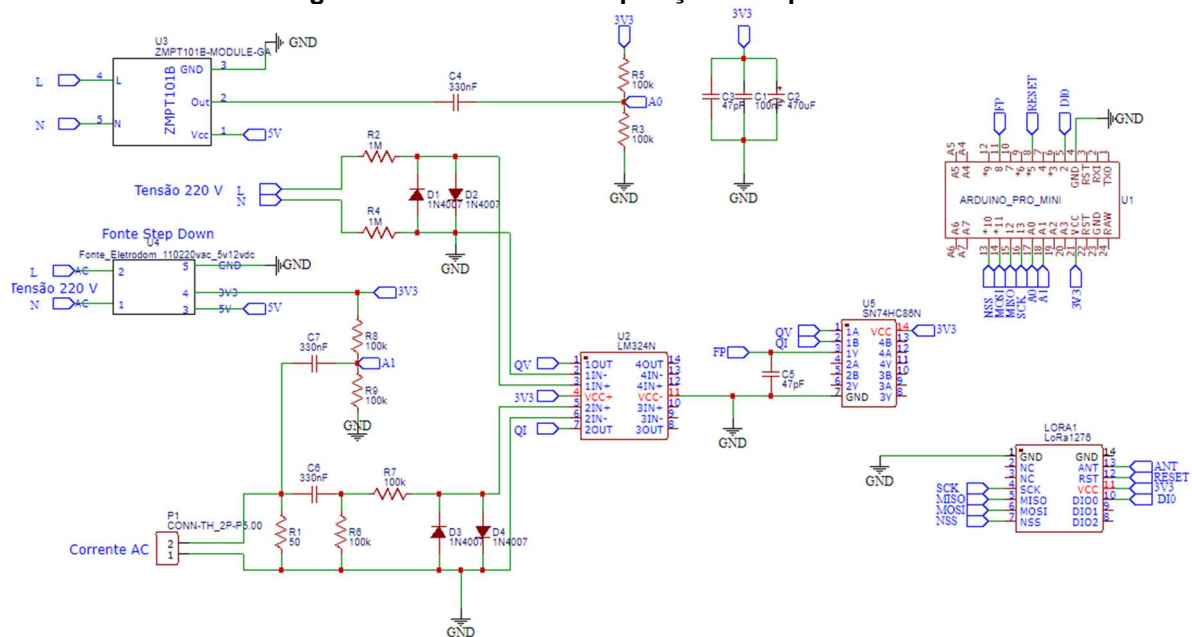
Outra tentativa feita para calcular o fator de potência foi realizado com dois amplificadores operacionais presentes no CI LM324N, juntamente com uma

porta lógica XOR presente no CI 7486, onde as ondas de tensão e corrente, após serem transformadas em ondas quadradas conforme visto na subseção “Fator de potência através de duas ondas quadradas” acima, eram conectadas às entradas da porta XOR. A porta XOR, por sua vez, realizava a comparação entre a onda de tensão e corrente.

Para o cálculo do fator de potência, pelo fato de que havia uma defasagem grande entre a onda de tensão e corrente com o uso do módulo sensor de tensão ZMPT101B, foi realizado o cálculo com o uso da tensão direta da rede, onde é transformada em uma onda quadrada com o uso de alguns resistores, diodos e um amplificador operacional. Entretanto, devido ao fato de ainda existir uma defasagem de aproximadamente 5 graus no cálculo do fator de potência e, também, por visar a segurança, esse método de medição de tensão foi posteriormente trocado por um transformador de tensão.

Foi obtido então na saída da porta lógica XOR, o tempo da defasagem entre as ondas de corrente e tensão elétrica, que, ao ser posteriormente enviado ao circuito de controle, era feito um cálculo para obter o valor do fator de potência. O diagrama completo do circuito de aquisição montado está sendo ilustrado na Figura 102.

Figura 102 – Circuito de aquisição com porta XOR

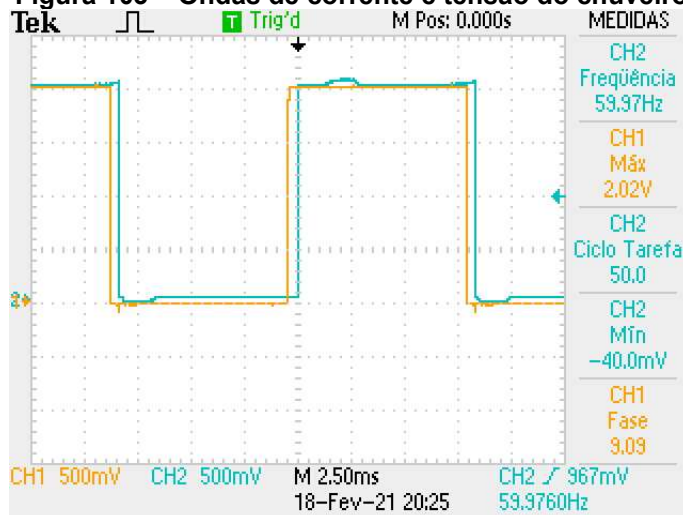


Fonte: O Autor

Resultados das medições do fator de potência com o circuito de medição utilizando uma porta XOR física

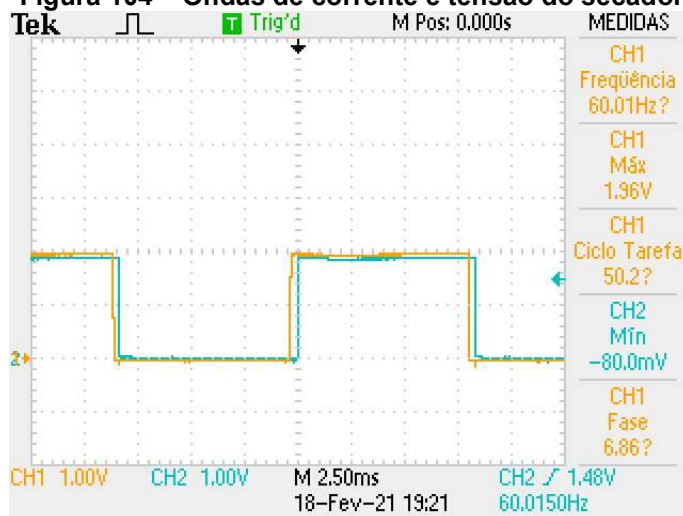
Foi montado o circuito ilustrado na Figura 102, onde, as ondas de tensão e corrente, já transformadas para ondas quadradas, estão ilustradas nas Figura 103 e Figura 104, de forma que, em ambas, a onda amarela representa a corrente e a onda azul representa a tensão. A medição foi aferida medindo-se a tensão da rede e a corrente do disjuntor para o caso do chuveiro e a corrente da tomada para o caso do secador. O campo “medidas” da fase, representa quantos graus a onda de corrente está atrasada em relação à onda de tensão.

Figura 103 – Ondas de corrente e tensão do chuveiro



Fonte: O Autor

Figura 104 – Ondas de corrente e tensão do secador

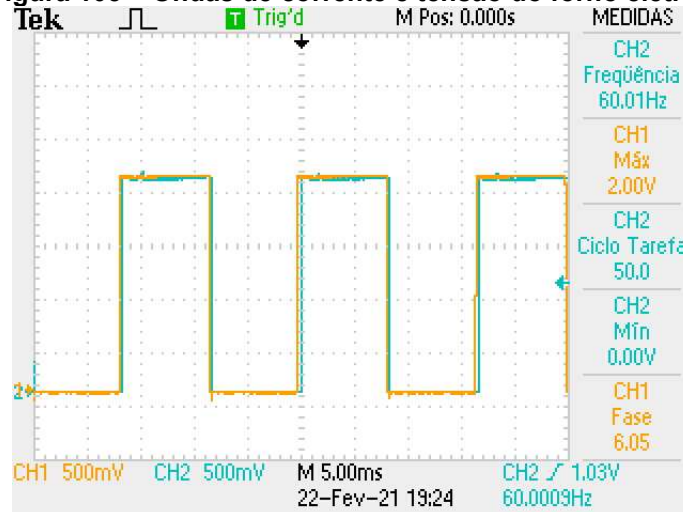


Fonte: O Autor

Para o caso do chuveiro, ao analisar-se a saída da porta XOR, o fator de potência resultante do cálculo feito pelo circuito de controle, foi unitário, possuindo uma diferença de 7 graus entre a onda de tensão e corrente. Já de acordo com a Figura 103, que ilustra a medição do osciloscópio das ondas de corrente e tensão, a diferença de fase entre ambas foi de aproximadamente 9 graus, dessa forma, encontrou-se uma diferença de 2 graus entre a medição feita pelo osciloscópio e o cálculo feito a partir das ondas de tensão e corrente comparadas em uma porta lógica XOR.

Já no caso do forno elétrico, as medições das ondas quadradas da onda de corrente (onda amarela) e tensão (onda azul) feitas pelo osciloscópio é ilustrada na Figura 105, onde foi medida uma diferença de aproximadamente 6 graus entre ambas ondas. Já no circuito de controle, após feitos os cálculos, obteve-se um fator de potência unitário, com uma diferença de ângulo de aproximadamente 4,8 graus. Dessa forma, encontrou-se uma diferença de 1,2 graus entre a medição feita pelo osciloscópio e o cálculo feito a partir das ondas de tensão e corrente comparadas em uma porta lógica XOR.

Figura 105 – Ondas de corrente e tensão do forno elétrico

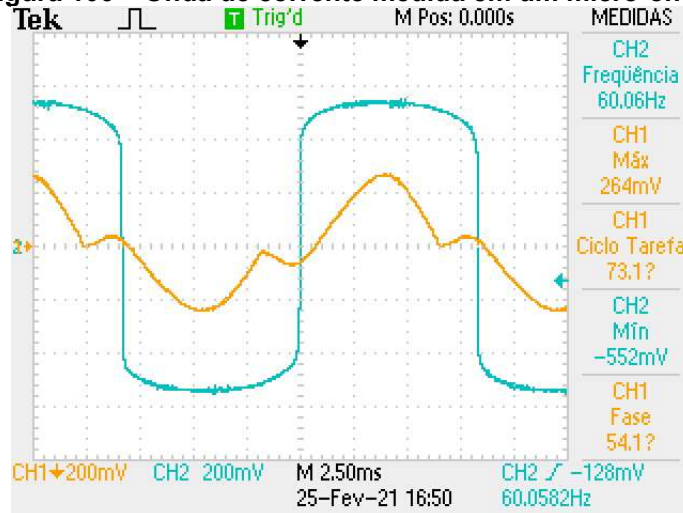


Fonte: O Autor

No caso do micro-ondas como carga, com as medições ilustradas na Figura 106, a onda senoidal da corrente é ilustrada como sendo a onda amarela do canal CH1, enquanto que, a onda de corrente já transformada para onda quadrada, é ilustrada como sendo a onda azul do canal CH2. Como pode-se perceber, a onda amarela não é puramente senoidal, dessa forma, a comparação entre a onda quadrada da tensão da residência e a onda quadrada da corrente não consegue

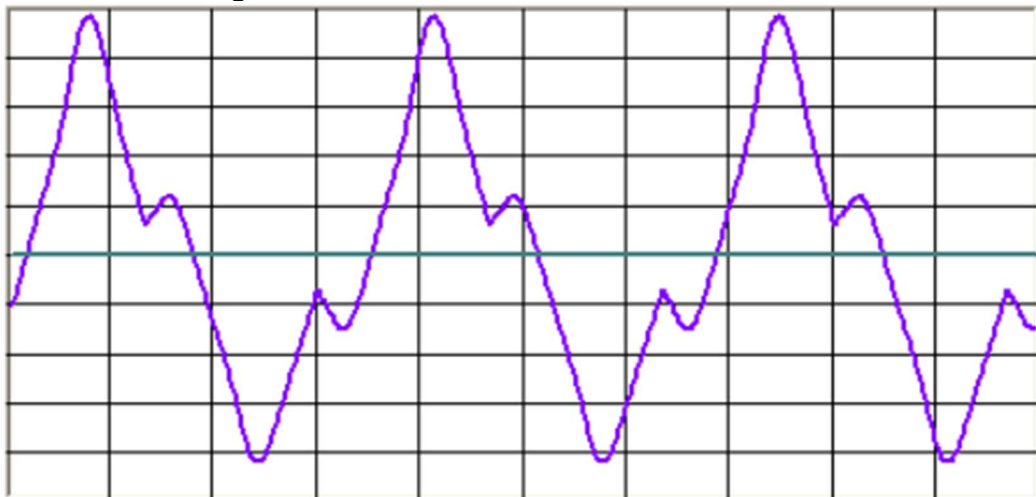
representar corretamente a diferença de tempo entre elas. Isso deve-se, principalmente, ao fato da onda de corrente possuir harmônicas, fazendo com que a onda cruze o nível de tensão mínimo de acionamento do amplificador operacional antes ou depois do esperado.

Figura 106 – Onda de corrente medida em um micro-ondas



Fonte: O Autor

Figura 107 – Onda de corrente de um micro-ondas

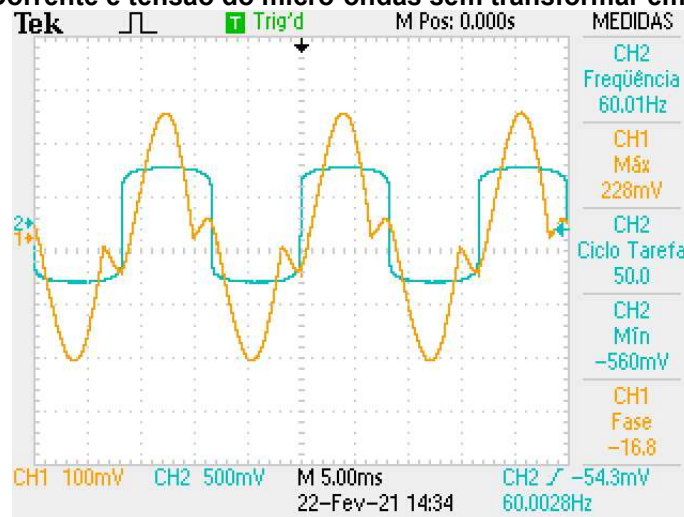


Fonte: Becirovic, Nikolic, Turkovic e Pavic (2012), adaptado pelo Autor

De acordo com as medições feitas com o osciloscópio para os sinais antes de serem transformados em ondas quadradas, a diferença de fase é de -16,8 graus, assim como pode-se visualizar na Figura 108. Já no caso das ondas quadradas medidas pelo osciloscópio, ilustrado pela Figura 109, a diferença de fase observada foi de aproximadamente -14,7 graus.

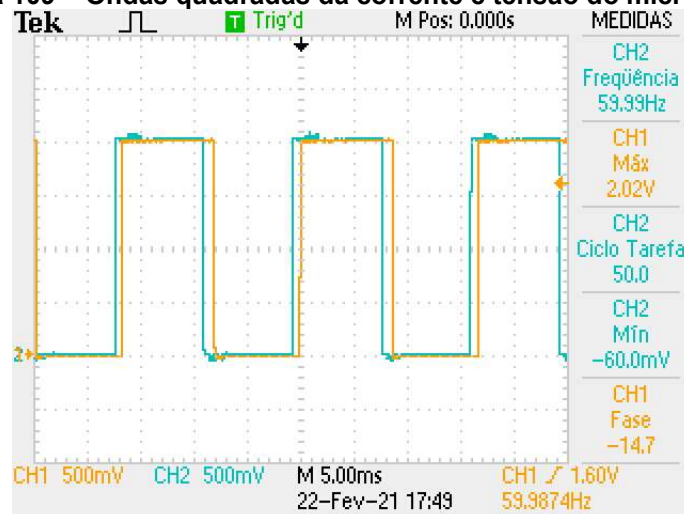
Dessa forma, houve uma diferença de 2,1 graus entre a medição feita com os sinais originais e os sinais após terem sido transformados em ondas quadradas, possivelmente devido ao fato de a onda de corrente do micro-ondas possuir harmônicas. Entretanto, para o cálculo feito com o circuito de controle, o fator de potência obtido foi de 0,95, enquanto que, a diferença de fase foi de aproximadamente 18 graus. O motivo do resultado não ser negativo deve-se ao fato do cálculo ser feito apenas verificando a diferença de fase entre as ondas de corrente e tensão a partir da saída da porta lógica XOR, que representa a diferença de tempo entre ambas ondas.

Figura 108 – Corrente e tensão do micro-ondas sem transformar em onda quadrada



Fonte: O Autor

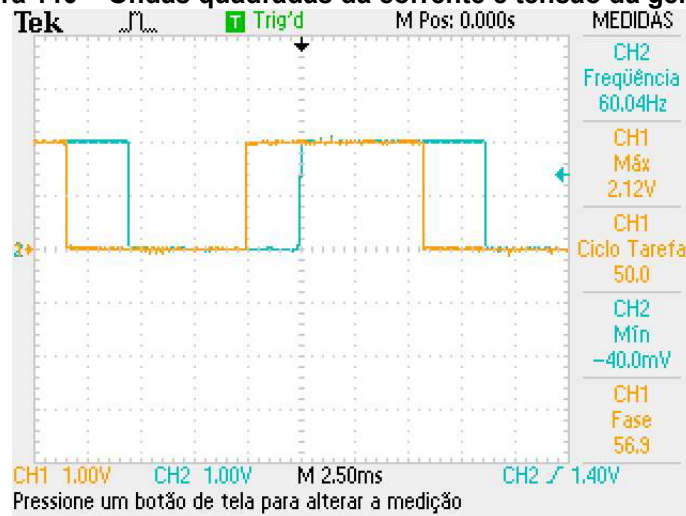
Figura 109 – Ondas quadradas da corrente e tensão do micro-ondas



Fonte: O Autor

Foi também testada como carga uma geladeira, que, ao se efetuar a medição com o osciloscópio, assim como pode-se visualizar na Figura 110 abaixo, a fase entre as ondas era de 56,9 graus, o que indicaria, calculando diretamente, um fator de potência de aproximadamente 0,54. Dessa forma, a partir dessa medição, notou-se a necessidade de ter mais uma escala no projeto, para que a medição para correntes menores pudesse ser feita corretamente, assim como é explicado na subseção 3.4 e 4.1.2.

Figura 110 – Ondas quadradas da corrente e tensão da geladeira



Fonte: O Autor

APÊNDICE B – Código empregado no circuito de controle para realizar as medições

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3 #include "EmonLib.h"
4
5 #define TEMPO 2000
6 unsigned long tempoMedicao;
7 unsigned long tempo = 0;
8
9 //Exporta a função sendPacket do código Comunicação LoRa
10 extern void sendPacket();
11
12 typedef struct
13 {
14     int numMedicoes;
15     String nome;
16     float potenciaReal;
17     float voltageRMS;
18     float currentRMS;
19     float powerFactor;
20     float potenciaAparente;
21     int numeroDispositivo = 1;
22     unsigned long timePassed;
23 }MEDICOES;
24
25 MEDICOES valores;
26
27 int contador = 0;
28
29 EnergyMonitor medidor;
30
31 void setup() {
32     // put your setup code here, to run once:
33     Serial.begin(115200);
34     medidor.voltage(A0, 200.2, 1.7); // Voltage: input pin, calibration, phase_shift
35     medidor.current(A1,41.55);
36     Serial.println("LoRa Sender");
37     if (!LoRa.begin(915E6)) { //Verifica se o módulo LoRa está funcionando
38         Serial.println("Starting LoRa failed!");
39         while (1);
40     }
41 }
42
43 void loop() {

```

```

44  medicoes();
45  }
46
47  void medicoes()
48  {
49    contador ++;
50    tempoMedicao = millis(); //Armazena o tempo após iniciar atual
51    //Chama a função da biblioteca EmonLib. 20 = numero passagens por 0
52    medidor.calcVI(20,2000); //2000 = tempo máximo para sair da função
53    //Verifica quanto tempo se passou para executar as medições
54    tempoMedicao = millis() - tempoMedicao;
55    if(tempoMedicao > 1500) //Caso maior que 1500, a energia está desligada
56    {
57      energiaDesligada();
58    }
59    //Armazena e soma os valores de tensão e corrente medidos
60    valores.voltageRMS += medidor.Vrms;
61    valores.currentRMS += medidor.Irms;
62    valores.powerFactor += medidor.powerFactor;
63
64    if(millis() - tempo >= TEMPO) //Caso chegar ao final do tempo definido
65    {
66      //Realiza as médias das medições feitas durante o TEMPO definido
67      valores.voltageRMS = (float)(valores.voltageRMS/contador);
68      valores.currentRMS = (float)(valores.currentRMS/contador);
69      valores.powerFactor = (float)(valores.powerFactor/contador);
70      valores.potenciaAparente = (float)(valores.voltageRMS*valores.currentRMS);
71      valores.potenciaReal = (float)(valores.potenciaAparente*valores.powerFactor);
72      valores.timePassed = millis() - tempo;
73      Serial.println("Tempo: " + (String)valores.timePassed + " ms");
74      sendPacket(); //Chama a função para enviar os dados via LoRa
75      tempo = millis(); //Armazena o tempo atual
76      //Exibe no Serial os valores calculados
77      Serial.println("Vrms medio igual a: " + (String)(valores.voltageRMS)+ " V");
78      Serial.println("Corrente media igual a: " + (String)(valores.currentRMS)+ " A");
79      Serial.println("Fator de potencia medio igual a: " + (String)(valores.powerFactor));
80      Serial.println("Pot aparente igual a: " + (String)(valores.potenciaAparente)+ " VA");
81      Serial.println("contador" + (String)contador);
82      Serial.println("-----");
83      //Zera as variáveis para começar a calcular novamente
84      contador = 0; valores.voltageRMS = 0; valores.potenciaReal = 0;
85      valores.currentRMS = 0; valores.powerFactor = 0; valores.potenciaAparente = 0;
86    }
87  }
88
89  //Zera os valores para que o ruído não seja considerado
90  void energiaDesligada()

```

```
91 {  
92     Serial.println("Energia desligada: " + (String)valores.voltageRMS);  
93     Serial.println("Tempo para medir: " + (String)tempoMedicao);  
94     medidor.Vrms = 0; medidor.Irms = 0;  
95     valores.potenciaAparente = 0; valores.potenciaReal = 0; valores.currentRMS = 0;  
96 }
```

APÊNDICE C – Código empregado no circuito de controle para transmitir as medições

```
1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3
4 int counter = 1;
5
6 extern MEDICOES valores;
7
8 void sendPacket() {
9   Serial.print("Sending packet: ");
10  Serial.println(counter);
11  String payload = criaPayload(); //Chama função para criar pacote
12  LoRa.beginPacket(); //Inicia o processo de envio do pacote
13  LoRa.print(payload);
14  LoRa.endPacket(); //Termina período de envio
15  counter++;
16 }
17
18 String criaPayload() //Cria pacote com as médias
19 {
20  //As variáveis são separadas por "|"
21  String payload = (String)valores.voltageRMS;
22  payload += "|";
23  payload += (String)valores.currentRMS;
24  payload += "|";
25  payload += (String)valores.powerFactor;
26  payload += "|";
27  payload += (String)valores.potenciaReal;
28  payload += "|";
29  payload += (String)valores.potenciaAparente;
30  payload += "|";
31  payload += (String)valores.timePassed;
32  payload += "|";
33  payload += counter;
34  payload += "|";
35  payload += (String)valores.numeroDispositivo;
36  Serial.println("V | I | FP | P | S | t | c | ID");
37  Serial.println(payload);
38  return payload;
39 }
```

APÊNDICE D – Código empregado no gateway para receber as medições

```

1  #include <SPI.h>
2  #include <LoRa.h>
3
4  //Importa a função de envio à IBM
5  extern void enviaMensagemIBM(String topico, float valor);
6  //Importa o vetor com o nome das variáveis que serão recebidas
7  extern String nomeVariavel[8];
8
9  void receivePacket() //Função para receber os pacotes
10 {
11   int packetSize = LoRa.parsePacket(); //Retorna o tamanho do pacote
12   if (packetSize) { //Verifica se o tamanho não é nulo
13     String pacote[8]; //Cria a variável para armazenar os caracteres do pacote
14     int indice = 0; //Indice para diferenciação das diferentes variáveis
15     while (LoRa.available()) { //Loop: Enquanto tiver caracteres para ler do pacote
16       char caractereRecebido = (char)LoRa.read(); //Armazena o caractere lido
17       if(caractereRecebido == '|') //Verifica se o caractere é um separador
18         {
19           indice++; //Incrementa o índice para armazenar no próximo indice
20         }
21       //Caso não for um separador, apenas armazena no indice atual
22       else {pacote[indice] += caractereRecebido;}
23     }
24     for(int i = 0; i < 8; i++) // Imprime no Serial o pacote recebido
25     {
26       Serial.print(pacote[i]);
27       Serial.println("|");
28     }
29     Serial.println();
30     Serial.print("RSSI do pacote recebido: ");
31     Serial.println(LoRa.packetRssi()); //Imprime no serial o valor RSSI do pacote
32     float valorFloat[8]; //Vetor float para armazenar os caracteres como valores
33     for (int i = 0; i < 8; i++) //Faz a transferência dos caracteres lidos
34     {
35       valorFloat[i] = pacote[i].toFloat();
36     }
37     //Chama a função responsável por enviar os dados para a plataforma da IBM
38     enviaMensagemIBM(nomeVariavel , valorFloat);
39   }
40 }
41
42 void sendPacket()
43 {
44   LoRa.beginPacket();

```

```
45 | int codigo = 7548;
46 | LoRa.print(codigo);
47 | Serial.println("Requisitada msg disp. 2");
48 | LoRa.endPacket();
49 | }
```

APÊNDICE E – Código empregado no gateway para enviar as medições recebidas

```

1  #include <WiFi.h>
2  #include <WiFiClient.h>
3  #include <PubSubClient.h>
4  #include <SPI.h>
5  #include <LoRa.h>
6  //Define os pinos SPI para o LoRa
7  #define ss 5
8  #define rst 14
9  #define dio0 2
10
11  const char* ssid = "DOUGLAS_BL"; //Nome do Wifi utilizado
12  const char* password = "douglas250565"; //senha do Wifi
13  #define ORG "x1t5nl" //Organização gerada ao criar o serviço IBM
14  #define DEVICE_TYPE "Gateway" //Tipo do dispositivo
15  #define DEVICE_ID "CC3159BF713C" //ID do dispositivo
16  //Token gerado ao cadastrar o dispositivo
17  #define TOKEN "Xu!p7C5kdzjg)7P4_j"
18  unsigned long lastMsg = 0; //variável para armazenar tempo
19  //Site para enviar os dados
20  char server[] = ORG ".messaging.internetofthings.ibmcloud.com";
21  char authMethod[] = "use-token-auth"; //Método de autenticação
22  char token[] = TOKEN;
23  //Identificação plataforma
24  char clientId[] = "d:" ORG ":" DEVICE_TYPE ":" DEVICE_ID;
25  //Nomes das variáveis para separá-las na mensagem JSON
26  String nomeVariavel[8] = {"Voltage","Current","FatorDePotencia","PotenciaReal",
27  "PotenciaAparente","Tempo","Contador","ID"};
28  WiFiClient wifiClient;
29  PubSubClient client(server, 1883, NULL, wifiClient);
30
31  //Prototipo de função externa
32  extern void receivePackage();
33  extern void sendPacket();
34
35  int contadorTeste = 0;
36
37  void setup() {
38    Serial.begin(115200);
39    Serial.println();
40    Serial.print("Connecting to ");
41    Serial.print(ssid);
42    WiFi.begin(ssid, password);
43    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED){//Verifica há conexão com o Wifi

```

```

44     delay(500);
45     Serial.print(".");
46 }
47 Serial.println("");
48 Serial.print("WiFi conectado, IP address: ");
49 Serial.println(WiFi.localIP()); //Exibe o IP da conexão
50 if (!client.connected()) { //Verifica se houve conexão com o servidor da IBM
51     Serial.print("Reconnecting client to ");
52     Serial.println(server);
53     //Verifica se conectou à plataforma
54     while (!client.connect(clientId, authMethod, token)) {
55         Serial.print(",");
56         delay(500);
57     }
58     Serial.println("Conectado à plataforma IBM");
59 }
60 while (!Serial);
61 Serial.println("LoRa Receiver");
62 LoRa.setPins(ss, rst, dio0);
63 if (!LoRa.begin(915E6)) { //Verifica se a conexão LoRa está funcionando
64     Serial.println("Starting LoRa failed!");
65     while (1);
66 }
67 }
68
69 void loop() {
70     client.loop(); //Atualiza a conexão MQTT
71     receivePacket(); //Verifica se há um pacote para receber
72 }
73
74 void reconnect() //Reconecta com o wifi e com o servidor IBM
75 {
76     Serial.print("Connecting to ");
77     Serial.print(ssid);
78     WiFi.begin(ssid, password);
79     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
80         delay(500);
81         Serial.print(".");
82     }
83     Serial.println("");
84
85     Serial.print("WiFi connected, IP address: ");
86     Serial.println(WiFi.localIP());
87
88     if (!client.connected()) {
89         Serial.print("Reconnecting client to ");
90         Serial.println(server);

```

```

91     while (!client.connect(clientId, authMethod, token)) {
92         Serial.print(".");
93         delay(500);
94     }
95     Serial.println("Bluemix connected");
96 }
97 }
98
99 //Função para enviar mensagens à plataforma da IBM
100 void enviaMensagemIBM(String topico[], float valor[])
101 {
102     String payload = "{\"d\":{"; //Cria a mensagem em formato JSON
103     for(int i = 0 ; i < 7; i++) //Loop para adicionar o topico e valores recebidos
104     {
105         payload += "\"";
106         payload += topico[i];
107         payload += "\":";
108         payload += (float)valor[i];
109         payload += ",";
110     }
111     //Adiciona a ultima variável à mensagem
112     payload += "\"";
113     payload += topico[7];
114     payload += "\":";
115     payload += valor[7];
116     payload += "}}";
117     //Imprime no Serial a mensagem a ser enviada à IBM
118     Serial.print("Sending payload: ");
119     Serial.println(payload);
120     //Cria o nome do tópico para envio
121     String nomeTopico = "iot-2/evt/";
122         nomeTopico += "medidas";
123         nomeTopico += "/fmt/json";
124     //Faz a publicação da mensagem JSON com o tópico "medidas"
125     if (client.publish((char*) nomeTopico.c_str(), (char*) payload.c_str())) {
126         Serial.println("Publish ok");
127     } else {
128         Serial.println("Publish failed");
129         reconnect(); //Refaz a conexão com a rede Wi-fi e à plataforma IBM
130     }
131     if(valor[7] == 1)
132     {
133         sendPacket();
134     }
135 }

```

APÊNDICE F – Funções principais utilizadas em nós do Node-Red

Função 1 - Separação de variável

1	msg.payload = msg.payload.d.Voltage;
2	msg.topic = "Voltage";
3	return msg;

Função 2 - Adição de variáveis de tempo à mensagem

1	msg.payload = msg.payload.d;
2	msg.payload.dia = new Date().getDate();
3	msg.payload.mes = new Date().getMonth() + 1;
4	msg.payload.ano = new Date().getFullYear();
5	msg.payload.horas = new Date().getHours();
6	msg.payload.minutos = new Date().getMinutes();
7	msg.payload.segundos = new Date().getSeconds();
8	msg.payload.timestamp = new Date().getTime();
9	return msg;

Função 3 – Cálculo da média diária

1	var somatorioPotencia = 0;
2	var somatorioCorrente = 0;
3	var somatorioPotAparente = 0;
4	var tempo = 0;
5	var tempoAtual = new Date().getTime();
6	var diffT;
7	horaMsg = flow.get("horaMsg");
8	minutoMsg = flow.get("minutoMsg");
9	var contador = 0;
10	var inicio = msg.payload.length - 1440;
11	if(inicio < 0) {inicio = 0;}
12	for(var i = inicio; i < msg.payload.length; i++)
13	{
14	tempo = tempoAtual - msg.payload[i].id;
15	if(tempo/1000 <= 86400)
16	{
17	somatorioPotencia += msg.payload[i].PotenciaReal;
18	somatorioCorrente += msg.payload[i].Current;
19	somatorioPotAparente += msg.payload[i].PotenciaAparente;
20	contador++;
21	}
22	}
23	//somatorioCorrente = somatorioCorrente/contador;
24	flow.set("somatorioPotencia",somatorioPotencia);

```
25 flow.set("somatorioCorrente",(somatorioCorrente/contador));  
26 flow.set("somatorioPotAparente",(somatorioPotAparente/contador));  
27 msg.payload = somatorioPotencia/contador;  
28 msg.topic = new Date().getDate();  
29 node.warn(somatorioPotencia/contador);  
30  
31 return msg;
```

APÊNDICE G – Função do *sender* para teste de distância

```

1  #include <SPI.h>
2  #include <LoRa.h>
3
4  #define MESSAGE "teste" //Conteúdo da mensagem enviada ao receptor
5  #define TEMPO 3000 //Intervalo de tempo entre cada envio de pacote
6  #define ZERARTEMPO 120000 //Tempo para calcular as médias e zerar contagens.
7  #define FESPALHAMENTO 11 //Valor que será mudado no receptor no MODO 1.
8  #define MODO 0 //0 = mensagem comum | 1 = mudança de fator de espalhamento
9  //Não esquecer de mudar o fator de espalhamento do Sender para ser a mesma
10 //do Receptor após mudar o fator do Receptor, caso contrário não terá conexão
11
12 unsigned int contadorEnviadas = 0; //Contador de mensagens enviadas
13 unsigned int contadorRecebidas = 0; //Contador de mensagens recebidas
14 unsigned long tempoAnterior; //Armazena último período onde foi mandada a msg
15 unsigned long tempoZerar; //Armazena último período que foi calculado a média
16 int enviou = 0;
17 String mensagemRecebida = "Aguardando";
18 String sentPacket = ""; //Variável onde é armazenado o último pacote enviado
19 int txPower = 20; //Ganho de potência na transmissão.
20 int spreadingFactor = 11; //Fator de espalhamento. Para haver comunicação
21 //Sender e Receiver precisam estar operando com o mesmo fator.
22 double rssiSoma=0; //Variável para armazenar o valor RSSI do pacote recebido
23 double rssiAtual = 0; //Variável para armazenar o valor do RSSI
24 double snrSoma=0; //Variável para armazenar o valor SNR do pacote recebido
25 double snrAtual = 0;
26
27 void enviarPacote(String mensagem)
28 {
29     contadorEnviadas++; //Incrementa o contador de mensagens enviadas
30     LoRa.beginPacket(); //Começa a sequencia para enviar algum pacote
31     if(MODO)
32     {
33         sentPacket = FESPALHAMENTO; //será apenas enviado o SF
34     }else
35     {
36         //O pacote enviado será a mensagem completa, por exemplo: 17|mensagem 25 .
37         sentPacket = (String)txPower + "|" + mensagem + " " + (String)contadorEnviadas;
38     }
39     LoRa.print(sentPacket); //Envia o pacote armazenado em sentPacket.
40     LoRa.endPacket(); //Finaliza a sequencia de enviar pacote
41     //O dispositivo não consegue receber pacotes enquanto estiver enviando
42     Serial.println("Pacote enviado: " + sentPacket);
43 }
44

```

```

45 void onReceive(int tamanho)
46 {
47   String receivedPacket = ""; //Irá armazenar o pacote recebido do Receptor
48   if(tamanho == 0) {return;} //Verifica se realmente recebeu um pacote.
49   while(LoRa.available()) //Continuará fazendo até chegar ao final do pacote.
50   {
51     receivedPacket += (char)LoRa.read(); //Preenche as letras da msg
52   }
53   mensagemRecebida = receivedPacket;
54   //Verifica se a mensagem enviada por último é igual a recebida do receptor.
55   if (receivedPacket != sentPacket) {
56     Serial.println("\n### Mensagem diferente ###");
57     return;
58   }else contadorRecebidas++; //Incrementa o contador de mensagens recebidas
59
60   //Serial.println(" | Mensagem Recebida do receptor: " + receivedPacket);
61
62   //Incremento dos resultados do pacote recebido (após 2 minutos são zerados)
63   rssiAtual = LoRa.packetRssi();
64   snrAtual = LoRa.packetSnr();
65   rssiSoma = rssiSoma + rssiAtual;
66   snrSoma = snrSoma + snrAtual;
67   Serial.print((String)sentPacket+"||"+(String)mensagemRecebida);
68   Serial.println("||"+(String)rssiAtual+"||"+(String)snrAtual);
69 }
70
71 void setup() {
72   Serial.begin(115200);
73   //LoRa.setPins(10, 5, 2);
74   if (!LoRa.begin(915E6)) {
75     Serial.println("Starting LoRa failed!");
76     while (!LoRa.begin(915E6))
77     {
78       Serial.println("falhou");
79       while(1);
80     }
81   }
82   LoRa.setTxPower(txPower); //Ganho de potência em dBm
83   //Define o fator de espalhamento com o valor definido no início do código
84   LoRa.setSpreadingFactor(spreadingFactor);
85   LoRa.setCodingRate4(5); //Define a taxa de código da comunicação
86
87   LoRa.receive(); //Coloca o dispositivo em recepção contínua
88   Serial.println();
89 }
90
91 void loop() {

```

```

92  if((millis()-tempoAnterior) >= TEMPO) //Envia pacote depois de TEMPO.
93  {
94      enviarPacote(MESSAGE);
95      tempoAnterior = millis();
96  }
97  //Caso o dispositivo receba um pacote
98  onReceive(LoRa.parsePacket());
99  if((millis()-tempoZerar) >= ZERARTEMPO) //A cada 2 minutos
100 {
101     if(contadorRecebidas > contadorEnviadas)contadorRecebidas=contadorEnviadas;
102     double per = ((double)contadorRecebidas/contadorEnviadas)*(double)100;
103     Serial.print("Pacotes enviados: " + (String)contadorEnviadas );
104     Serial.println( "| Pacotes recebidos: " + (String)contadorRecebidas);
105     Serial.print("RSSI: " + (String)(rssiSoma/contadorRecebidas));
106     Serial.print( "| SNR: " + (String)(snrSoma/contadorRecebidas));
107     Serial.println(" | PER: " + (String)(100-per) + "%");
108     Serial.print("Ganho: " + (String)(txPower));
109     Serial.println( " | Fator de espalhamento: " + (String)spreadingFactor + "\n");
110     Serial.println("-----");
111     //Próximos 2 minutos será feito o somatório novamente.
112     contadorRecebidas = 0;
113     contadorEnviadas = 0;
114     mensagemRecebida = "Aguardando";
115     rssiSoma = 0;
116     snrSoma = 0;
117     tempoZerar = millis();
118 }
119 }

```

APÊNDICE H – Função do *receiver* para teste de distância

```

1  #include <LoRa.h>
2  #include <SPI.h>
3  #define ss 5
4  #define rst 14
5  #define dio0 2
6  #define BAND 915E6 //Define a frequência de operação de seu dispositivo
7
8  int tamPacote=0;
9  int txPower = 17; //Ganho de potência na transmissão
10 int spreadingFactor = 11; //Fator de espalhamento.ispositivos Sender e Receiver
11
12
13 void setup() {
14   Serial.begin(115200);
15   LoRa.setPins(ss, rst, dio0);
16   if (!LoRa.begin(915E6)) { //Verifica se a conexão LoRa está funcionando
17     Serial.println("Starting LoRa failed!");
18     while (1){Serial.println(";");}
19   }
20   LoRa.setTxPower(20); //Define o ganho de potência em dBm
21   LoRa.setSpreadingFactor(spreadingFactor); //Define o fator de espalhamento
22   LoRa.setCodingRate4(5); //Define a taxa de código da comunicação
23   LoRa.receive(); //Coloca o dispositivo em recepção contínua
24   Serial.println("Aguardando mensagem");
25 }
26
27 void enviaResposta(String pacote)
28 {
29   LoRa.beginPacket(); //Começa a sequencia para enviar algum pacote
30   LoRa.setTxPower(txPower); //Configura o ganho
31   LoRa.setSpreadingFactor(spreadingFactor); //Configura o FP
32   LoRa.print(pacote); //Envia o pacote novamente ao Sender
33   Serial.println("Pacote enviado: " + pacote);
34   LoRa.endPacket(); //Finaliza a sequencia de enviar pacote
35   //Não consegue receber pacotes enquanto estiver enviando
36 }
37
38 void onReceive(int tamanhoPacote)
39 {
40   String pacote = ""; //Variável criada dentro da função para ser preenchida
41   if(tamanhoPacote) //Verifica se realmente recebeu um pacote
42   {
43     while(LoRa.available()) //Continuará fazendo até chegar ao final do pacote.
44     {

```

```

45     pacote += (char)LoRa.read(); //Preenche com as letras da mensagem recebida
46 }
47
48 if(tamanhoPacote<=2) //Quando Sender estiver no MODO1
49 {
50     spreadingFactor = pacote.toInt();
51 }else //Caso a mensagem for maior, irá verificar qual o numerador do pacote
52 {
53     txPower = pacote.toInt();
54 }
55 //Imprime os dados desejados no Serial
56 Serial.print("Pacote: " + pacote);
57 Serial.print(" | txPOWER: " + (String)txPower);
58 Serial.print(" | Tamanho pacote: " + (String)tamanhoPacote);
59 Serial.println(" | Fator de espalhamento: " + (String)spreadingFactor);
60
61     delay(10);
62     enviaResposta(pacote); //Envia o pacote recebido
63 }
64 }
65
66
67 void loop() {
68     onReceive(LoRa.parsePacket()); //Caso o dispositivo receba um pacote
69     //Serial.println("aguardandomsg");
70 }
71 void setup() {
72     Serial.begin(115200);
73     //LoRa.setPins(10, 5, 2);
74     if (!LoRa.begin(915E6)) {
75         Serial.println("Starting LoRa failed!");
76         while (!LoRa.begin(915E6))
77         {
78             Serial.println("falhou");
79             while(1);
80         }
81     }
82     LoRa.setTxPower(txPower); //Ganho de potência em dBm
83     //Define o fator de espalhamento com o valor definido no início do código
84     LoRa.setSpreadingFactor(spreadingFactor);
85     LoRa.setCodingRate4(5); //Define a taxa de código da comunicação
86
87     LoRa.receive(); //Coloca o dispositivo em recepção contínua
88     Serial.println();
89 }
90
91 void loop() {

```

```

92  if((millis()-tempoAnterior) >= TEMPO) //Envia pacote depois de TEMPO.
93  {
94      enviarPacote(MESSAGE);
95      tempoAnterior = millis();
96  }
97  //Caso o dispositivo receba um pacote
98  onReceive(LoRa.parsePacket());
99  if((millis()-tempoZerar) >= ZERARTEMPO) //A cada 2 minutos
100 {
101     if(contadorRecebidas > contadorEnviadas) contadorRecebidas = contadorEnviadas;
102     double per = ((double)contadorRecebidas/contadorEnviadas)*(double)100;
103     Serial.print("Pacotes enviados: " + (String)contadorEnviadas );
104     Serial.println( "| Pacotes recebidos: " + (String)contadorRecebidas);
105     Serial.print("RSSI: " + (String)(rssiSoma/contadorRecebidas));
106     Serial.print( "| SNR: " + (String)(snrSoma/contadorRecebidas));
107     Serial.println(" | PER: " + (String)(100-per) + "%");
108     Serial.print("Ganho: " + (String)(txPower));
109     Serial.println( " | Fator de espalhamento: " + (String)spreadingFactor + "\n");
110     Serial.println("-----");
111     //Próximos 2 minutos será feito o somatório novamente.
112     contadorRecebidas = 0;
113     contadorEnviadas = 0;
114     mensagemRecebida = "Aguardando";
115     rssiSoma = 0;
116     snrSoma = 0;
117     tempoZerar = millis();
118 }
119 }

```

APÊNDICE I – Código utilizado no dispositivo de teste

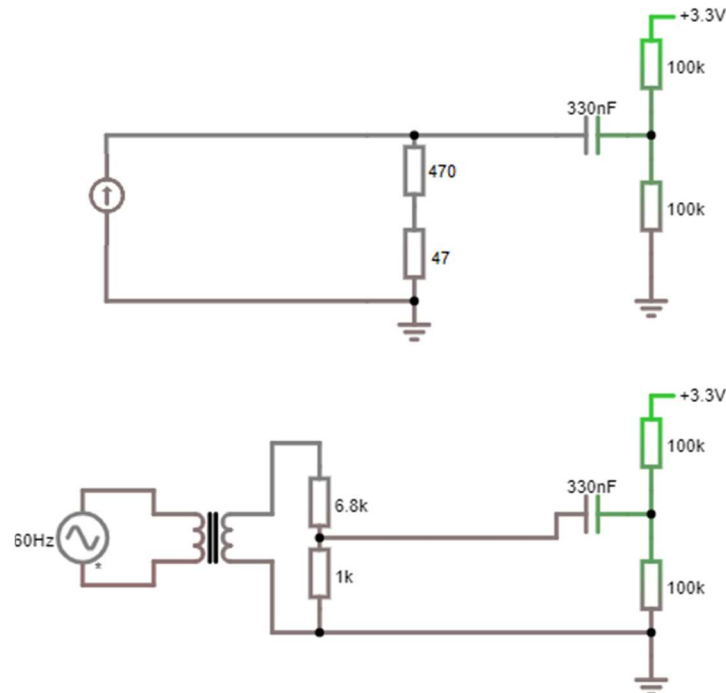
```
1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3
4 void enviarPacote()
5 {
6   LoRa.beginPacket(); //Começa a sequencia para enviar algum pacote
7   String payload = RandomJSON();
8   LoRa.print(payload);
9   LoRa.endPacket(); //Finaliza a sequencia de enviar pacote, continuando a esperar por outro pacote.
10 }
11
12 void onReceive(int tamanho)
13 {
14   String receivedPacket = "";
15   if (tamanho == 0) {
16     return; //Verifica se realmente recebeu um pacote.
17   }
18   while (LoRa.available()) //Continuará fazendo até chegar ao final do pacote.
19   {
20     receivedPacket += (char)LoRa.read(); //String receivedPacket com as letras da mensagem recebida.
21   }
22   if(receivedPacket == "7548")
23   {
24     enviarPacote();
25   }else
26   {
27     Serial.println("Código incorreto");
28     return;
29   }
30 }
31
32 void setup() {
33   Serial.begin(115200);
34   //LoRa.setPins(10, 5, 2);
35   if (!LoRa.begin(915E6)) {
36     Serial.println("Starting LoRa failed!");
37     while (!LoRa.begin(915E6))
38     {
39       Serial.println("falhou");
40       while (1);
41     }
42   }
43   LoRa.receive(); //Coloca o dispositivo em recepção contínua
44   Serial.println();
```

```
45 }
46
47 void loop() {
48   onReceive(LoRa.parsePacket());
49 }
50
51 String RandomJSON()
52 {
53   String payload;
54   float fpAleatorio = random(80,100)/100.0;
55   float variaveis[8] = {(float)random(210,230),(float)random(10),fpAleatorio,3,4,120000,0,2};
56   variaveis[3] = variaveis[0]*variaveis[1]*variaveis[2];
57   variaveis[4] = variaveis[0]*variaveis[1];
58   for(int i = 0; i < 6; i++)
59   {
60     payload += (String)variaveis[i];
61     payload += "|";
62   }
63   payload += (String)variaveis[7];
64   return payload;
65 }
```

APÊNDICE J – Escala para correntes menores com resistores

O sinal lido pelo circuito de controle, quando o circuito de medição era submetido à carga de uma fritadeira elétrica, continha harmônicas provenientes do circuito montado com amplificadores operacionais, dificultando assim sua leitura. Desta forma, construiu-se a escala para correntes menores utilizando-se resistores, assim como ilustrado na Figura 111. Neste circuito, para verificar a saída da escala para correntes menores, é analisado a queda de tensão apenas no resistor de $47\ \Omega$, enquanto que, para medir correntes até aproximadamente $9\ \text{A RMS}$, é feita a medição da queda de tensão das duas resistências.

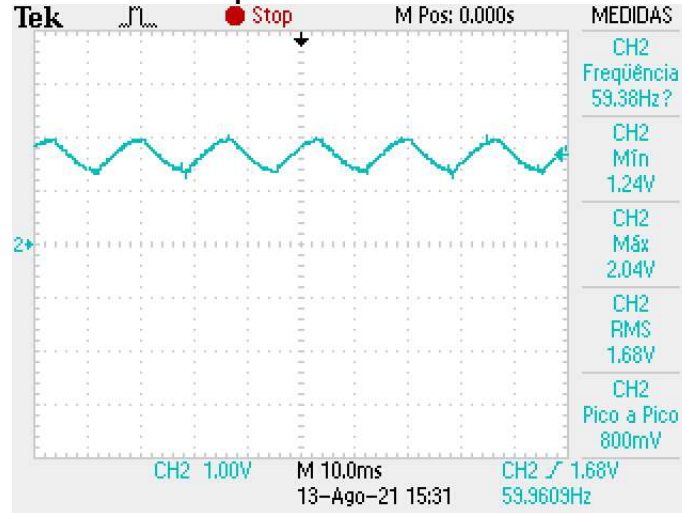
Figura 111 – Escala para correntes menores com resistores



Fonte: O Autor

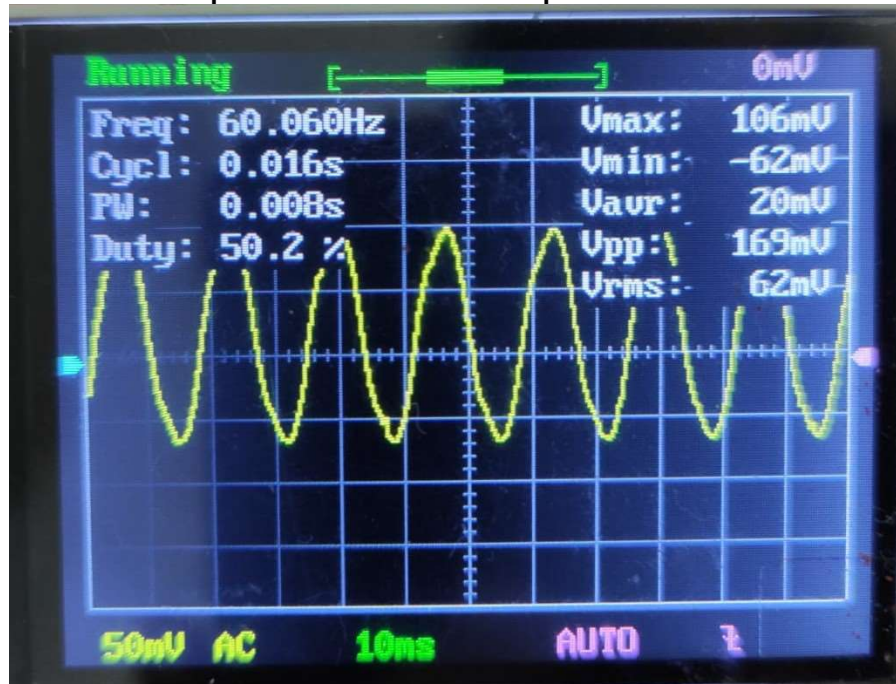
O sinal lido pelo circuito de controle quando a escala para correntes menores ainda era montada com amplificadores operacionais está ilustrado na Figura 112, enquanto que, a onda a ser lida pelo circuito de controle quando a escala é montada com resistores, está ilustrada na Figura 113. Em ambas figuras, foi utilizada a fritadeira elétrica como carga.

Figura 112 – Onda lida pelo circuito de controle com harmônicas



Fonte: O Autor

Figura 113 – Onda lida pelo circuito de controle após montar a escala com resistores



Fonte: O Autor

Utilizando-se a fritadeira elétrica como carga, encontrou-se um fator de potência de 0,8 com a nova escala, superior ao valor anterior de 0,62. Mediu-se então novamente o consumo da residência, averiguando-se principalmente os valores mínimos de consumo, que eram medidos pela escala para correntes menores. Os valores mínimos previamente medidos com o uso da escala anterior (valores estes que foram lidos durante a maior parte dos testes) foram de aproximadamente 0,84 A de corrente elétrica, 0,78 de fator de potência, 143,9 W de potência ativa e 181,9 VA de potência aparente.

Já com a nova escala, utilizando-se a mesma carga mínima utilizada durante os testes realizados, que era composta por um monitor, um computador, um notebook, uma geladeira e uma campainha, obteve-se os seguintes resultados: 1,67 A de corrente elétrica, 0,9 de fator de potência, 329,4 W de potência ativa e 366 VA de potência aparente. Dessa forma, observou-se que o consumo com a nova escala possui um consumo e fator de potência maior.

ANEXOS

ANEXO A – Tabelas das propriedades dos sensores (adaptado pelo autor)

Especificações do sensor

Sensitivity	Stimulus range (span)
Stability (short- and long-term)	Resolution
Accuracy	Selectivity
Speed of response	Environmental conditions
Overload characteristics	Linearity
Hysteresis	Dead band
Operating life	Output format
Cost, size, weight	Other

Material do sensor

Inorganic	Organic
Conductor	Insulator
Semiconductor	Liquid gas or plasma
Biological substance	Other

Método de detecção

Biological
Chemical
Electric, magnetic or electromagnetic wave
Heat, temperature
Mechanical displacement or wave
Radioactivity, radiation
Other

Fenômeno de conversão

Physical	Thermoelectric	
	Photoelectric	
	Photomagnetic	
	Magnetolectric	
	Electromagnetic	
	Thermoelastic	
	Electroelastic	
	Thermomagnetic	
	Thermooptic	
	Photoelastic	
	Other	
	Chemical	Chemical transformation
		Physical transformation
Electrochemical process Spectroscopy		
Other		
Biological	Biochemical transformation, Physical transformation	
	Effect on test organism Spectroscopy	
	Other	

Campos de aplicação

Agriculture	Automotive
Civil engineering, construction	Domestic, appliances
Distribution, commerce, finance	Environment, meteorology, security
Energy, power	Information, telecommunication
Health, medicine	Marine
Manufacturing	Recreation, toys
Military	Space
Scientific measurement	Other
Transportation (excluding automotive)	

Unidades de medida

Quantity	Name	Symbol	Defined by... (year established)
Length	Meter	m	...the length of the path traveled by light in vacuum in 1/299,792,458 of a second... (1983)
Mass	Kilogram	kg	...after a platinum-iridium prototype (1889)
Time	Second	s	...the duration of 9,192,631,770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium-133 atom (1967)
Electric current	Ampere	A	Force equal to 2×10^{-7} newton per meter of length exerted on two parallel conductors in vacuum when they carry the current (1946)
Thermodynamic temperature	Kelvin	K	The fraction 1/273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water (1967)
Amount of substance	Mole	mol	...the amount of substance which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kg of carbon 12 (1971)
Luminous intensity	Candela	cd	...intensity in the perpendicular direction of a surface of 1/600,000 m ² of a blackbody at temperature of freezing Pt under pressure of 101,325 newton per m ² (1967)
Plane angle	Radian	rad	(supplemental unit)
Solid angle	Steradian	sr	(supplemental unit)

Tipos de estímulo

Stimulus	
Acoustic	Wave amplitude, phase, polarization Spectrum Wave velocity Other
Biological	Biomass (types, concentration, states) Other
Chemical	Components (identities, concentration, states) Other
Electric	Charge, current Potential, voltage Electric field (amplitude, phase, polarization, spectrum) Conductivity Permittivity Other
Magnetic	Magnetic field (amplitude, phase, polarization, spectrum) Magnetic flux Permeability Other
Optical	Wave amplitude, phase, polarization, spectrum Wave velocity Refractive index Emissivity, reflectivity, absorption Other
Mechanical	Position (linear, angular) Acceleration Force Stress, pressure Strain Mass, density Moment, torque Speed of flow, rate of mass transport Shape, roughness, orientation Stiffness, compliance Viscosity Crystallinity, structural integrity Other
Radiation	Type Energy Intensity Other
Thermal	Temperature Flux Specific heat Thermal conductivity Other

ANEXO B – Tabelas dos planos para a plataforma IBM Watson IoT

Messaging

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
Maximum number of device types	50	1000
Maximum number of concurrently connected devices	500K	500K
Maximum number of registered devices	500	1 million
Maximum 'A' Applications - shared	1	10 shared subscriptions, each with 50 instances
Maximum 'a' applications - non-shared	500 API keys	2000 API keys
Maximum Data per Month	200 MB	unlimited
Device connections	10/sec	300/sec
Device-to-Cloud sends (MQTT) - Device	5 msg/sec or 20 KB/sec	10 msg/sec or 40 KB/sec
Device-to-Cloud sends (MQTT) - Gateway	50 msg/sec or 200 KB/sec	100 msg/sec or 400 KB/sec
Device-to-Cloud sends (MQTT) - Application	10 msg/sec or 40 KB/sec	20 msg/sec or 80 KB/sec
Device-to-Cloud sends (MQTT) - per Organization	5000 msg/sec	6000 msg/sec
Device-to-Cloud sends (HTTP) - Device	30 msg/min or 2 KB/sec	1 msg/sec or 4 KB/sec
Device-to-Cloud sends (HTTP) - Gateway	5 msg/sec or 20 KB/sec	10 msg/sec or 40 KB/sec
Device-to-Cloud sends (HTTP) - Application	1 msg/sec or 4 KB/sec	2 msg/sec or 8 KB/sec
Device-to-Cloud sends (HTTP) - per Organization	500 msg/sec	600 msg/sec
Cloud-to-Device sends (MQTT) - Device	1 msg/sec	2 msg/sec or 8 KB/sec
Cloud-to-Device sends (MQTT) - Gateway	10 msg/sec	20 msg/sec or 80 KB/sec
Cloud-to-Device sends (MQTT) - Application	10 msg/sec	20 msg/sec or 80 KB/sec
Cloud-to-Device sends (MQTT) - per Organization	1000 msg/sec	12K msg/sec
Cloud-to-Device sends (HTTP) - burst rate per Device	30 msg/min	30 msg/min
Cloud-to-Device sends (HTTP) - per Organization	1000 msg/sec	1200 msg/sec
Maximum number of inbound unacknowledged messages - per Device	10	10
Maximum number of inbound unacknowledged messages - per Gateway	1000	1000
Maximum number of inbound unacknowledged messages - per application connection	2000	2000

Maximum number of outbound unacknowledged messages - per Device	10	10
Device-to-Cloud persistence	24 hours	24 hours
Cloud-to-Device persistence	48 hrs (default). Max 7 days & 50 queue depth	48 hrs (default). Max 7 days & 50 queue depth
Maximum retry interval for delivering QoS 1 messages	Retry on reconnect	Retry on reconnect
Connection inactivity limit (keep alive interval)	Specified by client on connection	Specified by client on connection
WebSocket connection duration	Specified by client on connection	Specified by client on connection
Maximum message size	128 KB	128 KB
Maximum subscriptions per device	50	50
Maximum subscriptions per application	500	500
Queue depth - maximum buffered messages per subscription per device	50	50
Maximum buffered messages for 'A' applications	50K durable, 50K non-durable	50K durable, 50K non-durable

APIs

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
API calls	10/sec	10/sec

Rule Engine

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
Maximum rules per Organization	100	1000
Actions per rule	10	10

Device Management

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
Maximum size of diagnostic logs per device	500K	500K
Maximum historical versions of diagnostic logs held	2	2
Maximum time diagnostic logs held	7 days	7 days
Maximum number of actions initiated per in-flight message	200	200
Maximum number of devices per action	5000	5000

Last event cache

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
Maximum number of event IDs per device	5	5
Maximum number of formats	2	3
Expiry from last event cache	7 days	45 days

Extensions

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
Maximum number of services with which you can bind	12	12

Information management

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
Maximum nesting depth for JSON payload	5	5
Maximum JSON string size	512	512

Security

Metric	Platform Service Lite plan*	Platform Service plans**
Maximum number of custom roles	20	20
Maximum number of user members	1000	1000
Maximum number of devices in a resource group	300	300
Maximum number of resource groups assigned to a gateway	10	10
Maximum number of resource groups to which a device can belong	10	10