



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

MATEUS CÉLIO VIEIRA

**MEDIDOR DE CONSUMO ENERGÉTICO PARA NÓS SENSORES QUE UTILIZAM
LORA**

ITAJAÍ, 2023.

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

MATEUS CÉLIO VIEIRA

**MEDIDOR DE CONSUMO ENERGÉTICO PARA NÓS SENSORES
QUE UTILIZAM LORA**

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, 2023.

Ficha de Identificação da Obra
Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC

Vieira, Mateus Célio
V658m Medidor de consumo energético para nós sensores que utilizam LoRa /
Mateus Célio Vieira ; orientador, Roddy Alexander Romero Antayhua. --
2023.
[77] f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Itajaí,
Graduação em Engenharia Elétrica, Itajaí, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica. 2. Medidores elétricos. 3. Energia elétrica —
Consumo. 4. Sensores elétricos. I. Antayhua, Roddy Alexander Romero. II.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina —
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD 621.317

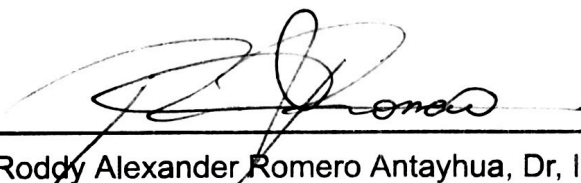
MEDIDOR DE CONSUMO ENERGÉTICO PARA NÓS SENSORES QUE UTILIZAM LORA

MATEUS CÉLIO VIEIRA

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, 22 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:



Roddy Alexander Romero Antayhua, Dr, IFSC (Orientador)

Mario de Noronha Neto, Dr, IFSC (Videoconferência)



Sergio Augusto Bitencourt Petrovic, Dr, IFSC

RESUMO

Nós sensores são dispositivos construídos para realizar o sensoramento, coleta e transmissão de dados e operarem de forma autônoma, não necessitando de uma infraestrutura preexistente de energia elétrica e/ou conectividade com a internet. Quando projetado, espera-se que um nó sensor opere pelo maior tempo possível sem a necessidade de intervenção para manutenção. Porém, a maior limitação de um nó sensor se encontra na capacidade limitada da bateria usada. A fim de contornar esta limitação, utiliza-se no projeto de um nó sensor componentes de baixo consumo, como rádios baseados no padrão Long Range (LoRa®) para a transmissão de dados, e funcionar em diferentes modos de operação, como entrar em modo ocioso para poupar energia, e ficar ativo apenas em curto espaço de tempo para coletar e realizar o envio das medições sendo a análise energética imprescindível durante a etapa de projeto de um nó sensor. Este projeto visa o desenvolvimento de um protótipo de medidor de consumo energético para caracterizar a autonomia de dispositivos nós sensores que operam utilizando o padrão LoRa®. Em sua construção foram utilizadas tecnologias acessíveis tanto de hardwares, como um Raspberry Pi e o sensor de corrente INA219, quanto softwares de projetos de código aberto. Sua interface foi desenvolvida com tecnologias web permitindo que qualquer dispositivo com acesso a um navegador *web* pudesse utilizar o sistema final. O seu desempenho foi analisado utilizando como referência um osciloscópio, realizando-se medições de um nó sensor comercial. O protótipo conseguiu captar o perfil de corrente do nó sensor comercial, sendo possível observar os diferentes níveis de corrente durante as diferentes operações realizadas, como o processamento e o envio e recebimento dos dados. Porém ao utilizar os valores medidos para estimar a autonomia do nó sensor, obteve-se um resultado que divergiu em 65,58% a mais do valor especificado pelo fabricante e apenas uma diferença de 8,21% entre o osciloscópio e o protótipo de medidor.

Palavras-chave: Medidor de consumo energético, IoT, nó sensor, código aberto.

ABSTRACT

Sensor nodes are devices built to perform sensing, data collection and transmission and operate autonomously, not requiring a pre-existing infrastructure of electrical power and/or internet connectivity. When designed, a sensor node is expected to operate for as long as possible without the need for maintenance intervention. However, the biggest limitation of a sensor node is the limited capacity of the battery used. In order to overcome this limitation, low consumption components are used in the design of a sensor node, such as radios based on the Long Range (LoRa®) standard for data transmission, and operate in different modes of operation, such as entering idle mode to save energy, and being active only in a short time to collect and send measurements, being the energy analysis essential during the design stage of a sensor node. This project aims to develop a prototype of an energy consumption meter to characterize the autonomy of sensor node devices operating using the LoRa® standard. In its construction was used accessible technologies of both hardware, such as a Raspberry Pi and the INA219 current sensor, and open source project software. Its interface was developed with web technologies allowing any device with access to a browser to use the final system. Its performance was analyzed using an oscilloscope as a reference, taking measurements from a commercial sensor node. The prototype was able to capture the current profile of the commercial sensor node, making it possible to observe the different current levels during the different operations it performs, such as processing, sending and receiving data. However, when using the measured values to estimate the autonomy of the sensor node, a result was obtained that differed by 65.58% more than the value specified by the manufacturer and only a difference of 8.21% between the oscilloscope and the prototype meter.

Key-words: Energy consumption meter, IoT, sensor nodes, open source.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Definição do problema	3
1.3 Objetivo geral	4
1.4 Objetivos específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Potência elétrica	5
2.2 Sensores de corrente	5
2.2.1 Sensores magnéticos	6
2.2.1.1 Transformador de corrente	6
2.2.1.2 Bobina de Rogowski	7
2.2.1.3 Sensor por efeito Hall	8
2.2.2 Sensores transistorizados	9
2.2.3 Sensores resistivos	10
2.3 Medição de corrente pelo osciloscópio	12
2.4 LoRa®	14
2.5 LoRaWAN®	16
2.6 Nó sensor	19
2.7 Modelagem do consumo do nó sensor	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Materiais	23
3.1.1 Raspberry Pi 3 Modelo B	23
3.1.2 Sensor de corrente INA219	24
3.1.3 Plataforma EMPIOT	24
3.1.4 Osciloscópio TBS1062	26
3.1.5 Raspberry PI OS	27
3.1.6 GNU Octave	27
3.1.7 Nó sensor comercial NIT 21LI	28
3.2 Métodos	29
3.2.1 Configuração do módulo INA-219	29
3.2.2 Build do software EMPIOT no RPi	29
3.2.3 Alterações realizadas no software EMPIOT	31
3.2.5 Aplicação web	32
3.2.6 Desenvolvimento do servidor web	33
3.2.6.1 Gerenciando o processo empiot	33
3.2.6.2 Servindo a aplicação cliente	34
3.2.6.3 Gerenciando a comunicação entre a aplicação cliente e o servidor	34
3.2.6.4 Gerenciando o processo do servidor	35
3.2.7 Desenvolvimento da aplicação cliente	35
3.2.8 Configuração do RPi como ponto de acesso sem fio (AP)	36
3.2.9 Construção do hardware	38
3.2.10 Medição do nó sensor comercial	40
3.2.10.1 Utilizando o osciloscópio	40

3.2.10.2 Utilizando o protótipo de medidor	43
3.2.10.2 Medição dos valores de resistência	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Plataforma final e seu uso	46
4.2 Resultados das medições do nó sensor comercial	53
4.2.1 Medições do modo ativo	53
4.2.2 Medições do modo ocioso	59
4.2.3 Estimativa de consumo do nó sensor	66
5 CONCLUSÃO	70
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O termo internet das coisas (IoT) refere-se a rede de objetos (“coisas”) conectados que embarcam tecnologias de sensoriamento, conectividade e processamento de dados a fim de possibilitar a troca de informação entre operadores e/ou outros objetos conectados (SIVARAMAN et al., 2018). Este conceito tecnológico vem trazendo diversas inovações, possibilitando um aumento na eficiência, sustentabilidade e segurança nos mais variados segmentos, como o da agricultura, transporte e logística, cidades inteligentes, industrial, construção civil, área médica, entre outros (KUHLINS et al., 2020). Estima-se que até 2025 mais de 75 bilhões de dispositivos IoT estarão conectados à internet (MAAYAN, 2020).

Para alcançar a conectividade desejada entre os objetos, uma solução em IoT faz uso de diversos padrões e tecnologias referente a sensores, infraestrutura de informação e comunicação e unidades de processamento de dados (THOMAS; RAD, 2017). Para realizar o sensoriamento, coleta e transmissão de dados, são desenvolvidos dispositivos, conhecidos por nós sensores, que objetivam o tamanho reduzido, alimentados por bateria e baixo custo (HEALY; NEWE; LEWIS, 2008). Com estes dispositivos é possível monitorar ambientes desprovidos de infraestrutura, como fornecimento de energia e conexão com a internet, permitindo assim abranger grandes áreas (SHARMA; BANSAL; BANSAL, 2014). Por serem dispositivos alimentados por meio de bateria, o tempo de operação se torna finito, sendo importante desenvolver nós sensores que necessitem de pouca energia para realizar suas tarefas básicas, havendo sempre um equilíbrio entre disponibilidade de dados e tempo de vida.

Tecnologias de redes de baixo consumo e longo alcance (*Low-Power Wide-Area Network*), ou LPWAN, são preferíveis para este tipo de dispositivo por possibilitarem a transmissão de dados a distância de dezenas de quilômetros com pouco consumo em troca de uma baixa transmissão de dados (PETRIĆ et al., 2016). Uma tecnologia que traz estas características é o *LoRa®*. *LoRa®* é uma especificação em camada física (*PHY layer*) para comunicação sem fio que utiliza uma técnica de modulação baseada na tecnologia de *chirp spread spectrum* (SEMTECH, 2022). Operando sobre a camada física *LoRa®*, o protocolo de rede LoRaWAN, desenvolvido e mantido pela LoRa Alliance, define a topologia de rede, segurança e é responsável pelo gerenciamento de parâmetros de comunicação

como a frequência, taxa de transmissão de dados e potência de transmissão (LORA ALLIANCE, 2015).

Quando projetado, esperasse que um nó sensor opere pelo maior tempo possível sem a necessidade de intervenção para manutenção. Porém a maior limitação de um nó sensor se encontra na capacidade limitada da bateria usada. A fim de contornar esta limitação, um nó sensor pode ser projetado utilizando componentes de baixo consumo, como rádios baseados no padrão *LoRa®* para a transmissão de dados, e funcionar em diferentes modos de operação, como ficar ocioso para poupar energia e periodicamente ficar ativo apenas em curto espaço de tempo para coletar e realizar o envio das medições. Outra solução que pode ser empregada ao projeto, caracteriza-se por colheita de energia (*Energy harvesting*). Neste processo, o nó sensor é construído de forma a captar, armazenar e utilizar a energia proveniente do ambiente em que está inserido, como solar, eólica e mecânica, possibilitando uma maior autonomia assim como aumentar o seu tempo de operação no modo ativo (SUDEVALAYAM; KULKARNI, 2011).

Sendo assim, para evitar custos desnecessários, empregando as soluções citadas de forma eficiente, a realização de uma análise energética do dispositivo com o objetivo de estimar o seu consumo se torna indispensável. É possível, por meio de análises e modelagens teóricas, estimar o consumo energético de um nó sensor. Apesar de serem métodos mais acessíveis, há certas limitações e dificuldades como, informações incompletas nas folhas de dados dos componentes referente ao consumo dos diferentes modos de operação, variação no consumo de um microcontrolador de acordo com os recursos utilizados, dificuldade em estimar a energia consumida por todos os outros componentes que compõem o circuito de uma placa, influência do algoritmo no consumo e a não consideração da energia necessária durante o processo de despertar do dispositivo que pode acabar contribuindo significante por conta de sua recorrência (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018).

Por conta disso, é importante realizar uma análise energética por meio de medições empíricas, utilizando uma plataforma capaz de captar as correntes dinâmicas durante os diferentes modos de operação de um nó sensor, sendo útil não apenas durante a avaliação final do dispositivo, mas também durante o seu desenvolvimento, possibilitando analisar o impacto de melhorias feitas por meio dos algoritmos e revelar possíveis problemas (ANDERSEN; HANSEN, 2009).

Entretanto, equipamentos capazes de realizar análise energética geralmente possuem um alto custo e funcionalidades restritas como os analisadores de corrente CX3324A da *Keysight®* (KEYSIGHT, 2023) e *Oti Arc* da *Qoitech®* (QOITECH., 2023).

1.1 Justificativa

O estudo do projeto e desenvolvimento de tecnologias voltadas para o sensoriamento remoto sem fio beneficia diversos setores produtivos que possuem uma ampla área para monitoramento, que era até então inviável por conta do alto custo envolvido para prover a infraestrutura necessária. Com este cenário em mente, nos últimos anos, foram desenvolvidas diversas tecnologias buscando estabelecer uma comunicação de longo alcance e baixo consumo. Dentre algumas tecnologias para este tipo de aplicação, a tecnologia *LoRa®* vem ganhando bastante relevância para a comunicação sem fio dos nós sensores por ser capaz de transmitir dados a quilômetros de distância e com pouco consumo energético. Sendo assim o estudo será voltado apenas para nós sensores baseados nesta tecnologia. Como os dispositivos para este tipo de aplicação são usualmente alimentados por meio de baterias, é indispensável a realização de uma análise e estimativa do consumo energético tanto na fase de projeto quanto na validação e ajuste do protótipo na fase de implementação. Porém, por conta de equipamentos para este fim possuírem um alto valor e serem soluções proprietárias que não permitem estender seu funcionamento, é interessante buscar fazer uso de soluções de *hardware* e *software* que visam o baixo custo e possibilitam estender suas funcionalidades além de permitir que seja reproduzível por outros interessados.

1.2 Definição do problema

Os equipamentos nós sensores que realizam medições uma ou mais grandezas e transmitem essa informação utilizando a tecnologia *LoRa®* devem funcionar por longos períodos sem qualquer manutenção. Como, em grande parte, estes são alimentados por baterias, também se faz necessário que sejam projetados para que consumam o mínimo de energia possível.

Para reduzir o consumo de energia usam-se microcontroladores em modo ocioso, onde partes não essenciais para seu funcionamento são desligadas completamente até que seja necessário ligá-las novamente.

Para assegurar que o requisito de economia de energia seja atingido, desde o projeto até a validação do equipamento em seus estágios finais de desenvolvimento, é necessário o uso de instrumentos de medição de potência especializados para baixos valores de potência possibilitando a obtenção do perfil de consumo de um nó sensor e assim realizar o cálculo de autonomia do mesmo.

Os equipamentos disponíveis atualmente têm custos elevados e pouca flexibilidade, dificultando ou inviabilizando novas pesquisas e produtos para monitoramento que utilizem a tecnologia *LoRa*® e encarecendo os nós sensores disponíveis atualmente. Assim, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para medir o consumo de nós sensores que sejam mais acessíveis e com a possibilidade de serem melhoradas e/ou integradas a outros sistemas.

1.3 Objetivo geral

Desenvolver uma solução em *hardware* e *software* de um medidor de consumo energético com uma interface *web* que seja capaz de medir a autonomia de nó sensores de baixo consumo que participam de uma rede de comunicação *LoRa*®.

1.4 Objetivos específicos

- a) Pesquisar por métodos e soluções para a análise energética de dispositivos sem fio de baixo consumo;
- b) Construir um protótipo de medidor com uma interface *web* capaz de realizar a caracterização do consumo energético de dispositivos de baixo consumo;
- c) Validar o funcionamento do protótipo utilizando como referência equipamentos de bancada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Potência elétrica

A potência é definida como o consumo ou geração de energia por unidade de tempo, ou seja:

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} \left[\frac{J}{s} \right] \quad (1)$$

De acordo com o SI, sua unidade é *joules* por segundo, também denominada de *watt*.

Os conceitos de potência e energia se relacionam com os conceitos de tensão e corrente elétrica. A aplicação de tensão elétrica em um circuito causa movimento de elétrons livres, ou seja, uma corrente. Pela definição da tensão, sabemos o gasto de energia para mover cada *coulomb* de carga e pela definição de corrente, pressupõe-se um consumo contínuo de energia que depende da quantidade de cargas se movendo por unidade de tempo, ou seja, a potência é proporcional a ambas tensão e corrente. Matematicamente, essa relação pode ser obtida pelo teorema da substituição (NILSSON; RIEDEL, 2015):

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = \frac{dW(t)}{dq} \cdot \frac{dq(t)}{dt} = v \cdot i \quad (2)$$

Assim, podemos saber a energia gerada ou consumida por um circuito ou componente multiplicando a tensão e a corrente nos seus terminais.

2.2 Sensores de corrente

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2010), um sensor é um dispositivo que é afetado por um fenômeno físico de forma a converter energia da grandeza que ela se encontra no meio natural para um outro, transmitindo a informação para que esta possa ser usada para analisar o objeto medido.

Se aplicarmos essa definição a sensores de corrente, encontramos que um sensor de corrente converte informação na forma de energia da grandeza de *ampère* para outra, em que é possível medir e analisar esta corrente. Há vários tipos

de sensores de corrente, de acordo com sua finalidade e com a forma que interagem com a corrente e a grandeza de saída.

Os sensores de corrente podem ser divididos de duas formas, de acordo com o método de medição ou de acordo com a forma que são ligados ao circuito em que a medição será feita (YARBOROUGH, 2015).

Conforme o método, há três grupos, os sensores magnéticos, os sensores resistivos e os sensores transistorizados. Já conforme o método de ligação, podemos dividi-los em sensores diretos (englobando os resistivos e transistorizados) e sensores indiretos (englobando os magnéticos). Todos os grupos têm suas vantagens e desvantagens que devem ser consideradas num momento de escolha (YARBOROUGH, 2015).

2.2.1 Sensores magnéticos

Sensores de corrente magnéticos são aqueles que usam a relação entre corrente e a força magnética como princípio de funcionamento, inferindo o comportamento de uma corrente pelo comportamento do campo magnético que ela gera.

Por utilizarem o campo magnético, não necessitam ser conectados ao circuito em que está a corrente a ser medida, assim sendo todos se caracterizam como sensores indiretos.

Os principais sensores de corrente magnéticos são o transformador de corrente, a bobina de Rogowski e o sensor por efeito Hall.

2.2.1.1 Transformador de corrente

Este tipo de sensor utiliza um transformador que converterá a corrente que passa pelo primário em uma tensão no secundário. A corrente no primário e a tensão no secundário seguem a proporção dada pela relação de espiras, que idealmente tem uma razão de $1:N$, de forma a reduzir ao máximo a impedância nos terminais do primário e, assim, a interferência na corrente medida (GUPTA, 2019).

As vantagens desse tipo de sensor são sua robustez, a capacidade de medir correntes altas, o circuito simples, sem a necessidade de circuitos eletrônicos (GUPTA, 2019), e o baixo ruído no sinal de saída (YARBOROUGH, 2015) e suas

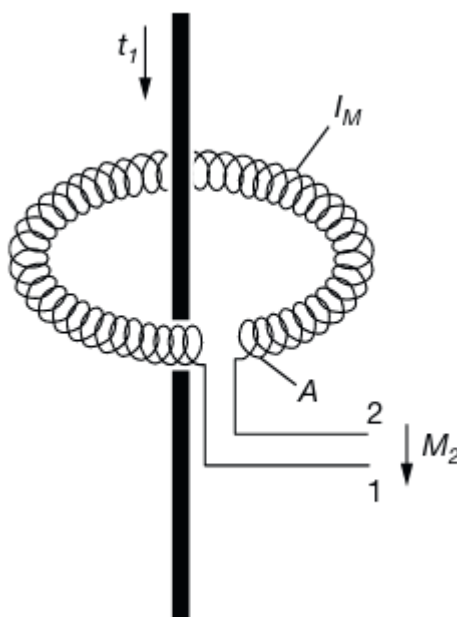
desvantagens são a distorção na onda da corrente por conta do fenômeno da histerese, o problema de saturação que ocorre em valores particularmente altos de corrente, o alto custo de aquisição e manutenção deste tipo de sensor (GUPTA, 2019) e a impossibilidade de uso para medição de correntes contínuas (YARBOROUGH, 2015).

2.2.1.2 Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski, inventada pelo físico alemão Walter Rogowski, utiliza uma bobina helicoidal com núcleo de ar que circunda o fio condutor por onde passa a corrente a ser medida conforme a figura 1 (GUPTA, 2019). Sua saída é um sinal de tensão proporcional à variação da corrente medida, sendo assim necessário um circuito adicional para convertê-la em uma tensão proporcional à corrente medida (GUPTA, 2019).

É similar ao transformador de corrente, porém utilizando um núcleo de ar. Pode ser visto como uma versão menor e de menor custo do transformador de corrente (YARBOROUGH, 2015).

Figura 1: Diagrama simplificado de uma bobina de Rogowski.



Fonte: Yarborough, 2015.

Suas vantagens são o baixo custo, é uma boa solução para detectar mudanças bruscas de corrente, o manuseio da bobina secundária é seguro (GUPTA, 2019), tem uma resposta rápida, um sinal de saída bem linear e pelo tamanho pequeno e bobina aberta, é de fácil manuseio e pode ser usado para medir correntes em instalações sem a necessidade de desconexões ou desligamento (YARBOROUGH, 2015). Suas desvantagens são a impossibilidade de uso com correntes contínuas e a baixa sensibilidade, especialmente se comparado com o transformador de corrente (GUPTA, 2019).

2.2.1.3 Sensor por efeito Hall

São sensores que têm como princípio de funcionamento o efeito Hall, descoberto pelo físico americano Edwin Herbert Hall (GUPTA, 2019). O efeito Hall é o aparecimento de uma diferença de potencial num condutor por onde passa uma corrente quando este está imerso em um campo magnético. A diferença de potencial é perpendicular às direções do campo e da direção da corrente e é proporcional a intensidade do campo (YARBOROUGH, 2015).

Em sua essência, são sensores de campo magnético, mas podem ser utilizados como sensores de corrente por conta do campo magnético gerado por correntes elétricas, inferindo-se a corrente por seu campo magnético (GUPTA, 2019).

Suas vantagens são a sua imensa versatilidade, sendo usado em aplicações desde velocímetros até a medição de corrente em sistemas de *smart grid* (GUPTA, 2019), a baixa potência que consomem mesmo com correntes altas (YARBOROUGH, 2015), podem ser usados para correntes contínuas e alternadas e com frequências altas (GUPTA, 2019). Suas desvantagens são seu custo, o baixo sinal de tensão que torna amplificadores de baixo ruído necessários (GUPTA, 2019), o efeito da temperatura não é linear e requer um circuito para compensação, a escala de medição reduzida e é suscetível a campos magnéticos externos (YARBOROUGH, 2015).

2.2.2 Sensores transistorizados

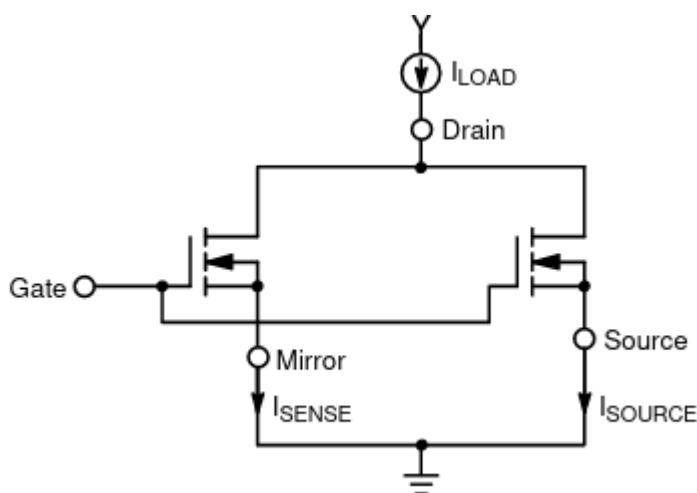
Circuitos transistorizados também podem ser usados como sensores de corrente pelas relações entre os terminais ou pelas resistências entre seus terminais, como a resistência R_{ds} em MOSFETS (YARBOROUGH, 2015).

No caso do uso das resistências, as vantagens em relação a sensores resistivos é a possibilidade de uso do transistor para ambos medição de corrente e controle da carga, o que é particularmente útil em circuitos de compensação e proteção de sobrecorrente, reduzindo perdas e simplificando o circuito. As desvantagens são a não linearidade dessas resistências, especialmente em relação a influência da temperatura, o que pode requerer um circuito de compensação (YARBOROUGH, 2015).

Outra possibilidade é o uso de circuitos de medição a base de transistores, que convertem corrente em tensão por meio de um circuito de transistores. Um exemplo de circuito, conforme a figura 2, são MOSFETs sensores de corrente, em que dois MOSFETs são ligados em paralelo, com exceção dos terminais *source*, de forma a que um deles vire um “espelho” do outro, que um “sensor” da corrente que passa pelo outro MOSFET (YARBOROUGH, 2015).

Os dois transistores são construídos de forma a que suas impedâncias se casem em uma proporção determinada de forma a uma fração da corrente da carga passar pelo MOSFET sensor quando eles forem ativados, dado que a corrente se dividirá na razão inversa das impedâncias. Por fim, coloca-se um resistor entre os terminais *sources* e a corrente pode ser medida por meio da tensão que surge neste resistor (ONSEMI, 2017). A vantagem deste circuito é que as perdas são reduzidas em comparação com sensores resistivos, porém com as desvantagens de menor linearidade na medição

Figura 2: Circuito de um MOSFET sensor de corrente.



Fonte: Onsemi, 2017.

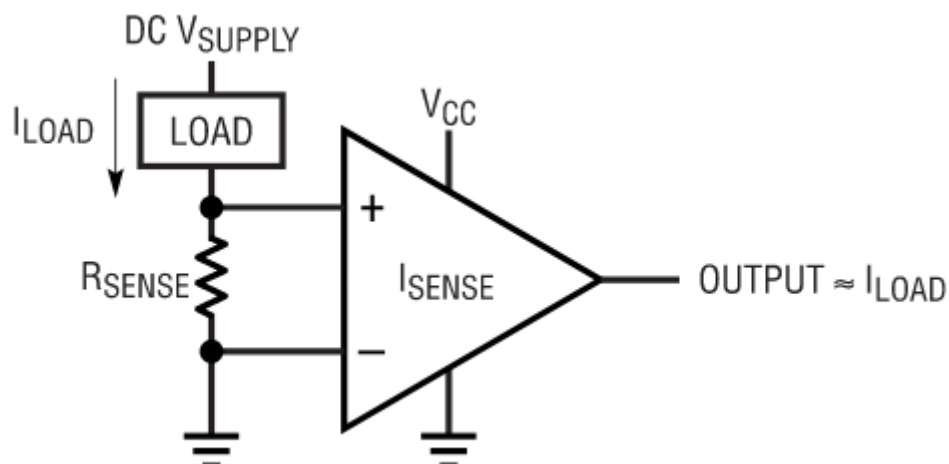
2.2.3 Sensores resistivos

É um sensor baseado na lei de Ohm colocando-se um resistor de baixo valor, denominado de resistor *shunt* em série com a carga de forma que a corrente a ser medida também passe por ele. Essa corrente provocará o surgimento de uma tensão entre os terminais desse resistor, proporcional à corrente na medida do valor da resistência e a partir da qual pode-se inferir o valor da corrente (GUPTA, 2019).

Há duas formas de conectar o resistor *shunt*, antes da carga ou depois da carga (REGAN; MUNSON; ZIMMER, 2022). A conexão do resistor depois da carga é chamada de *low-side*, como é possível observar na figura 3, e tem a vantagem da medição ser ligada diretamente ao terra e de um circuito de medição mais simples, porém com as desvantagens da carga não ser ligada diretamente ao terra e da impossibilidade de detectar correntes de fuga para circuitos de proteção.

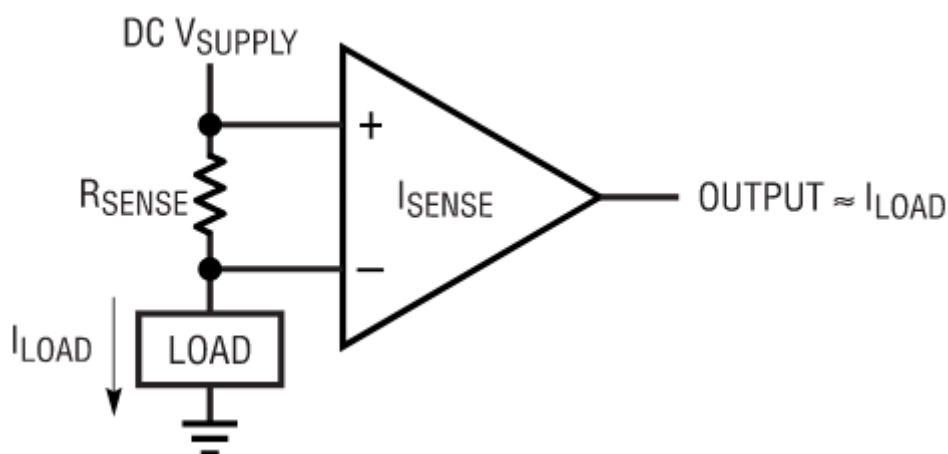
A conexão antes da carga é chamada de *high-side*, conforme a figura 4, e tem as vantagens de carga conectada ao terra (GND) e possibilidade de medir correntes de fuga, porém com a desvantagem do circuito de medição estar em potencial diferente de 0V e as correntes de modo comum na entrada do circuito de medição são mais altas.

Figura 3: Diagrama de um resistor *shunt low-side*.



Fonte: Regan, Munson e Zimmer, 2022.

Figura 4: Diagrama de um resistor *shunt high-side*.



Fonte: Regan, Munson e Zimmer, 2022.

Este método tem a vantagem de ser o mais barato e simples dentre todos os métodos de sensoramento de corrente e por ser bem linear e predizível, mesmo levando em consideração a possível necessidade de compensação da temperatura, pois sua influência também é linear e estável (YARBOROUGH, 2015). Também podem ser usados tanto em corrente contínua quanto alternada (GUPTA, 2019).

Suas desvantagens são a perda de potência pelo aquecimento do resistor, especialmente para medição de altas correntes, a interferência que ele causa no circuito e a necessidade de um circuito de compensação de temperatura em aplicações de alta temperatura ou com grande variação de temperatura (GUPTA, 2019).

Em muitos casos, usam-se trilhas da placa de circuito impresso como resistência *shunt*, por conta da impedância baixíssima da trilha de cobre, porém com a desvantagem de menor controle sobre o efeito da temperatura no valor da resistência, o que torna circuitos de compensação necessário quando se necessita de uma precisão melhor (GUPTA, 2019).

2.3 Medição de corrente pelo osciloscópio

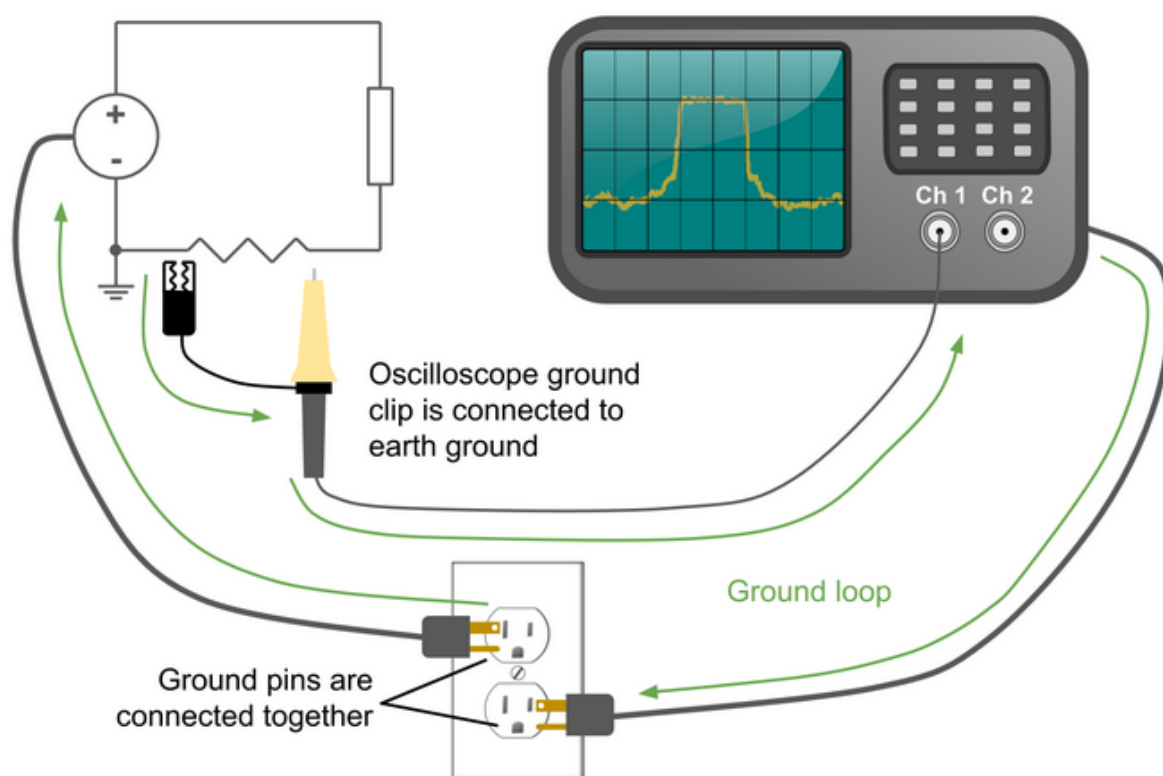
Uma possibilidade de uso de sensores resistivos é a visualização e medição de ondas de corrente por meio do osciloscópio. Por sua função, um osciloscópio permite visualizar ondas de tensão ao longo do tempo, permitindo visualizar e analisar diferentes tipos de ondas e pulsos. Porém, uma limitação destes equipamentos é a impossibilidade de usá-los para a medição de corrente (SALEAE, 2022).

Uma forma de contornar esta limitação é utilizando ponteiros de medição de corrente que permitem medir a corrente de um circuito de forma não invasiva, porém são equipamentos que possuem um alto custo (PINI, 2021).

Outra forma é por meio de um sensor resistivo, que converterá a corrente em um sinal de tensão proporcional à corrente a ser analisada, de forma linear e conservando o formato da onda (SALEAE, 2022).

O uso do osciloscópio com um resistor na conexão *high-side* não pode ser feito na maior parte dos osciloscópios sem o uso de uma ponteira diferencial pois é comum que o conector de terra dos canais seja ligado diretamente no terra da rede, assim causando um problema de curto-circuito na medição da tensão do resistor *shunt*. Já a conexão *low-side* tem um problema de ruído proveniente da possibilidade do chamado *ground loop*, um circuito que se fecha entre o terra da fonte do circuito onde está a corrente a ser medida e o terra do osciloscópio conforme a figura 5 (SALEAE, 2022).

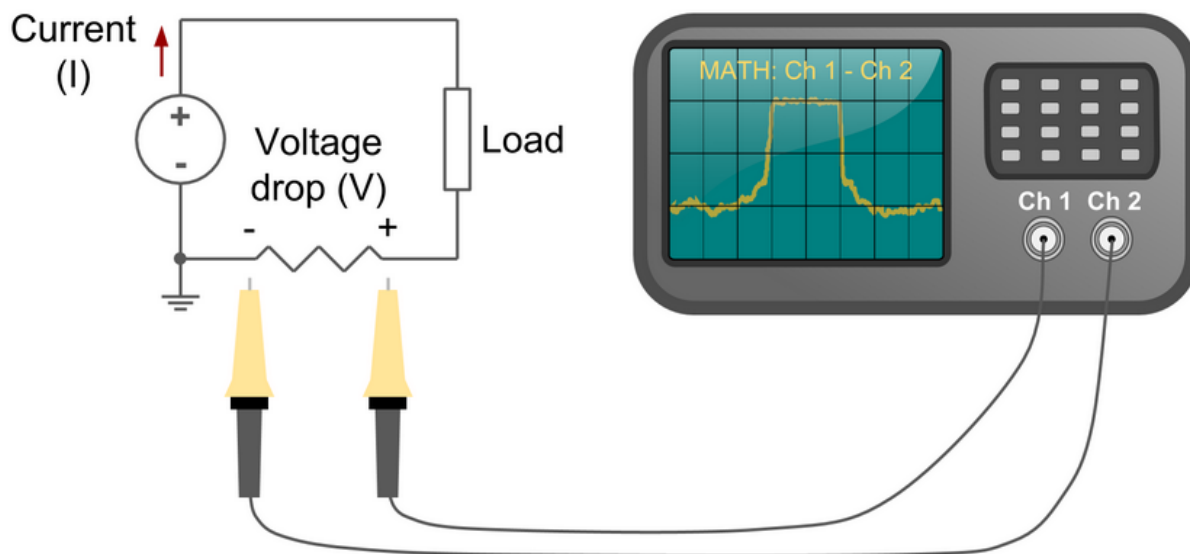
Figura 5: Representação do *ground loop*.



Fonte: Saleae, 2022.

A forma ideal de medição que corrige estes problemas é a medição do *shunt*, tanto em *low-side* quanto em *high-side*, com a configuração par diferencial, em que usa as ponteiros de dois canais separados, um como fase e outro como terra, conforme a figura 6, e é feita a visualização da diferença entre as medições destes dois canais, efetivamente medindo-se a tensão entre os terminais do resistor *shunt* (SALEAE, 2022).

Figura 6: Osciloscópio na configuração de par diferencial.



Fonte: Saleae, 2022.

Essa configuração provê proteção tanto contra curto-circuitos com o aterramento da rede quanto o *ground loop*. Por fim, se o osciloscópio tiver esta função, pode-se também dividir o sinal pelo valor do resistor, assim se obtém o valor da corrente além de seu formato de onda (SALEAE, 2022).

2.4 LoRa®

A tecnologia LoRa®, cujo nome é derivado do termo em inglês *Long Range*, que significa longa distância, é uma técnica de modulação digital que foi projetada para ser usada em redes de telecomunicação que funcionam com baixa potência e em áreas amplas, conhecidas como LPWAN (do inglês *low-power wide area networks*) (SEMTECH, 2022).

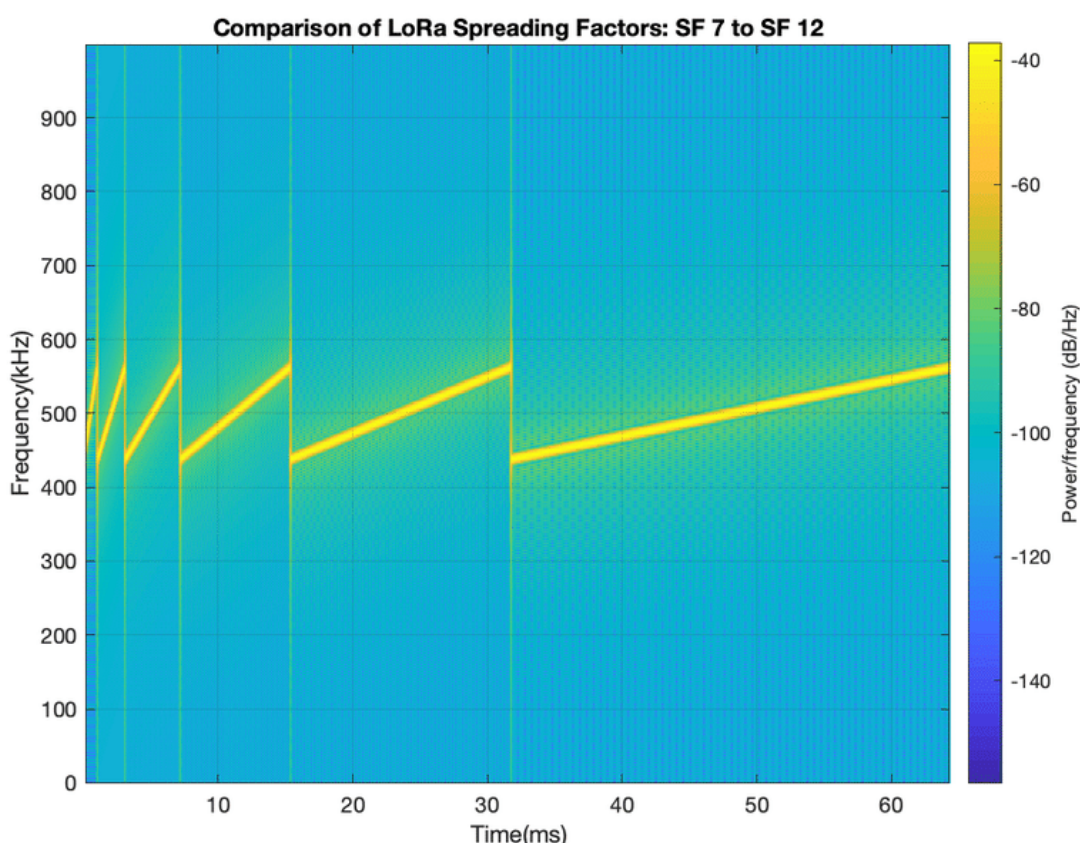
Foi inventada em 2009 pela companhia francesa Cycleo, baseada na cidade de Grènoble (DESIGN REUSE, 2009), que depois foi comprada pela empresa americana Semtech (ADELANTADO et al., 2017), que também ficou com a patente (SELLER, 2022).

Ela é um método de modulação por espalhamento espectral, do tipo *chirp spread spectrum*, em que a informação é codificada em pulsos de frequência variável, chamados de *chirp* (THE THINGS NETWORK, 2022a).

Os pulsos de frequência são controlados por dois parâmetros, a banda e o fator de espalhamento. A banda é o intervalo de frequências que o pulso percorre,

representado pela diferença entre a maior e menor frequência e pela frequência média e que é limitado por conta da disponibilidade do espectro de ondas de rádio. Já o fator de espalhamento (SF) diz respeito a quantos *bits* um símbolo (*chirp*) representa, afetando desta forma o tempo do *chirp*, como é possível observar na figura 7 (MONTAGNY, 2022).

Figura 7: Comparação do *chirp* para diferentes fatores de espalhamento.



Fonte: Kim, Lee e Kim, 2022.

Há uma relação de ganho e perda entre a taxa de variação da varredura, a taxa de transmissão de dados, a confiabilidade da transmissão e a dificuldade em decodificar a mensagem sem erros, em que fatores de espalhamentos menores permitem taxas de transmissão melhores, porém aumenta-se a dificuldade em decodificar o sinal (LORA CHIRP, 2022).

A tecnologia LoRa® pode ser operada nas frequências sub-gigahertz de licença livre, isto é, 915MHz, 868MHz ou 433MHz, a depender da legislação de cada país. Também é possível utilizar a frequência de 2,4 GHz, em que torna possíveis

taxas de transmissão de *bits* maiores, porém com uma redução do alcance (THE THINGS NETWORK, 2022a).

O alcance desta tecnologia varia do ambiente, da quantidade de ruídos e de obstáculos. É possível alcançar até cinco quilômetros em áreas urbanas e em áreas rurais é possível alcançar até quinze quilômetros ou mais caso o terreno seja favorável (SEMTECH, 2022).

Todavia, as vantagens obtidas por esta técnica de modulação vêm ao custo de menores taxas de dados, que ficam entre 27 kbps a 50 kbps, dependendo do fator de espalhamento e de maior latência (ADELANTADO et al., 2017). Isso limita a quantidade de informações que pode ser transmitida num determinado intervalo de tempo, de tal forma que a aplicação ideal requer a transmissão de um pacote pequeno de dados, tais como a leitura de sensores e detectores e o estado de atuadores (THE THINGS NETWORK, 2022a).

2.5 LoRaWAN®

É um protocolo de comunicação para redes LPWAN desenvolvido para o uso da modulação LoRa® (SEMTECH, 2022). Ele é uma camada de *software* que define como os microcontroladores devem utilizar a tecnologia LoRa®, por exemplo, quando transmitir e como é o formato da mensagem (THE THINGS NETWORK, 2022a).

De forma mais específica, o protocolo se encontra na camada de *Media Access Control* (controle de acesso ao meio, ou MAC), sendo responsável pela identificação dos nós e por cuidar da camada de segurança, como autenticação e encriptação de dados (THE THINGS NETWORK, 2022a).

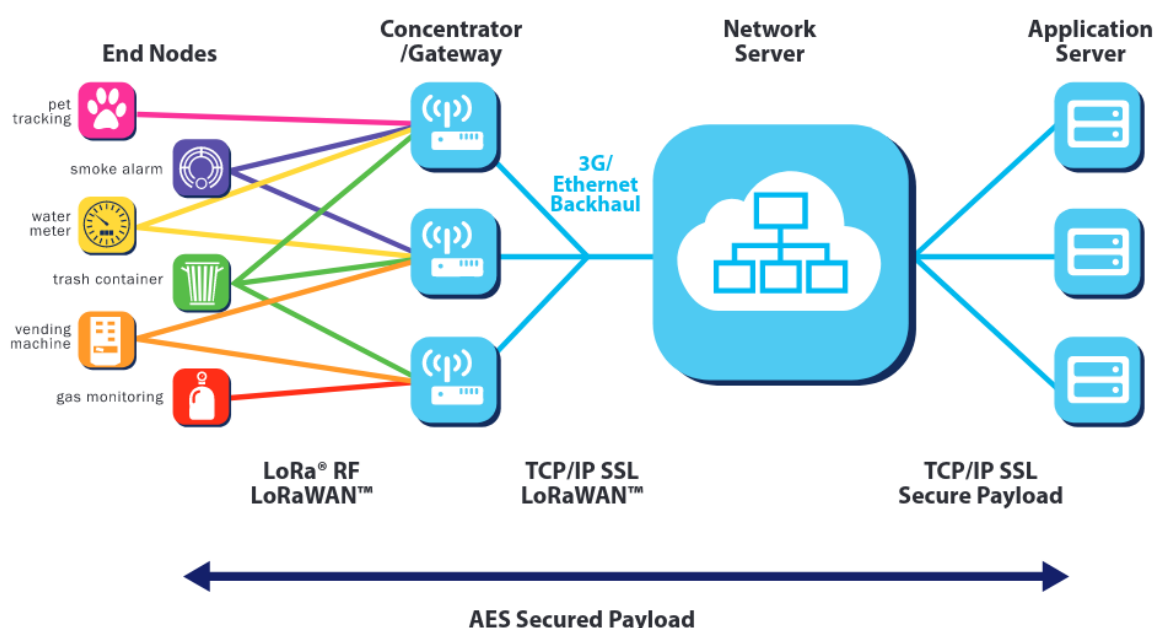
Ele foi desenvolvido e é mantido pela entidade LoRa Alliance, fundada pela Semtech e responsável pela manutenção do protocolo e certificação dos dispositivos que o usam, com a primeira especificação surgindo em janeiro de 2015 (THE THINGS NETWORK, 2022a).

Uma rede LoRaWAN® segue uma topologia de tipo estrela-de-estrelas, em que há uma entidade central, uma estrutura de servidores, que se comunica com um ou mais *gateways*, mas que não se comunicam entre si. Os *gateways*, por sua vez, se comunicam com um ou mais nós, que podem ser de diversos tipos e aplicações, tais como sensores e atuadores, e que também não se comunicam entre si diretamente (LORA ALLIANCE, 2022).

A arquitetura de estrela foi escolhida em detrimento de uma arquitetura de malha por conta de ser mais simples e permitir reduções de gasto de energia, uma vez que dispositivos só precisam se preocupar com a comunicação com dispositivos da próxima camada e não entre si e nós não precisam gastar tempo e energia com mensagens de outros nós, as quais são irrelevantes a eles (LORA ALLIANCE, 2015).

Os nós se comunicam com os *gateways* por meio de radiofrequência, usando a modulação LoRa®, e os *gateways* se comunicam com a estrutura de servidores por meio de uma conexão de internet, usando o protocolo UDP/IP, em que não há necessidade do *handshake* triplo entre transmissor e receptor antes de iniciar a comunicação. Assim, os *gateways* atuam como tradutores, recebendo a informação dos nós, traduzindo-a para pacotes IP e as enviando para os servidores por meio da internet, para que as informações sejam processadas e armazenadas conforme a figura 8 (LORA ALLIANCE, 2022).

Figura 8: Representação da arquitetura do protocolo LoRaWAN®.



Fonte: Lora Alliance, 2015.

A comunicação de *uplink*, isto é, dos nós ao *gateway*, utiliza o protocolo Aloha, em que os nós podem iniciar comunicação com algum *gateway* a qualquer momento e não há nenhuma sincronização entre os dispositivos, bastando que o nó verifique se o canal no qual vai enviar a mensagem não está em uso e, caso esteja, que espere o canal ficar disponível. Os nós não são ligados a um *gateway*

específico, mas transmitem suas mensagens para todos os *gateways* que repassam as informações ao servidor, que é o responsável por processar e validar as informações, descartando pacotes redundantes (LORA ALLIANCE, 2015).

A taxa de espalhamento é utilizada pelos *gateways* para conferir ortogonalidade à rede e, ao mesmo tempo, otimizar as comunicações de acordo com a distância entre *gateway* e nó, em que a comunicação com dispositivos próximos ao *gateway* usa taxas menores que dispositivos distantes (SEMTECH, 2022).

O protocolo especifica para os nós três modos de operação, a depender das necessidades de latência. Esta classificação serve para que o protocolo consiga atender diferentes tipos de aplicação com necessidades e requerimentos diferentes (LORA ALLIANCE, 2015).

- Classe A: os nós possuem uma comunicação bi-direcional em que transmissões *uplink* são seguidas por apenas duas janelas curtas para transmissão *downlink*. O nó se comunica com o *gateway* conforme sua própria necessidade e não precisa esperar receber transmissões do *gateway* após as duas janelas se fecharem e quaisquer outras mensagens devem ser agendadas para a próxima janela. Isso permite economia de bateria ao custo de alta latência e é destinada a dispositivos que precisam ser econômicos, tais como nós sensores (LORA ALLIANCE, 2015).

- Classe B: além das janelas de *downlink* estipuladas na classe A, há também janelas que se abrem em tempos pré-determinados, diminuindo a latência ao custo de maior dispêndio de energia. Esta classe é destinada a dispositivos que necessitem receber informações e comandos do *gateway* com alguma frequência, mas que não precisa ser em tempo real, tais como atuadores movidos a bateria (LORA ALLIANCE, 2015)

- Classe C: há uma janela contínua entre *gateway* e nó que só é fechada durante as transmissões do nó. Assim, não há latência por dispositivos em modo ocioso ou *uplinks* que devem ser agendados, mas com o preço de um gasto alto de bateria. Esta classe é destinada a dispositivos alimentados pela rede e que precisam de comunicação em tempo real com o *gateway*, tais como atuadores que precisam ser ligados à rede elétrica (LORA ALLIANCE, 2015).

As frequências e bandas em que o protocolo LoRaWAN® funciona mudam de região a região, por conta das legislações de alocação do espectro de ondas de rádio em cada legislação e do que está disponível para a comunicação por LoRa® e

sendo que em algumas regiões ainda não há legislação vigente para esta tecnologia (LORA ALLIANCE, 2015).

No Brasil, a ANATEL regulamenta que a tecnologia LoRa® deve ser utilizada na banda AU915-928, isto é, o padrão australiano, que vai da frequência de 915 MHz até a frequência de 928 MHz (THE THINGS NETWORK, 2022b).

2.6 Nó sensor

Nós sensores são um dos principais tipos de aplicação do protocolo LoRa® e de LPWAN de forma mais geral. Em sua definição, nós sensores são dispositivos autônomos equipados com as capacidades de sensoriamento de uma ou mais grandezas, processamento e comunicação com outros dispositivos, sendo estes nós sensores ou não. Quando são conectados em conjunto de forma a surgir uma rede, esta é denominada de rede de sensores (SANTOS; GUIMARÃES; BARBOSA, 2022).

A atividade de um nó sensor se resume em coletar dados com seus sensores, o que pode ser feito em intervalos de tempo fixos ou por consequência de algum evento externo, processar os dados coletados, podendo fazê-lo por si só ou de forma coordenada com outros nós sensores e transmitir estes dados para outros dispositivos, que podem ser outros nós ou mesmo outro tipo de dispositivo (SANTOS; GUIMARÃES; BARBOSA, 2022).

Em sua forma mais básica, nós sensores são compostos de uma unidade microcontrolada de capacidade de processamento e memória limitadas, o mínimo necessário para realizar suas tarefas, um ou mais sensores, um dispositivo de comunicação, normalmente sem fio e uma fonte de energia com um circuito de regulação da tensão e corrente, caso necessário. Adicionalmente, podem ter outros dispositivos, a depender da aplicação, tais como um sistema de localização ou algum equipamento que lhe confira mobilidade (SANTOS; GUIMARÃES; BARBOSA, 2022).

Assim, podem ser vistos como computadores de tamanho e capacidades reduzidas, de interface limitada e cuja função é específica a aplicação de sensoriamento de grandezas, processamento dos dados coletados e envio dos dados processados para outro dispositivo (SANTOS; GUIMARÃES; BARBOSA, 2022).

Tendo a função de coletar dados e informações sobre fenômenos naturais para diversas finalidades, tais como detecção de eventos e catástrofes, monitoramento de condições ambientais e segurança, nós sensores são muitas vezes alocados em regiões hostis e inacessíveis. Assim, dois dos fatores mais importantes para seu projeto são sua autonomia e sua eficiência energética (BOUGUERA et al., 2018).

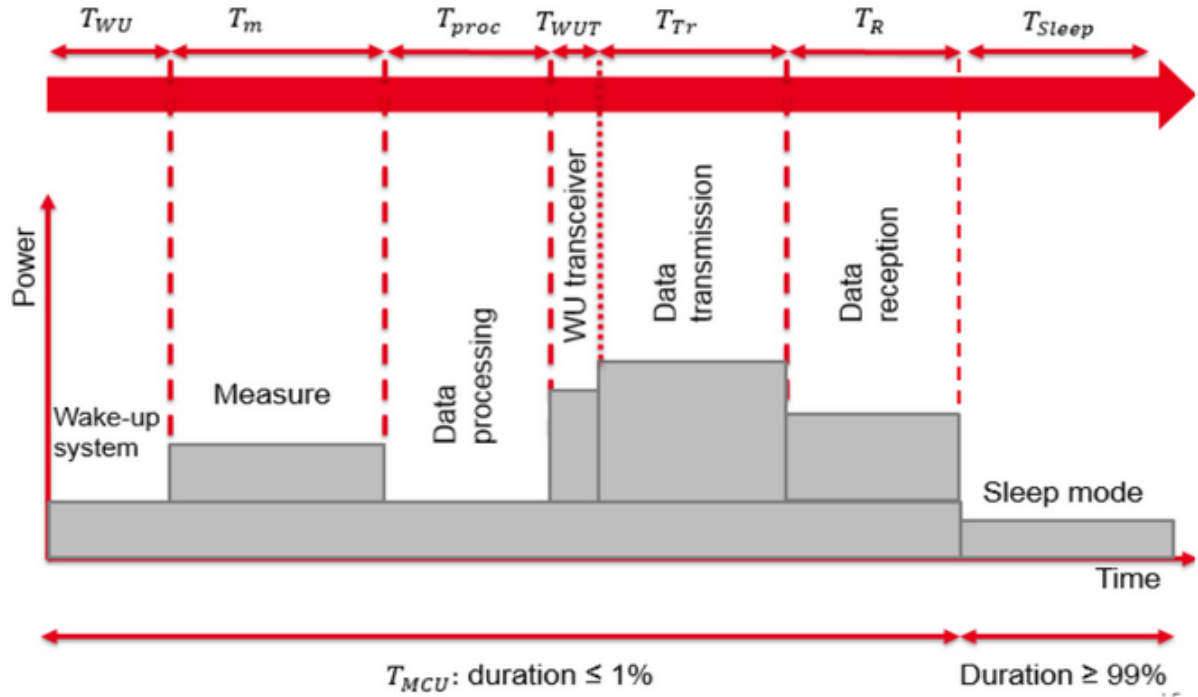
2.7 Modelagem do consumo do nó sensor

O primeiro passo para modelagem do consumo do nó sensor é entender seu ciclo de funcionamento e como este afeta o consumo de potência. Segundo os trabalhos de Bouguera et al. (2018) e Martinez et al. (2015), nós sensores geralmente operam em dois modos que se alteram entre si periodicamente, sendo estes o modo ativo e o ocioso. O tempo ativo de um nó sensor é menor porém consome mais energia, enquanto o modo ocioso é mais longo e consome muito menos.

O modo ativo de um nó sensor possui um consumo mais dinâmico e pode ainda ser dividido em três etapas principais, sendo elas a de aquisição de dados por meio de sensores, o processamento dos dados adquiridos e a comunicação de dados (MARTINEZ et al., 2015).

A figura 9 traz a subdivisão do modo ativo mais detalhada onde é possível observar os diferentes níveis de consumo para cada etapa. A etapa de medição e processamento são as que possuem menor consumo quando comparadas com a transmissão e recebimento dos dados, sendo a transmissão responsável pela maior parte do consumo do modo ativo.

Figura 9: Exemplo de funcionamento de um nó sensor.



Fonte: Bouguera et al., 2018.

O consumo energético total de um ciclo de operação de um nó sensor pode ser representado matematicamente pela equação 3.

$$E_{total} = E_{ativo} + E_{ocioso} \quad (3)$$

Esta equação pode ainda ser expressada em termos da potência como é possível observar na equação 4.

$$E_{total} = P_{ativo} \times T_{ativo} + P_{ocioso} \times T_{ocioso} \quad (4)$$

Obtendo-se portanto as potências médias de cada modo assim como a duração de cada período de cada um é possível obter o consumo de um nó sensor.

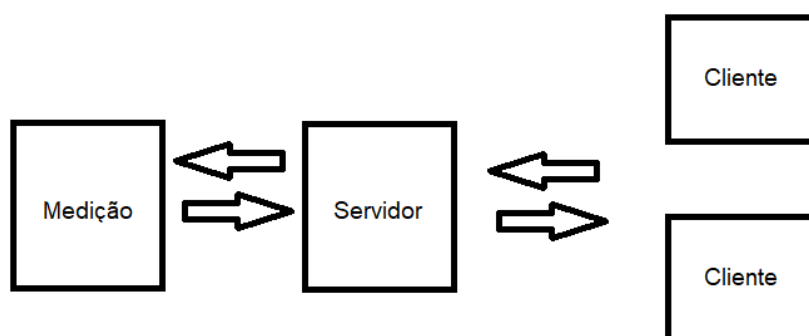
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O medidor almejado foi desenvolvido a fim de atender minimamente os seguintes requisitos:

- Realizar medições de grandezas elétricas de corrente, tensão e potência em relação ao tempo e o consumo energético total do período da medição de dispositivos IoT;
- Permitir ser usado por diferentes dispositivos cliente os quais serão usados para controlá-lo e apresentar os dados medidos;
- Permitir que seja usado como dispositivo cliente um aparelho que possua um navegador *web* e capacidade de se conectar a uma rede local (Ex. computadores, dispositivos móveis);
- O sistema deverá funcionar sem uma conexão com a internet e sem a necessidade de uma rede local pré-existente;
- Oferecer uma interface que apresente de forma gráfica os dados medidos enquanto a medição está em andamento;
- Fazer o download dos dados medidos no dispositivo cliente caso deseje-se salvar para análises posteriores;
- Limitar o acesso a apenas um cliente por vez.

Tendo estes requisitos definidos, o desenvolvimento do medidor foi dividido em três partes, havendo a troca de dados entre cada uma delas, conforme a figura 10.

Figura 10: Diagrama de blocos do medidor.



A parte da medição foi responsável por iniciar a medição, parar a medição e enviar os dados coletados ao servidor assim que os obtém.

O servidor ficou responsável por intermediar a comunicação entre o cliente e a parte da medição. Além disso, o servidor limita o número de clientes conectados e fornece os arquivos necessários para serem executados pelos navegadores dos dispositivos clientes.

Por fim, o cliente comunica-se ao servidor a fim de controlar a medição e receber os dados medidos. Os dados recebidos são então apresentados, processados e armazenados em um arquivo estruturado no dispositivo cliente para que possam ser processados por outros softwares.

3.1 Materiais

3.1.1 Raspberry Pi 3 Modelo B

Raspberry Pi (RPi) é o nome dado a uma família de computadores de placa única que tem o objetivo de ser um computador completo de tamanho reduzido para ser utilizado em diversas aplicações tais como servidores e automação (FILIPEFLOP, 2020).

A versão utilizada neste projeto é a versão Raspberry Pi 3 Modelo B, que é substituta da versão 2 modelo B.

As principais características da versão do Raspberry Pi utilizada são (RASPBerry PI, 2017):

- Processador Broadcom BCM2837, que utiliza a arquitetura 64 bits e frequência de *clock* de 1,2 GHz;
- Memória RAM de 1GB;
- Conexão sem fio LAN IEEE 802.11.b/g/n de 2,4 GHz;
- Conexão sem fio Bluetooth 4.2 e BLE;
- 100 Base Ethernet;
- Quatro portas USB 2.0;
- 40 pinos digitais de entrada e saída;
- Alimentação de tensão contínua de 5V e corrente máxima de 2,5 A via um conector micro-USB;
- Entrada para cartão SD.

Esta versão utiliza o regulador de tensão PAM2306AYPE que possui uma corrente de saída máxima de 1A (DIGI-KEY, 2022). Como o RPi no modo ativo possui um consumo típico de 400 mA, é possível utilizar o seu pino 3V3 para alimentar o DUT caso este não necessite de uma corrente superior a 600 mA RASPBERRY PI, 2017.

3.1.2 Sensor de corrente INA219

É um módulo sensor digital para medição de corrente e potência. Ele funciona por meio de uma resistência *shunt* e realiza a medição da queda de tensão desta resistência para a obtenção da corrente e da tensão da entrada em relação ao GND, podendo medir de 0 V a 26 V, para cálculo do consumo de potência, podendo reportar as três grandezas. Dispõe de uma interface I2C para comunicação (TEXAS INSTRUMENTS, 2015). A versão utilizada é uma placa para desenvolvimento com alguns componentes auxiliares e um resistor *shunt* de precisão com valor de 0,1 Ω .

Ele foi utilizado como o sensor do medidor de consumo proposto e desenvolvido durante este trabalho.

As principais características do sensor são (TEXAS INSTRUMENTS, 2015):

- Tensão nos terminais de entrada de 0 a 26 V;
- Medição de tensão, corrente e potência;
- Tensão de alimentação de 3 a 5,5 V;
- Consumo máximo de 1 mA;
- Precisão dependente da temperatura e com valor máximo de 0,5%;
- 16 endereços programáveis na interface I2C;
- Calibração de valor configurável;
- Temperatura de operação de -40°C a 125° C.

3.1.3 Plataforma EMPIOT

EMPIOT é uma plataforma para medição e análise do consumo de dispositivos de IoT que foi desenvolvido por pesquisadores do laboratório da Universidade de Santa Clara, na Califórnia (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018).

A plataforma é composta por um módulo baseado no sensor INA219 para ser acoplado a um RPi e um *software* desenvolvido para fazer a comunicação entre o módulo e o RPi. Por ser um dos projetos de referência para o desenvolvimento deste trabalho e por utilizar o mesmo sensor, o *software* desenvolvido por Dezfouli, Amirtharaj e Li (2018) foi utilizado neste projeto com modificações e adaptações necessárias.

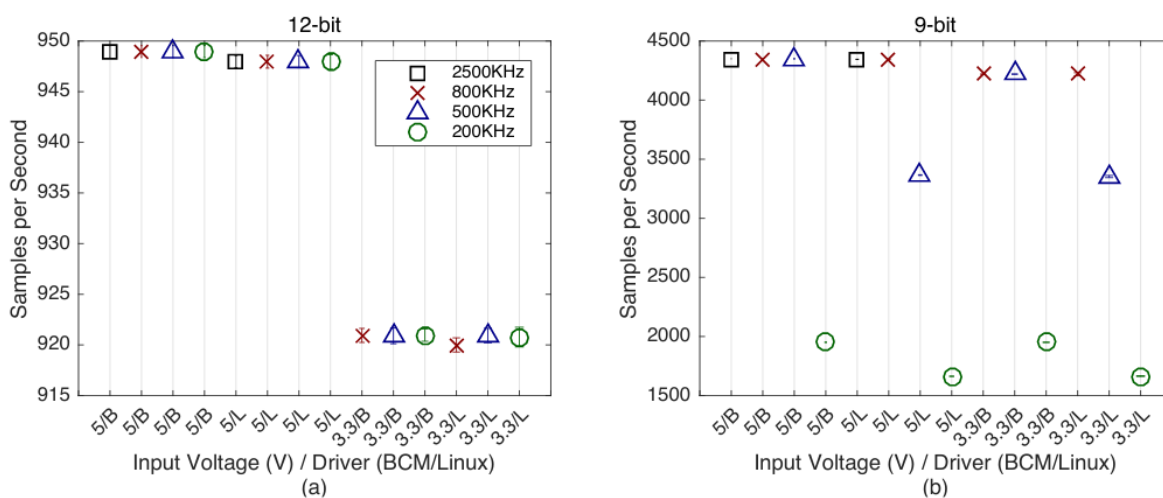
As funcionalidades do programa podem ser resumidas no processo de medição, *firmware* para comunicação entre RPi e o sensor INA219 e a escrita dos resultados para um arquivo (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018).

O processo de medição e o processo de escrita dos dados obtidos ocorrem de forma paralela em *threads* separadas (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018).

A comunicação entre o sensor e o RPi ocorre inteiramente pelo protocolo I2C utilizando a biblioteca BCM2835 escrita em C que oferece uma interface de programação ao *chip* de mesmo nome que gerencia as GPIO do RPi (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018; MCCAULEY, 2023).

São realizadas as medições de tensão, corrente e potência. Os valores de saída podem ter duas resoluções, uma de 9 bits e outra de 12 *bits* afetando a taxa de amostragem conforme é possível observar na figura 11 (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018).

Figura 11: Taxa de amostragem por tensão de entrada e *driver* de I2C para resolução de 12 *bits* (a) e 9 *bits* (b).



Fonte: Dezfouli, Amirtharaj e Li, 2018.

O programa suporta o salvamento de dados brutos e consumo calculado por um tempo determinado pelo usuário, após um determinado número de amostras ou utilizando um evento externo que marca o início e fim das medições. Os dados brutos das medições e do cálculo de consumo são escritos em um arquivo em lotes a cada 30.000 amostras (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018).

O software original que foi utilizado como base para as alterações foi disponibilizado pelos autores em um repositório no *Github* (SIOTLAB, 2018). O código fonte está disponível de forma *open source* sob a licença *GNU General Public License* versão 3 (GPL3), ou seja, o código pode ser baixado e alterado desde que a versão alterada seja disponibilizada sobre a mesma licença e de forma gratuita (FOUNDATION, 2007).

3.1.4 Osciloscópio TBS1062

É um osciloscópio digital fabricado pela empresa Tektronix, projetado para ser um osciloscópio mais simples e de menor custo para usos gerais e didáticos (TEKTRONIX, 2012). Ele foi utilizado para realizar medições de corrente do nó sensor para serem comparadas com o medidor de consumo.

As principais características do osciloscópio são (MOUSER, 2022; TEKTRONIX, 2012):

- Dois canais;
- Banda de 60 MHz;
- Taxa de amostragem de 1 GS/s;
- Tela colorida;
- *Triggers* avançados, incluindo *trigger* por comprimento de pulso;
- 16 medições automatizadas;
- Análise FFT para análise de ondas simplificadas;
- Função de *data logging* automatizada;
- Verificação de ponteiros;
- Conexão USB 2.0 para salvamento de medições e dados;
- Conversor ADC de 8-bits;
- Intervalo de sensibilidade 2 mV/div a 5 V/div em sequências de 1-2-5.

3.1.5 Raspberry PI OS

Raspberry PI OS é um sistema operacional (SO) baseado no Debian desenvolvido especificamente para ser usado com o hardware RPi, sendo o SO oficial do projeto. Este SO vem com diversos softwares pré-compilados já instalados, assim como outros que podem ser obtidos por meio do gerenciador de pacotes advanced packaging tool (APT) (RASPBerry PI, 2023).

Atualmente o SO é distribuído em duas versões, *Desktop* e *Lite*. A versão *Desktop* vem com um ambiente de interface gráfica já configurado, podendo ser utilizado como um computador pessoal, trazendo diversos softwares adicionais para tarefas diárias como navegador web, editores de texto entre outros. Esta versão possui um tamanho maior e um uso mais intenso dos recursos de processamento e memória. Por outro lado, a versão *Lite* vem sem o ambiente de interface gráfica configurado e com menos softwares pré-instalados, trazendo apenas softwares necessários para realizar tarefas em linha de comando.

Para este projeto foi utilizado a versão *Lite* baseada na versão 10 (*buster*) do Debian que foi instalada em um cartão SD de 16 GB utilizando o software Raspberry Pi Imager (RASPBerry PI, 2023). Além de facilitar a criação do SD com a imagem do SO, o *software Raspberry Pi Imager* permitiu definir configurações de rede especificando previamente qual seria a rede à que o RPi iria se conectar e também ativar o servidor de *Secure Shell Protocol* (SSH) para permitir ser gerenciado de forma remota por meio de outros computadores utilizando softwares clientes SSH e assim dar prosseguimento com as demais configurações e o desenvolvimento do sistema.

3.1.6 GNU Octave

GNU Octave é uma linguagem de alto nível para ser usada em computação numérica e que possui uma sintaxe em grande parte compatível com a do Matlab. É um *software* que está ativamente sendo mantido e é distribuído gratuitamente tendo o seu código aberto por meio da licença *GNU General Public License* (FOUNDATION, 2023).

Foram criados *scripts* utilizando o GNU Octave que recebiam as medições em formato CSV provenientes do protótipo de medidor e do osciloscópio e assim gerar

os gráficos e processar os dados para comparar os valores medidos entre os dois métodos.

3.1.7 Nó sensor comercial NIT 21LI

O dispositivo NIT 21LI produzido pela empresa Khomp é um nó sensor transmissor indoor sem fio que opera utilizando o padrão LoRa® com o protocolo LoRaWAN na versão 1.0.3. Ele possui um sensor integrado de temperatura e umidade, duas entradas onde é possível conectar sensores de temperatura e contato seco e uma entrada para conectar outros módulos de extensão desenvolvidos pela Khomp (KHOMP, 2023).

Sua classe de operação LoRaWAN depende do tipo da fonte de energia utilizada. Quando utilizado uma fonte de tensão externa de 5 V, ele operará conforme a classe C do protocolo, e quando for utilizado duas pilhas do tipo AA operará conforme a classe A (KHOMP, 2023).

As principais características elétricas do dispositivo segundo seu *datasheet* são (KHOMP, 2023):

- Nível de tensão operável utilizando pilhas: 2.0 a 3.0 V;
- Tempo de vida das pilhas (aproximadamente): 390 dias (transmissão a cada 5 minutos);
- Corrente no modo ocioso: 6.3 μ A;
- Corrente durante a transmissão (máximo): 172 mA;
- Corrente durante o recebimento (máximo): 24 mA.

Este dispositivo foi utilizado, em conjunto ao sensor de contato seco, como *device under test* (DUT) para realizar as medições de consumo usando o protótipo de medidor e o osciloscópio. O seu funcionamento normal independe da existência de um *gateway* para receber as mensagens enviadas e por este motivo utilizou-se apenas o nó sensor.

3.2 Métodos

3.2.1 Configuração do módulo INA-219

Como mencionado, a plataforma EMPIOT realiza a comunicação entre o módulo INA219 e o RPi por meio do protocolo I2C (DEZFOULI; AMIRTHARAJ; LI, 2018). O RPi 3 Modelo B vem com uma interface I2C livre para uso geral que pode ser usada por meio dos pinos GPIO2 (SDA) e GPIO3 (SCL) (RASPBERRY PI, 2023). Porém esta interface por padrão vem desativada e é necessário ativá-la manualmente por meio do *software raspi-config* com permissões de super usuário.

Com interface I2C ativada, realizou-se a conexão entre o módulo e os pinos do RPi. Para diagnosticar que a conexão foi realizada com sucesso executou-se o *software i2cdetect* que faz a varredura por dispositivos conectados na interface I2C mostrando o endereço do dispositivo conectado, caso encontrado, conforme a figura 12.

Figura 12: Resultado da busca por endereços de dispositivos conectados pela interface I2C.

```
pi@raspberrypi:~ $ i2cdetect -y 1
      0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
10:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
20:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
30:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
40:  40  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
50:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
60:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
70:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
```

Fonte: O autor, 2023.

3.2.2 Build do software EMPIOT no RPi

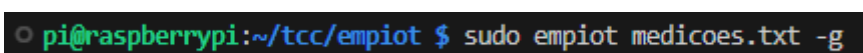
Para compilar foi necessário realizar um clone do repositório do software EMPIOT hospedado no site GitHub para o RPi (DEZFOULI, 2020). Ao tentar gerar o binário, foi alertado da falta da biblioteca *WiringPi.h* no SO. A biblioteca *WiringPi.h* foi instalada usando o gerenciador de pacotes APT por meio do comando *sudo apt-get install wiringpi*. Por fim realizou-se o build do binário utilizando o comando *make*

resultando em um executável chamado "empiot" que para usá-lo é necessário ser executado como super usuário.

O binário empiot pode ser executado com o uso de alguns argumentos que alteram a forma de como o processo irá operar. O primeiro argumento é opcional e serve para que o programa opere no modo verboso, escrevendo mais informações no terminal durante seu funcionamento, para usá-lo basta escrever '-v'. O segundo argumento é o caminho com o nome do arquivo onde as medições serão salvas. O terceiro é o modo de como as medições serão realizadas. Dos modos disponíveis, destaca-se o modo de operação por interrupção, representado pelo valor '-g'. Neste modo, a medição tem início e fim mediante uma interrupção, a qual pode ser realizada enviando um pulso de descida (3,3 V para 0 V) nos pinos GPIO do RPi, sendo o GPIO17 para dar início a medição e o GPIO18 para finalizar. Além da interrupção por pinos, neste modo o processo escuta por conexões UDP na porta 5.000, inicializando a medição ao receber a cadeia de caracteres "start\n" e finalizando ao receber a cadeia de caracteres "stop\n".

Na figura 13, é possível ver um exemplo de comando para inicializar o processo empiot no modo interrupção e salvando as medições no arquivo "medicoes.txt" no mesmo diretório onde o binário está sendo executado.

Figura 13: Exemplo de comando do software empiot.



```
pi@raspberrypi:~/tcc/empiot $ sudo empiot medicoes.txt -g
```

Fonte: O autor, 2023.

As amostras são salvas separadas por linhas no arquivo onde as colunas são compostas pelo número da amostra, tempo da amostragem em segundos referente ao tempo em que o RPi está ligado, tempo em nanossegundos da amostra, tensão do resistor *shunt* em milivolts, tensão de todo o circuito em volts e corrente em miliampère. Na figura 14 é mostrado um exemplo de amostras obtidas em uma medição.

Figura 14: Exemplo de amostras em uma medição.

```
pi@raspberrypi:~/tcc/empiot $ cat medicoes.txt
```

0	2370	844405711	0.300000	3.252000	3.000000
1	2370	845416991	0.320000	3.248000	3.200000
2	2370	846534696	0.320000	3.252000	3.200000
3	2370	847569076	0.310000	3.252000	3.100000
4	2370	849387805	0.310000	3.252000	3.100000
5	2370	849723195	0.310000	3.252000	3.100000
6	2370	850941226	0.310000	3.256000	3.100000
7	2370	851604653	0.310000	3.252000	3.100000
8	2370	852616037	0.320000	3.252000	3.200000
9	2370	853765499	0.320000	3.248000	3.200000
10	2370	854745961	0.310000	3.248000	3.100000
11	2370	855727780	0.310000	3.248000	3.100000
12	2370	856706887	0.310000	3.248000	3.100000
13	2370	857850456	0.320000	3.248000	3.200000
14	2370	858832274	0.300000	3.248000	3.000000
15	2370	860456976	0.310000	3.252000	3.100000
16	2370	860955628	0.310000	3.252000	3.100000
17	2370	861938386	0.310000	3.252000	3.100000
18	2370	862894184	0.310000	3.248000	3.100000
19	2370	864045940	0.310000	3.248000	3.100000
20	2370	865022388	0.310000	3.248000	3.100000
21	2370	866005770	0.320000	3.252000	3.200000
22	2370	867110127	0.320000	3.256000	3.200000
23	2370	868089808	0.320000	3.252000	3.200000
24	2370	869064900	0.310000	3.252000	3.100000

Fonte: O autor, 2023.

3.2.3 Alterações realizadas no *software* EMPIOT

A primeira alteração foi parametrizar o valor do resistor *shunt* usado no cálculos para obter a corrente, sendo então possível utilizar diferentes valores de resistores entre as medições e assim medir diferentes intervalos de correntes, por exemplo caso o resistor *shunt* possua valor de 10 Ω , será possível medir correntes de 0 mA a 4 mA com resolução de 1 μ A, permitindo assim medir a corrente do dispositivo sob teste quando em modo ocioso. Portanto o valor do resistor *shunt* pode ser passado como segundo argumento ao chamar o binário.

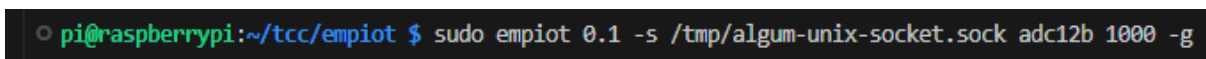
A segunda alteração realizada foi adicionar a possibilidade de escrever as amostras em um *socket unix* ao invés de um arquivo. Sendo assim foi adicionado um novo argumento logo após o segundo para distinguir entre quais dos modos de escrita será usado. Caso este valor seja 's' uma conexão unix socket será realizada como cliente conectando-se no socket especificado no argumento seguinte. E caso este argumento seja 'f' será realizado a escrita no arquivo especificado no argumento seguinte como na versão original do software.

A terceira alteração foi a parametrização da resolução do ADC do INA-219, podendo-se escolher entre as resoluções de 9 *bits* e 12 *bits*. Este argumento é especificado logo após o caminho do *socket unix*/caminho do arquivo e aceita como possíveis valores “adc9b” para resolução de 9 bits e “adc12b” para a de 12 bits.

Por fim, a quarta alteração foi parametrizar a capacidade do *buffer* que armazena as amostras antes de enviá-las. Desta forma é possível alterar a taxa de envio dos dados ao *socket unix* ou escrita no arquivo. Este argumento é definido logo após o argumento de seleção da resolução do ADC.

Na figura 15 é possível observar um exemplo de comando usando as novas funcionalidades. No comando especificou-se um resistor *shunt* de 0,1 Ω , utilizando o método de escrita em um unix socket localizado em /tmp/algum-unix-socket.sock, a resolução do ADC de 12 bits, tamanho do *buffer* de 1000 amostras e no modo e interrupção.

Figura 15: Exemplo de comando com os novos argumentos.



```
o pi@raspberrypi:~/tcc/empiot $ sudo empiot 0.1 -s /tmp/algum-unix-socket.sock adc12b 1000 -g
```

Fonte: O autor, 2023.

3.2.5 Aplicação web

O desenvolvimento da aplicação foi feito adotando-se a arquitetura de aplicação de página única (*Single page application*), ou seja o servidor serve apenas os arquivos iniciais necessários para inicializar a aplicação no cliente e o cliente faz as subsequentes atualizações dos conteúdos na página por meio de *JavaScript* e requisições ao servidor apenas com os dados necessários (MDN WEB DOCS, 2023). Desta forma a aplicação cliente se comporta como se fosse necessário carregar apenas a página uma vez. Esta arquitetura será ideal para a aplicação de medições pois a mesma receberá dados constantemente a cada segundo com o lote de amostras realizadas.

3.2.6 Desenvolvimento do servidor *web*

O servidor foi desenvolvido utilizando o runtime assíncrono de JavaScript, Node.js (NODE.JS, 2023). Foram definidas como responsabilidades do servidor o de servir os arquivos da aplicação cliente, gerenciar o processo de medição por meio do software *empiot* intermediando a comunicação entre a aplicação cliente e o processo *empiot*. A seguir é explicado com mais detalhe como foi realizado cada uma destas etapas.

3.2.6.1 Gerenciando o processo *empiot*

Para gerenciar o processo do *empiot* foi utilizado o módulo `child_process` disponível por padrão no Node.js. Este módulo permite inicializar subprocessos como se os estivesse executando de um terminal podendo passar argumentos ao programa a ser executado (NODE.JS, 2023).

O processo do *empiot* é inicializado assim que o servidor inicia, porém ele pode ser a qualquer momento reinicializado por meio do aplicativo cliente caso este apresente comportamento inesperado. Além disso, quando é realizada a troca do valor da resistência *shunt* o processo é também reinicializado.

Inicializa-se o processo *empiot* no modo interrupção (com o argumento `-g`). Para iniciar as amostragens, o processo principal do servidor faz uma conexão cliente de um socket UDP ao servidor que o processo *empiot* inicializa quando em modo interrupção, utilizando a porta 5000. Para criar o socket UDP foi utilizado o módulo `dgram` disponível no Node.js (NODE.JS, 2023). As cadeias de caracteres “start\n” e “stop\n” são enviadas mediante comandos do usuário enviados por meio da aplicação cliente.

A fim de criar um canal de comunicação entre o processo do *empiot* e assim receber as amostras realizadas, foi criado um servidor *unix socket*, no mesmo processo principal do servidor, utilizando o módulo `net` disponível por padrão no Node.js (NODE.JS, 2023). O caminho do arquivo definido pelo servidor *unix socket* é passado em forma de argumento no momento da inicialização do processo *empiot*, sendo então este inicializado no modo de escrita em *unix socket* (argumento `-s`) seguido do caminho e nome do arquivo.

3.2.6.2 Servindo a aplicação cliente

No servidor também é adicionado um servidor HTTP utilizando o módulo `http` do Node.js (NODE.JS, 2023). O servidor possui apenas duas rotas que são utilizadas para servir os arquivos utilizados pelo cliente, sendo `/` para servir o arquivo `html` e a rota `/app.js` servir o arquivo *javascript*. O servidor é disponibilizado por meio da porta 3.000.

3.2.6.3 Gerenciando a comunicação entre a aplicação cliente e o servidor

É estabelecido um canal de comunicação bidirecional entre a aplicação cliente e o servidor utilizando o protocolo WebSocket (FETTE; MELNIKOV, 2011) por meio da biblioteca `Socket.IO` para o Node.js, a qual cria uma abstração em cima do protocolo a fim de proporcionar uma comunicação baseada em eventos (SOCKET.IO, 2023).

Do lado do cliente, há dois eventos enviados pelo servidor aos quais ele escuta, sendo estes o `“measurementData”` e o `“finishedSampling”`. O evento `“measurementData”` é usado pelo servidor a fim de comunicar um lote de amostras recebidas pelo processo `empiot` por meio do *socket unix*. Assim que o cliente recebe dados neste evento, ele os processa e mostra no gráfico. O evento `“finishedSampling”` é enviado pelo servidor quando o processo `empiot` finaliza a medição e o envio das amostras. Este evento é usado pelo cliente a fim de identificar o fim da medição e realizar os processamentos dos dados obtidos após o término, como o cálculo da energia total consumida.

O servidor por sua vez escuta os eventos `“empiotCommand”` e `“updateConfig”` enviados pelo cliente. O evento `“empiotConfig”` é utilizado pelo cliente a fim de controlar o processo `empiot`. Junto ao evento é enviado uma mensagem que pode representar três comandos. O comando `“start”` faz com que servidor se comunique ao processo `empiot` por meio do servidor UDP dando início a medição. O comando `“stop”` é similar ao `“start”`, porém para parar a medição. O comando `“restartEmpiotProcess”` é utilizado para o servidor reiniciar o processo `empiot`.

O evento “updateConfig” é utilizado para reiniciar o processo empiot com novas configurações como o valor do resistor *shunt*, o tamanho do *buffer* e a resolução do ADC.

O servidor também limita o número de conexões clientes ao websocket para apenas uma, evitando o envio inconsistente de comandos ao servidor e assim garantindo que o cliente conectado tenha total controle sobre as medições.

3.2.6.4 Gerenciando o processo do servidor

Para garantir a operação intermitente do processo do servidor no SO foi criado um serviço para ser gerenciado pelo Systemd (SYSTEMD, 2022). O serviço foi configurado de forma a reinicializar o processo em caso de falha e inicializar apenas após os serviços de rede estarem devidamente inicializados. Sendo assim o processo funcionará de forma autônoma bastando apenas ligar o RPi, não precisando de configurações adicionais.

3.2.7 Desenvolvimento da aplicação cliente

A aplicação cliente foi feita utilizando apenas a linguagem de marcação HTML para a construção dos componentes como botões, selecionadores e o layout geral da página e *Javascript* para desenvolver as interações entre os componentes, a comunicação com o servidor por meio do protocolo websocket e a apresentação dos gráficos.

Para a comunicação websocket com o servidor, foi utilizado a versão para clientes do módulo Socket.io (SOCKET.IO, 2023). A conexão é estabelecida com o servidor assim que os arquivos são carregados no dispositivo cliente. Caso este seja o primeiro cliente a conectar-se, poderá começar a gerenciar as medições conforme os comandos especificados anteriormente por meio da interface desenvolvida.

Dando início a medição, começará a ser plotado no gráfico as grandezas de corrente, tensão e potência em tempo real conforme os lotes de amostras são enviados do servidor ao cliente. Para a criação do gráfico utilizou-se o módulo

chart.js em conjunto com o plugin chartjs-plugin-zoom para poder dar zoom nas medições e mover os eixos X e Y do gráfico (CHART.JS, 2023).

Após o término das medições, a aplicação faz o cálculo da energia total utilizando a soma de Riemann pela direita conforme a fórmula 6, onde n é o número de amostras, i é o índice da amostra atual e $\Delta t[i]$ é o tempo da amostra no índice i menos o tempo da amostra do índice $i-1$ (ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA, 2023).

$$S = \sum_{i=1}^n power[i] * \Delta t[i] \quad (5)$$

É possível exportar as amostras para um arquivo no formato CSV onde em cada linha há as colunas de número da amostra, o tempo em segundos, o valor da corrente em mA, a tensão de entrada em V e a potência em mW.

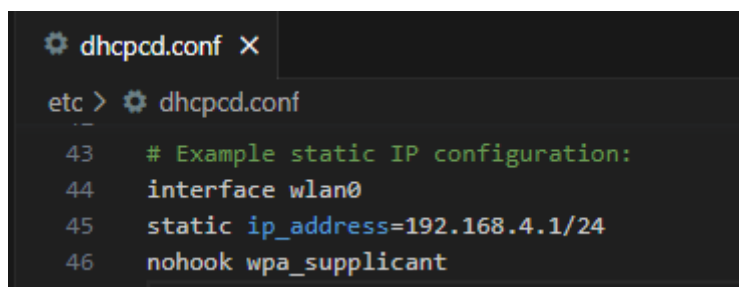
Por conta da especificação de operar sem a necessidade de internet, foi preciso agrupar estaticamente todo o código *Javascript* e os módulos adicionados (Socket.io, chart.js) em um único arquivo *Javascript*, utilizando o *webpack* como agrupador estático de módulos (WEBPACK, 2023).

3.2.8 Configuração do RPi como ponto de acesso sem fio (AP)

Para que fosse possível acessar o RPi sem a necessidade prévia de uma infraestrutura de comunicação, optou-se por configurá-lo como um *access point* (AP) ao qual dispositivos clientes com uma interface de rede sem fio poderiam se conectar. Como apenas o acesso ao RPi é almejado, configurações referentes a roteamento foram omitidas, resultando assim em uma rede isolada.

Primeiramente foi identificado a interface wireless do RPi no SO utilizando o comando “ip addr”. Constatou-se que a interface estava representada pelo nome wlan0. De acordo com Marples (2023), foi alterado a configuração do cliente dhcp do SO, no arquivo “/etc/dhcpd.conf”, para que a interface wireless possuísse o IP (com máscara de subrede 255.255.255.0) estático 192.168.4.1/24 e evitasse conectar-se a outro AP, resultando na configuração apresentada na figura 16.

Figura 16: Configurações do cliente *dhcp* no arquivo “/etc/dhcpd.conf”.

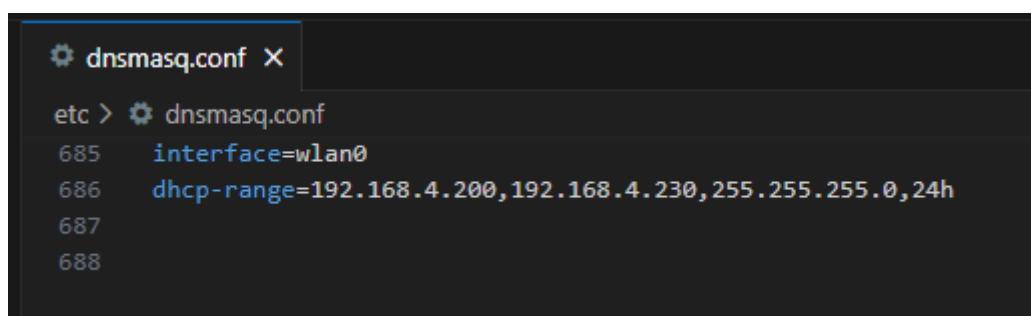


```
dhcpcd.conf X
etc > dhcpcd.conf
43 # Example static IP configuration:
44 interface wlan0
45 static ip_address=192.168.4.1/24
46 nohook wpa_supplicant
```

Fonte: O autor, 2023.

Em seguida foi instalado no RPi o software dnsmasq que possibilita ser usado para servir quatro diferentes serviços como servidores DHCP, DNS, PXE e TFTP, porém utilizou-se apenas o servidor DHCP para que concedesse endereços de IP automaticamente aos dispositivos clientes que fossem conectar-se ao AP. A configuração foi realizada no arquivo /etc/dnsmasq.conf especificando a interface(wlan0), o intervalo de endereços (192.168.4.200 a 192.168.4.210), a máscara de sub-rede (255.255.255.0) e o tempo de concessão (24 horas) conforme é possível ver em figura 17 (KELLEY, 2023).

Figura 17: Configurações do software dnsmasq no arquivo “/etc/dnsmasq.conf”.



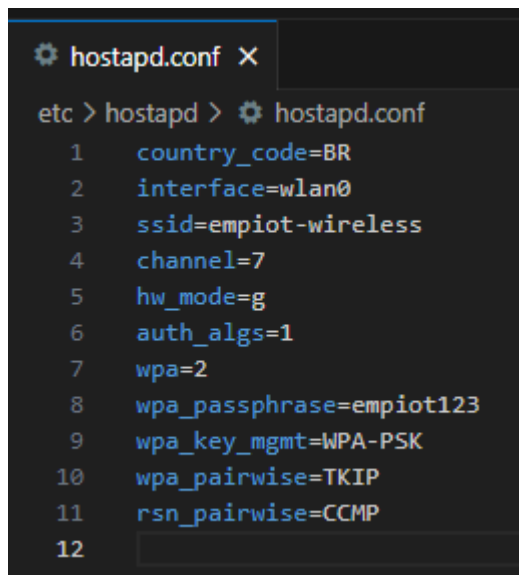
```
dnsmasq.conf X
etc > dnsmasq.conf
685 interface=wlan0
686 dhcp-range=192.168.4.200,192.168.4.230,255.255.255.0,24h
687
688
```

Fonte: O autor, 2023.

Por fim foi instalado o software hostapd que implementa o AP pelo padrão IEEE 802.11 e um servidor de autenticação IEEE 802.1X/WPA/WPA2/EAP/RADIUS. No arquivo /etc/hostapd/hostapd.conf foi definida a configuração como o código do país para que as configurações do modem estejam de acordo com as regulamentações vigentes, a interface de rede wireless utilizada para receber as conexões (wlan0), o service set identifier (SSID) além de parâmetros referente a especificação Wi-Fi Protected Access (WPA) como a versão, a forma de

autenticação (pre-shared key), a senha entre outros parâmetros. Na figura 18 é possível ver o arquivo com todas as configurações realizadas (MALINEN, 2019).

Figura 18: Configurações do software hostapd no arquivo “/etc/hostapd/hostapd.conf”.



```
hostapd.conf X
etc > hostapd > hostapd.conf
1  country_code=BR
2  interface=wlan0
3  ssid=empiot-wireless
4  channel=7
5  hw_mode=g
6  auth_algs=1
7  wpa=2
8  wpa_passphrase=empiot123
9  wpa_key_mgmt=WPA-PSK
10 wpa_pairwise=TKIP
11 rsn_pairwise=CCMP
12
```

Fonte: O autor, 2023.

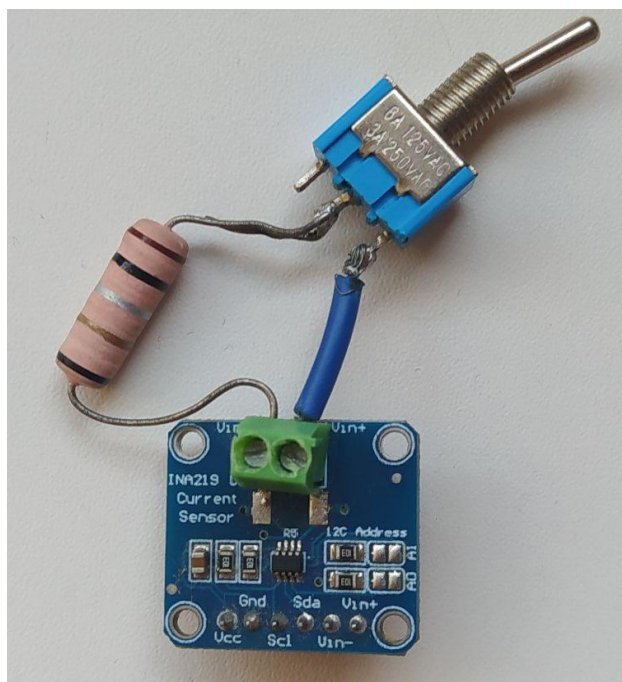
3.2.9 Construção do hardware

Geralmente os nós sensores quando energizados, iniciam operando no modo ativo e em seguida mudam para o modo ocioso. Quando em modo ocioso, a corrente de consumo é baixa, necessitando que o resistor *shunt* possua um valor de resistência maior para possibilitar a detecção pelo sensor INA219, sendo necessário realizar a troca do resistor *shunt*. Porém, esta troca não poderia interromper a alimentação do DUT, uma vez que ele iniciará sua operação entrando primeiro em modo ativo antes de ir para o modo ocioso, causando o mau funcionamento do mesmo pois agora teria um resistor *shunt* cujo o valor passaria interferir no funcionamento do circuito por conta da corrente no modo ativo ser maior.

Portanto, para evitar a reinicialização do DUT por falta de energia durante a troca de resistores, o resistor *shunt* SMD do módulo foi removido e conectou-se em seus terminais VIN+ e VIN-, conforme figura 19, um resistor (R1) de mesmo valor porém com um *switch* (SW1) em série, permitindo assim que o segundo resistor (R2)

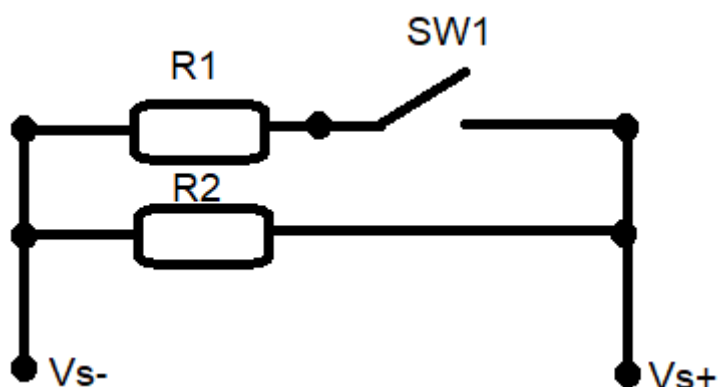
com maior resistência pudesse ser posicionado em paralelo resultando no circuito da figura 20 .

Figura 19: Resistor de $0,1\ \Omega$ em série com um *switch* conectados aos terminais VIN- e VIN+ do Módulo INA-219 com seu resistor *shunt* SMD removido.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 20: Diagrama do circuito das resistências e switch.



Fonte: O autor, 2023.

Com o novo circuito, para realizar medições do modo ativo, bastaria deixar o switch SW1 fechado, resultando assim em uma resistência com o valor do paralelo

de R1 e R2. A resistência equivalente será sempre menor que a menor das resistências. Sendo neste caso a menor resistência $0,1 \Omega$ e as resistências maiores 10Ω ou 100Ω , a resistência equivalente ficará respectivamente $0,099 \Omega$ e $0,0999 \Omega$, sendo irrelevante a influência no valor da resistência menor quando em paralelo.

Para medir o DUT no modo ocioso, primeiramente deixava-se o switch SW1 fechado, ficando no estado para medição do modo ativo. Assim que o DUT entrasse em modo ocioso, o switch poderia ser aberto fazendo com que apenas o resistor R2 fizesse parte do circuito. Neste ponto as medições poderiam ser iniciadas selecionando o modo ocioso na aplicação cliente.

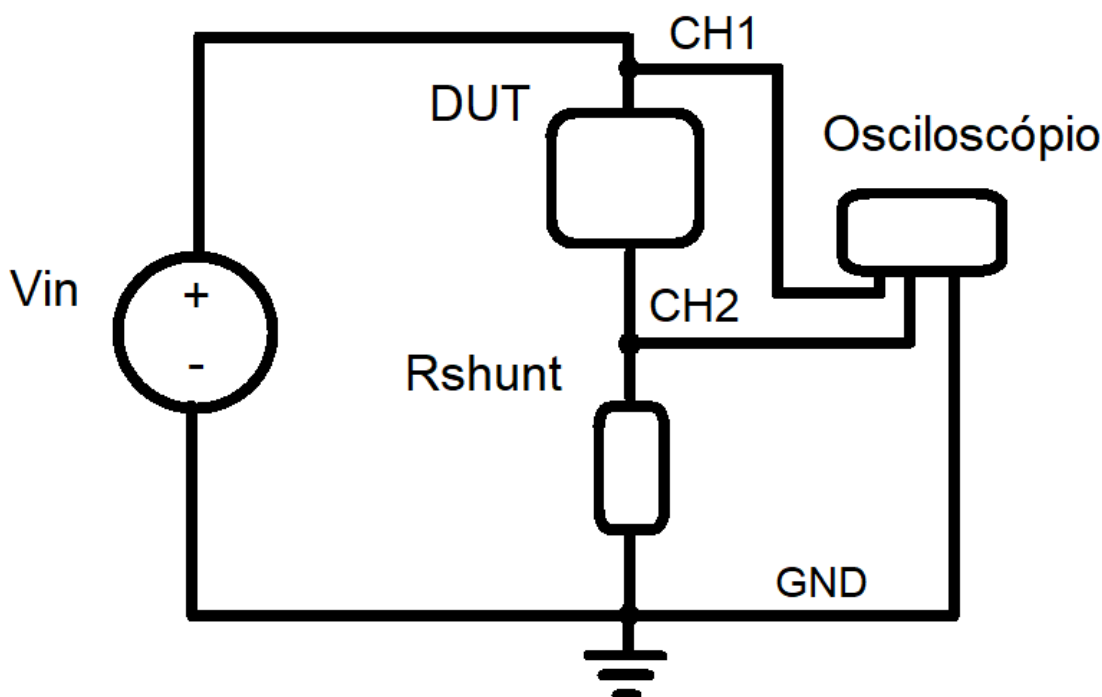
3.2.10 Medição do nó sensor comercial

Para fins de comparação realizou-se a medição do nó sensor comercial produzido pela Khomp no seu modo de operação ativo e hibernando utilizando o osciloscópio e o medidor construído. Nas seções seguintes são detalhados os processos realizados para ambos os medidores.

3.2.10.1 Utilizando o osciloscópio

A medição com o osciloscópio foi realizada utilizando o método de medição de tensão de um resistor *shunt* utilizando a conexão *low-side*, conforme o esquema na figura 21.

Figura 21: Diagrama do circuito de medição utilizando o osciloscópio.



Fonte: O autor, 2023.

Com o objetivo de obter o valor da tensão mais próximo do real no momento da medição e assim captar possíveis quedas nas situações de consumo mais intenso, o canal 1 do osciloscópio foi utilizado para a medição da tensão de entrada e o canal 2 para a medição da tensão do resistor *shunt*.

Utilizando uma fonte de bancada, o DUT foi alimentado com 3,3 volts através do suporte de pilhas, pois assim ele opera conforme a classe A do protocolo LoRaWAN, consumindo menos energia pois intercala entre o modo ativo e o ocioso (KHOMP, 2023).

Durante a medição do modo ativo, foi utilizado um resistor de 1 Ω , resultando em uma relação de um para um com o valor da corrente. A escala vertical e horizontal foi ajustada de forma a conter todas as atividades realizadas pelo DUT quando ativo (processamento, envio de dados, e o intervalo para recebimento dos dados).

Já no modo ocioso, utilizou-se uma resistência de 400 Ω e 2 k Ω . Com o intuito de obter o valor máximo de corrente em um determinado intervalo de tempo, primeiro configurou-se a escala vertical do osciloscópio para 50 mV/div, conseguindo assim, obter na retícula de exibição, valores que poderiam variar de 0 mA a 1 mA

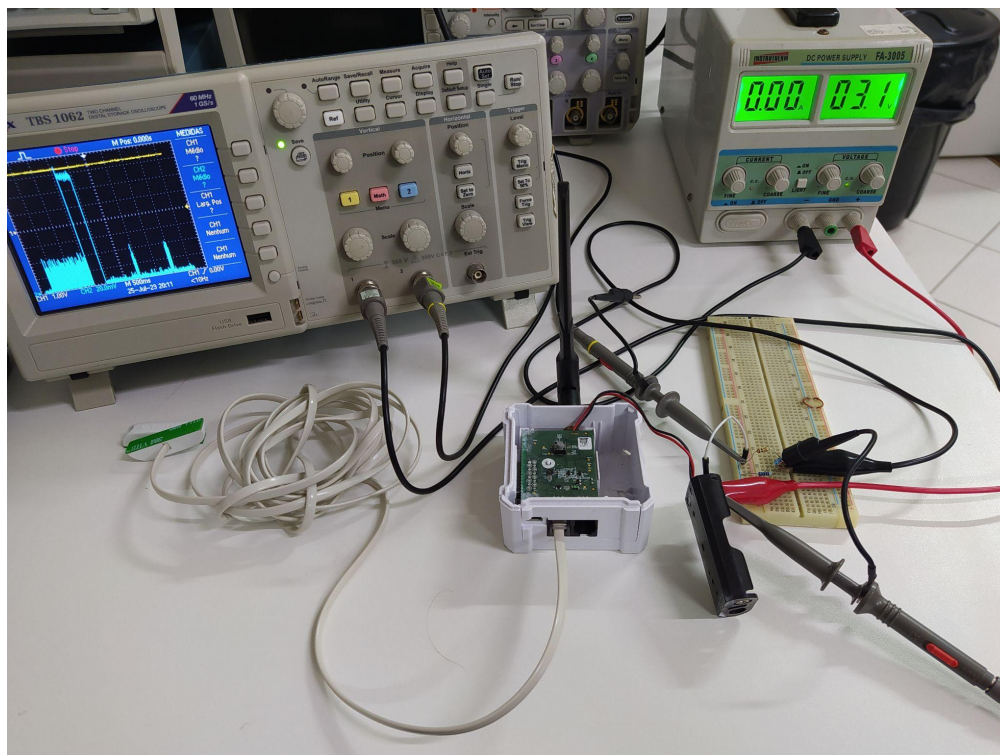
com uma resolução de $5\ \mu\text{A}$. Em seguida, com o valor de corrente no modo ocioso máximo obtido com o resistor de $400\ \Omega$, alterou-se para o resistor de $2\ \text{k}\Omega$ e buscou-se a menor escala vertical de forma que comportasse a amplitude total do sinal.

A troca entre resistências foi realizada de forma similar ao do protótipo de medidor. Para as medições no modo ocioso, primeiro o protótipo era ligado com a resistência de $1\ \Omega$ em paralelo com a de $400/2\ \text{k}\Omega$, e assim que o DUT entrasse no modo ocioso a resistência de $1\ \Omega$ era removida manualmente do circuito, ficando assim com uma resistência *shunt* de $400/2\ \text{k}\Omega$.

Todas as medições realizadas foram salvas no computador utilizando um cabo USB conectado ao osciloscópio. Salvou-se a imagem do osciloscópio assim como os dados de medição para ser utilizado posteriormente para realizar o cálculo da energia.

Na figura 22 é possível observar as conexões realizadas durante a medição da corrente do nó sensor utilizando o osciloscópio.

Figura 22: Realizando medições com o osciloscópio do nó sensor.

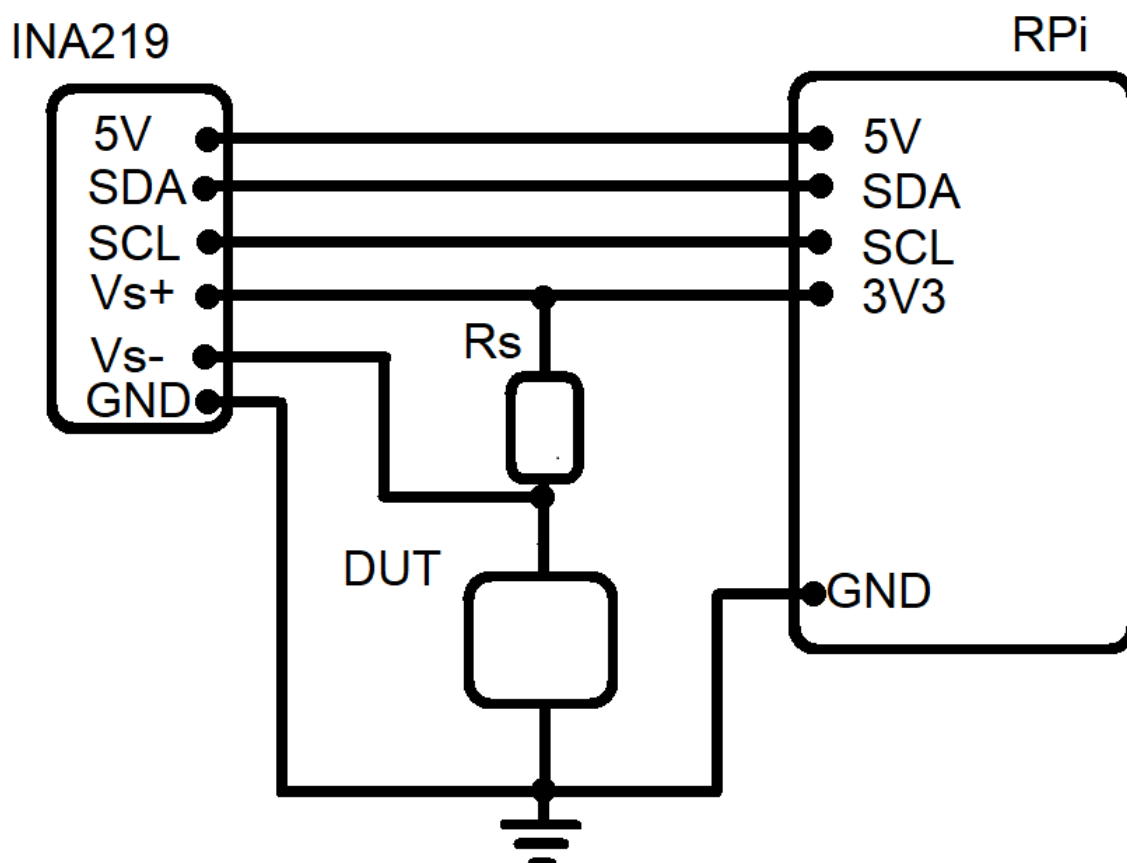


Fonte: O autor, 2023.

3.2.10.2 Utilizando o protótipo de medidor

As conexões entre o DUT e o protótipo de medidor foram feitas conforme o diagrama da figura 23.

Figura 23: Diagrama da medição do nó sensor utilizando o protótipo de medidor.



Fonte: O autor, 2023.

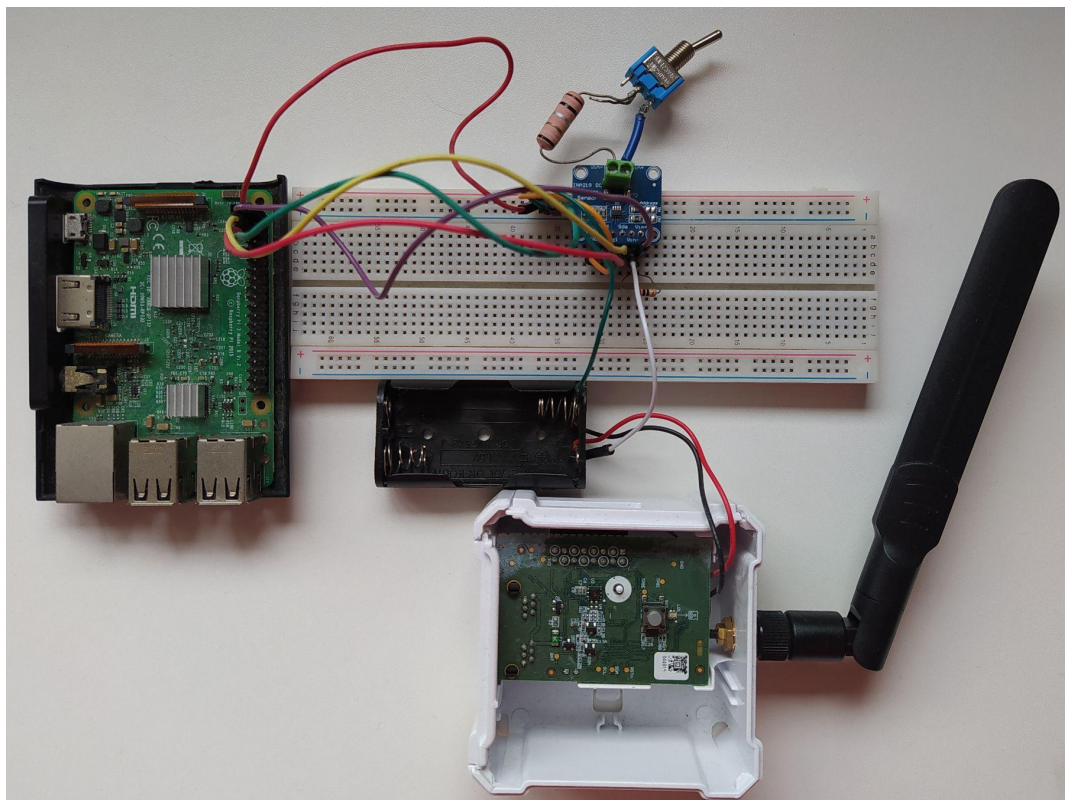
O circuito do DUT foi energizado utilizando o pino de 3V3 do RPi evitando o uso de uma fonte externa.

O processo de medição foi similar ao do osciloscópio, porém com valores de resistência diferentes. Primeiro foi realizado a medição do DUT no modo ativo utilizando o resistor *shunt* de 0,1 Ω em paralelo ao resistor de 10 Ω , onde por meio da interface de cliente realizou-se a configuração da medição para o modo ativo assim como os comandos de início e fim das medições.

Em seguida, o DUT primeiro era iniciado e esperava-se que entrasse no modo ocioso para que então o switch no circuito dos resistores *shunt* fosse aberto deixando apenas o resistor de 10 Ω . Na interface web era então alterada a

configuração para o modo ocioso e as medições eram então realizadas. Na figura 24 é possível observar a conexão do protótipo de medidor conectado ao nó sensor.

Figura 24: Protótipo de medidor conectado ao nó sensor.



Fonte: O autor, 2023.

3.2.10.2 Medição dos valores de resistência

Os valores reais dos resistores foram medidos utilizando o multímetro de precisão Tektronix DMM4050, o qual realiza diversas amostras e apresenta o valor médio em conjunto com o desvio padrão. Foi realizada a conexão utilizando quatro cabos para reduzir a influência do cabo na medição.

No quadro 1 são apresentados os valores reais, assim como os valores do desvio padrão e o erro relativo ao valor nominal. Apesar dos valores terem divergido um pouco, foram considerados os valores nominais para os cálculos da corrente.

Quadro 1: Valores médios dos resistores utilizados

Resistor	Medição	Desvio padrão(%)	Erro relativo (%)
0,1 Ω + switch	0,105987	2,31E-3	5,99
1 Ω	1,01913	269,84E-6	1,91
10 Ω	9,78	836,61E-6	2,20
100 Ω	98,82	211,39E-6	1,18
2 k Ω	2004,11	7,20E-6	0,21

Fonte: O autor, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

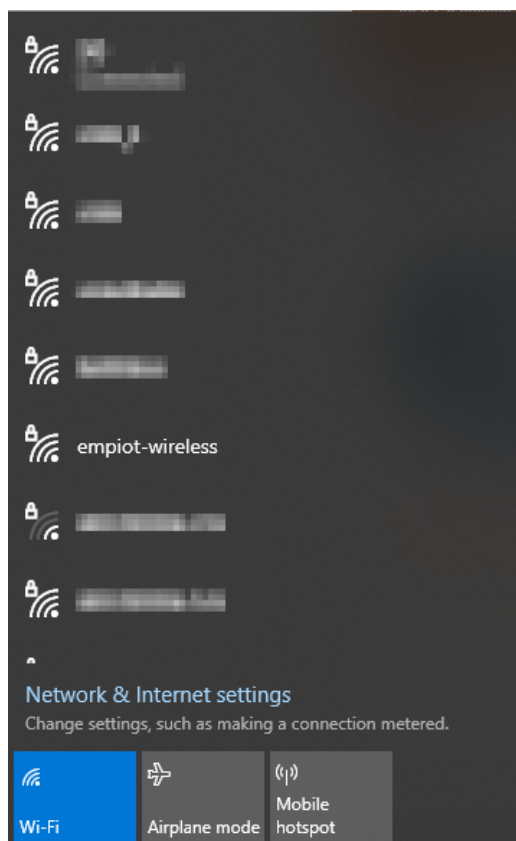
A seguir estão os resultados e discussões, conforme cada parte do projeto.

4.1 Plataforma final e seu uso

Para utilizar a plataforma é necessário primeiramente ter acesso a um dispositivo com acesso a um navegador *web* e uma interface de rede wireless, podendo no caso ser um computador ou um smartphone.

Em seguida é necessário conectar este dispositivo à rede *wireless* criada pelo RPi, com ssid “empiot-wireless” e senha “empiot123”. Na figura 25 é possível ver a rede encontrada por um notebook.

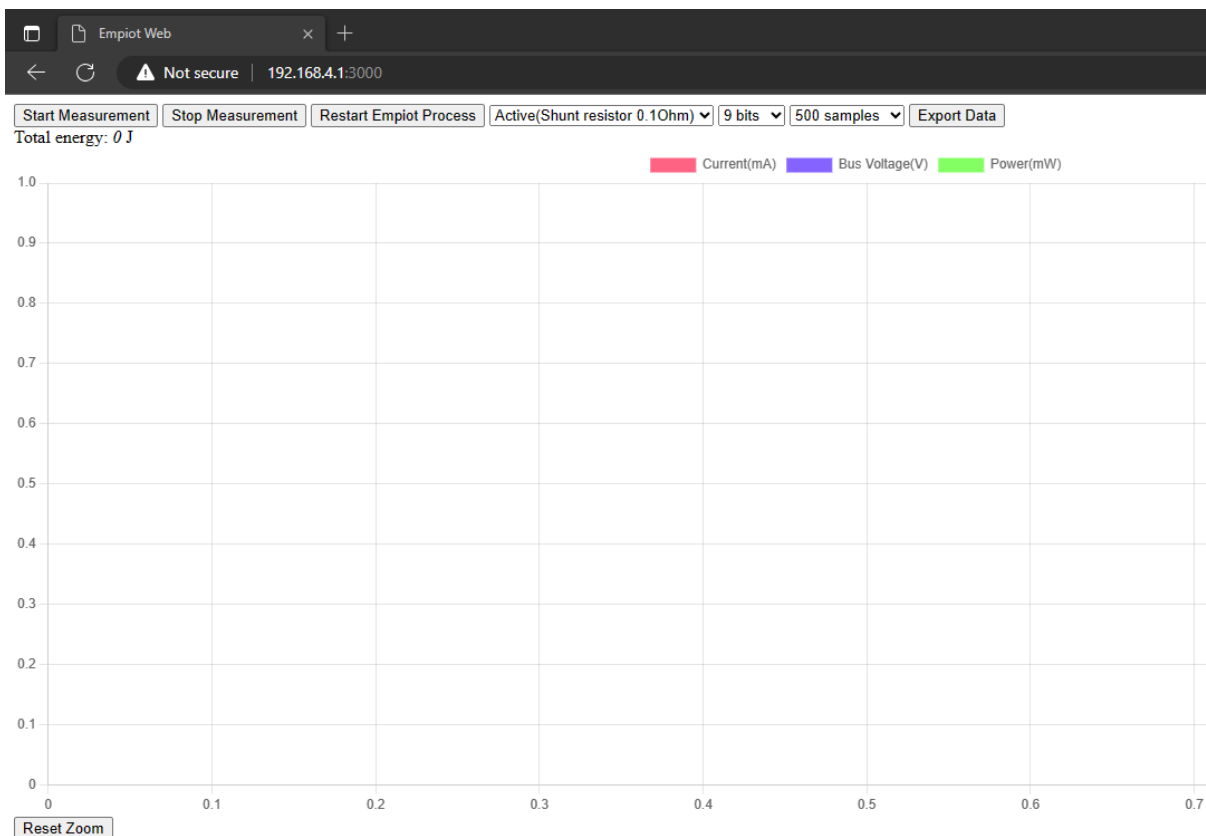
Figura 25: Rede criada pelo protótipo de medidor encontrada por um computador.



Fonte: O autor, 2023.

Conectando-se à rede, com o uso de um navegador é possível acessar a interface do sistema por meio do endereço <http://192.168.4.1:3000>. Ao acessar o endereço, a interface será mostrada conforme a imagem 26.

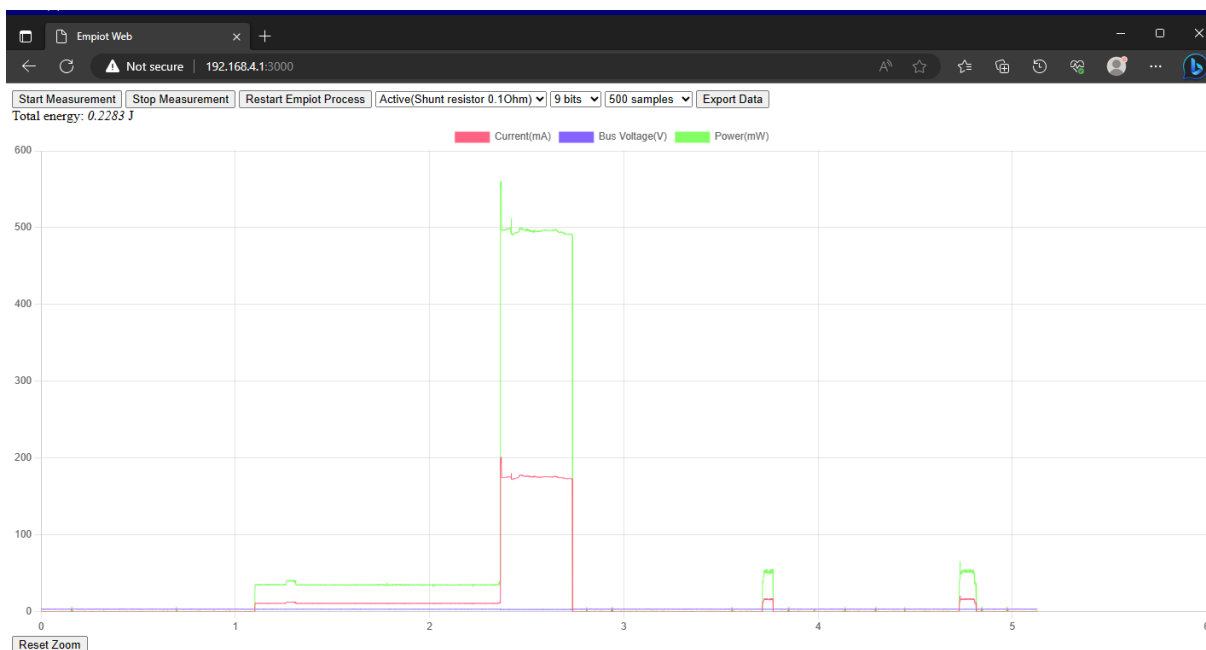
Figura 26: Interface *web* do *software* cliente do protótipo de medidor.



Fonte: O autor, 2023.

No canto superior esquerdo da interface estão os botões de controle usados durante as medições. Os botões “*Start Measurement*” e “*Stop Measurement*” são respectivamente para iniciar e parar uma medição. Assim que o botão de iniciar é clicado, os dados começam a ser enviados ao aplicativo rodando no navegador e o gráfico começa a ser atualizado. Os dados vão se acumulando até que o botão de parar seja clicado. Na figura 27 é possível ver uma medição de 25 segundos. Após o término da medição, caso uma nova medição seja inicializada, os dados da medição anterior são perdidos.

Figura 27: Exemplo de medição realizada no *software* cliente.

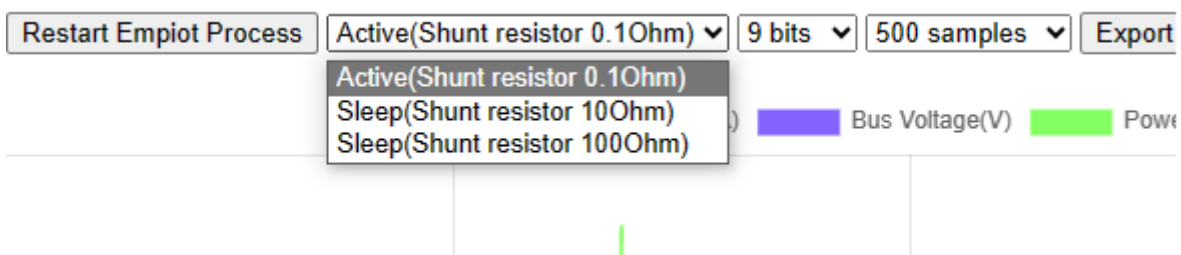


Fonte: O autor, 2023.

O botão “*Restart Emplot Process*” serve para reiniciar o processo em segundo plano do software emplot. Usado para quando o software apresenta comportamento inesperado.

O primeiro selecionador serve para selecionar entre o tipo de medição ativo, o qual é necessário que a resistência *shunt* seja de 0,1 Ω e o modo ocioso cuja resistência pode ser de 10 Ω ou 100 Ω . Na figura 28 é mostrado o selecionador expandido com os possíveis valores.

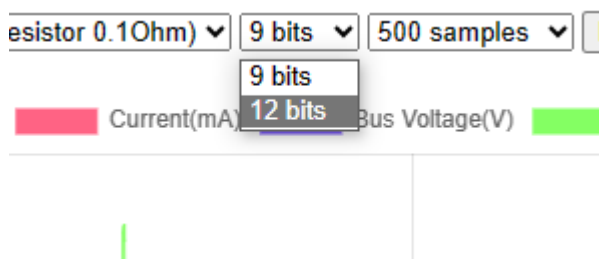
Figura 28: Selecionador do valor de resistência do resistor *shunt*.



Fonte: O autor, 2023.

O segundo selecionador serve para selecionar entre os dois tipos de resoluções, 9 bits e 12 bits conforme a figura 29.

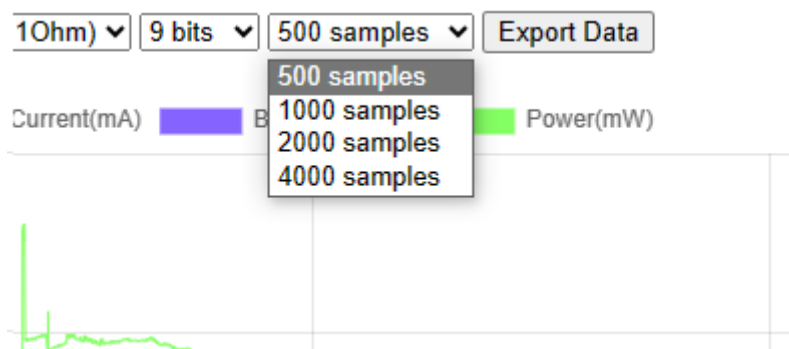
Figura 29: Selecionador de resolução do ADC.



Fonte: O autor, 2023.

Conforme a figura 30, o terceiro selecionador é usado para escolher o tamanho do lote das amostras, podendo variar entre 500, 1.000, 2.000 e 4.000 amostras.

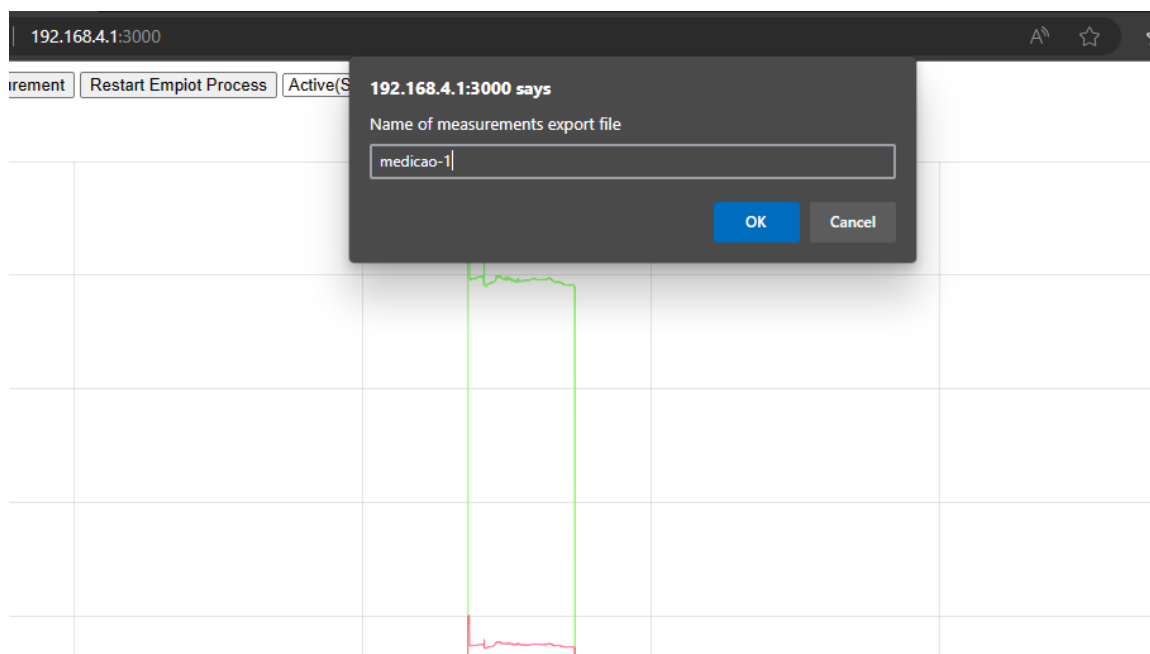
Figura 30: Selecionador do tamanho dos lotes de amostras.



Fonte: O autor, 2023.

Por fim, o botão “*Export Data*” serve para exportar os dados de medição no formato CSV. Ao clicar nele uma entrada de texto é mostrada pedindo para colocar o nome do arquivo a ser salvo, como é possível observar na imagem 31.

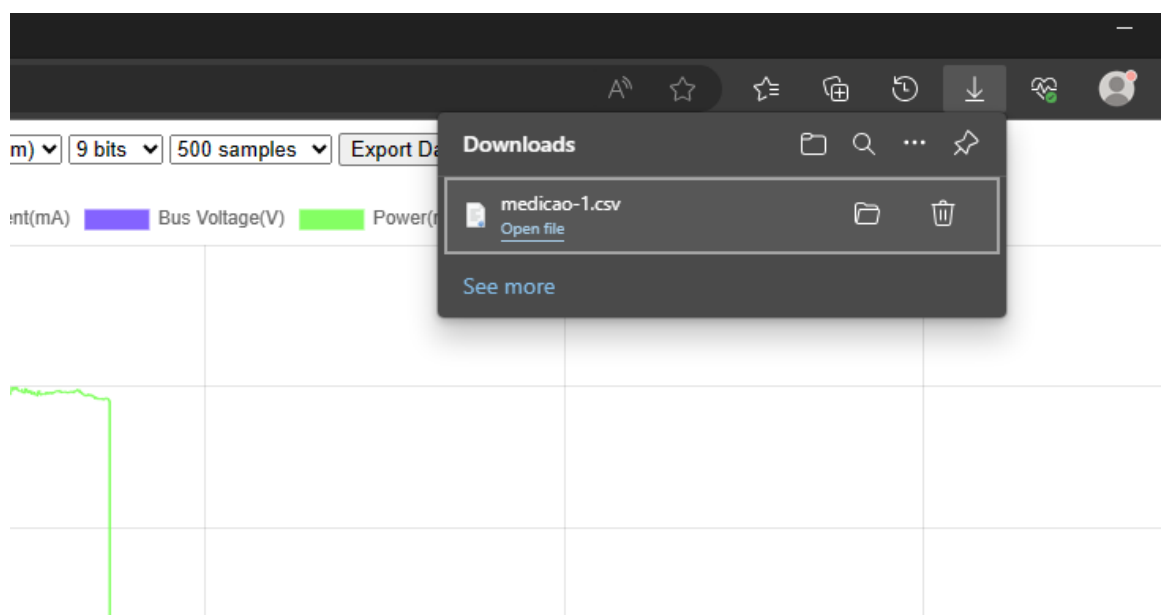
Figura 31: Exportando uma medição para um arquivo CSV.



Fonte: O autor, 2023.

Após definir o nome do arquivo, as medições são salvas no dispositivo cliente para serem analisadas posteriormente por outros softwares conforme imagem 32.

Figura 32: Medição exportada sendo descarregada no computador que está acessando o *software* cliente.



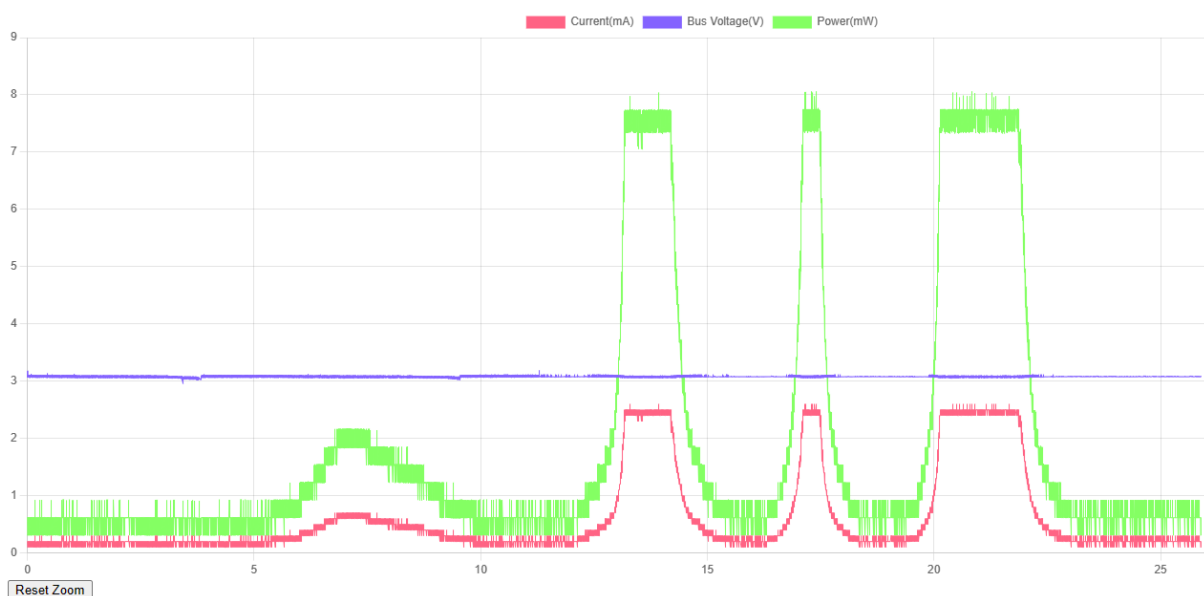
Fonte: O autor, 2023.

Abaixo dos botões há o mostrador de energia total da medição em joules. Este valor é atualizado ao término de cada medição.

No restante da página há o gráfico da medição das grandezas (eixo vertical) pelo tempo em segundos (eixo horizontal). Este gráfico permite realizar *zoom* e deslocar ambos os eixos para ver detalhes em um determinado ponto da medição. O botão posicionado no canto inferior esquerdo, “Reset Zoom”, é usado para voltar o gráfico à sua posição e *zoom* inicial.

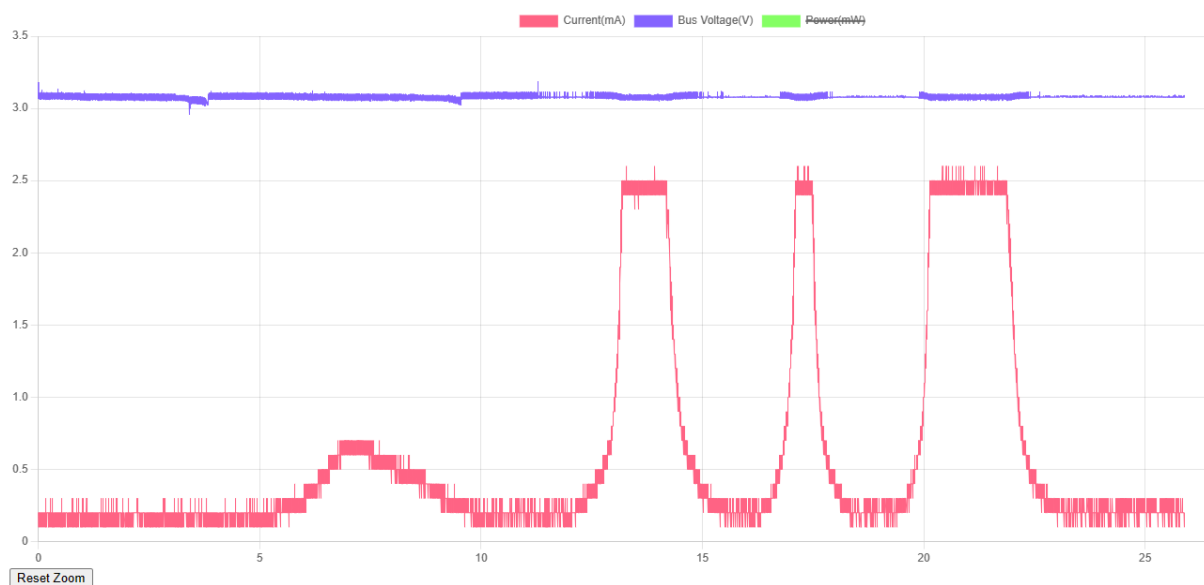
É possível observar todas as grandezas de corrente (em mA), tensão de entrada (em V) e potência (em mW) de uma medição ou selecionar quais mostrar no gráfico por meio dos botões vermelho, azul e verde no centro do gráfico, conforme imagens 33 e 34.

Figura 33: Gráfico com todas as grandezas visíveis.



Fonte: O autor, 2023.

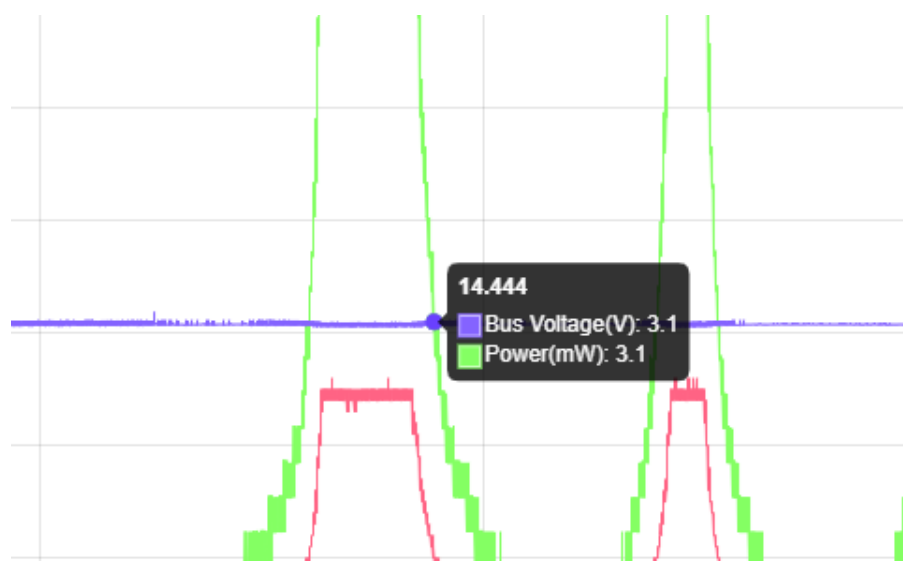
Figura 34: Gráfico com apenas a corrente e tensão de entrada visíveis.



Fonte: O autor, 2023.

Ao colocar o mouse sobre um dos pontos um balão com os detalhes da medição é mostrado para aquele ponto em específico como pode-se ver na figura 35.

Figura 35: Detalhes de uma amostra no gráfico.



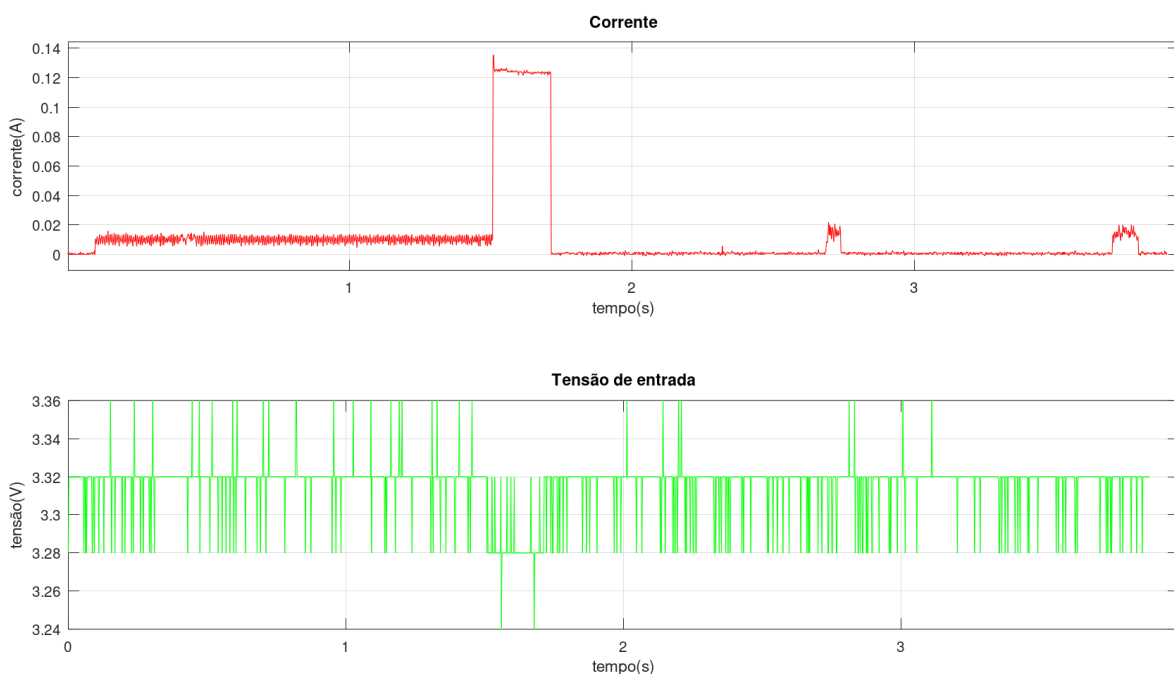
Fonte: O autor, 2023.

4.2 Resultados das medições do nó sensor comercial

4.2.1 Medições do modo ativo

Na figura 36 é possível observar uma das medições do DUT no modo ativo utilizando o osciloscópio com a escala horizontal de 500 ms e escala vertical 20 mV/div com resistor *shunt* de 1 Ω , resultando assim em uma resolução de 800 μ A.

Figura 36: Medição do nó sensor no modo ativo usando o osciloscópio.



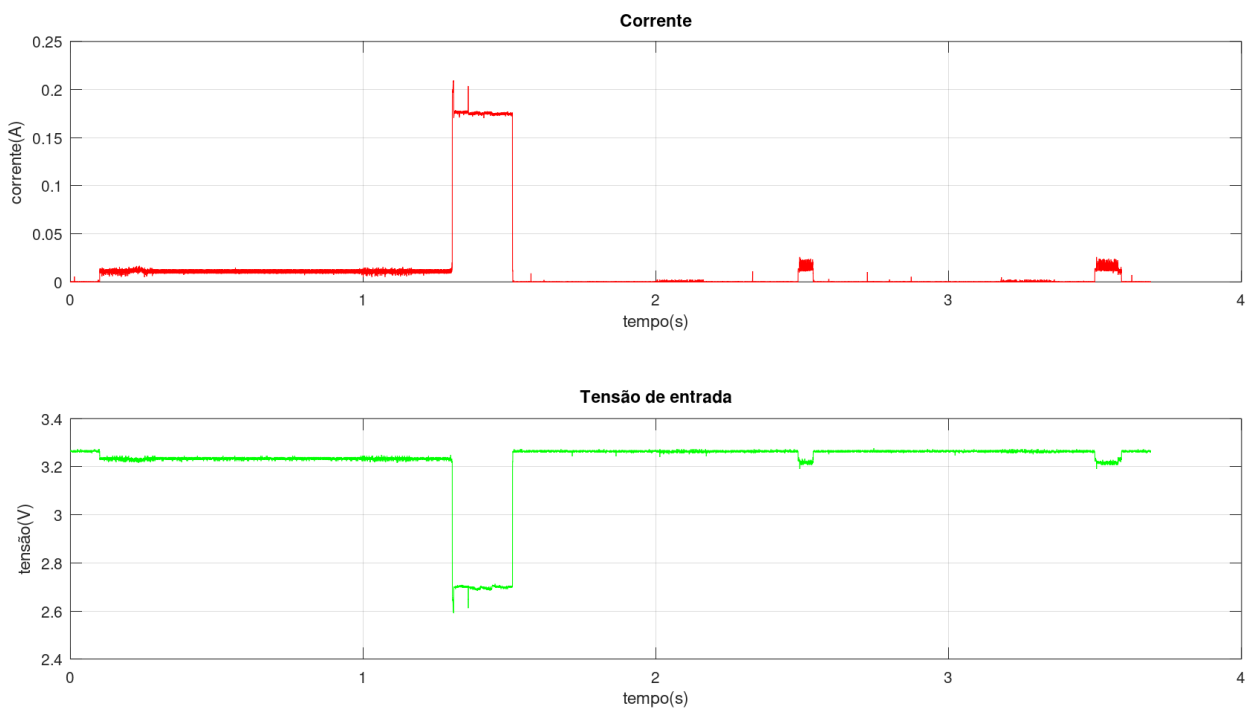
Fonte: O autor, 2023.

É possível observar que o nó sensor ficou operando no modo ativo por aproximadamente 4 segundos e que a corrente máxima no momento da transmissão é de um pouco mais que 120 mA. Além disso, é possível observar que há uma queda na tensão no momento em que o envio inicia.

Com o intuito de manter uma comparação mais uniforme, baseando-se no intervalo de medição do osciloscópio, ajustou-se às medições realizadas no protótipo de medidor para terem o mesmo intervalo, tendo um espaço de 10 ms antes do sensor entrar no modo ativo e 10 ms após a última janela de recebimento de dados.

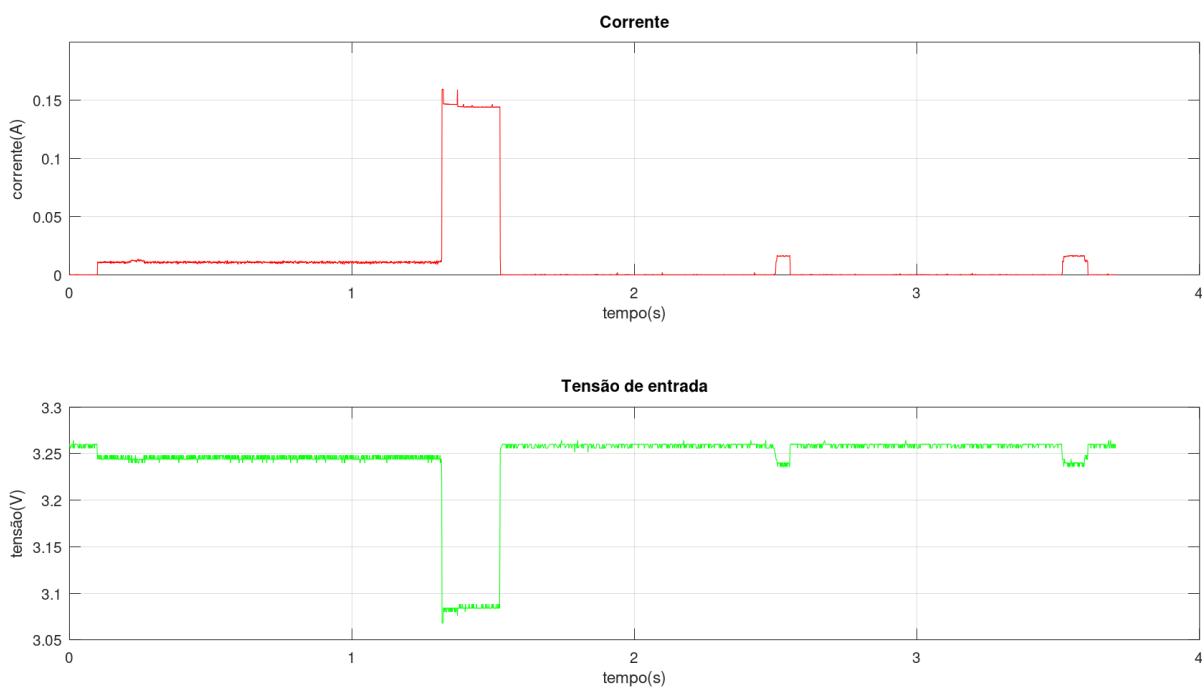
Nas figuras 37 e 38 é possível observar duas das medições realizadas utilizando o protótipo de medidor nas configurações de 9 bits e 12 bits respectivamente.

Figura 37: Medição no sensor no modo ativo utilizando a resolução de 9 bits.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 38: Medição no sensor no modo ativo utilizando a resolução de 12 bits.

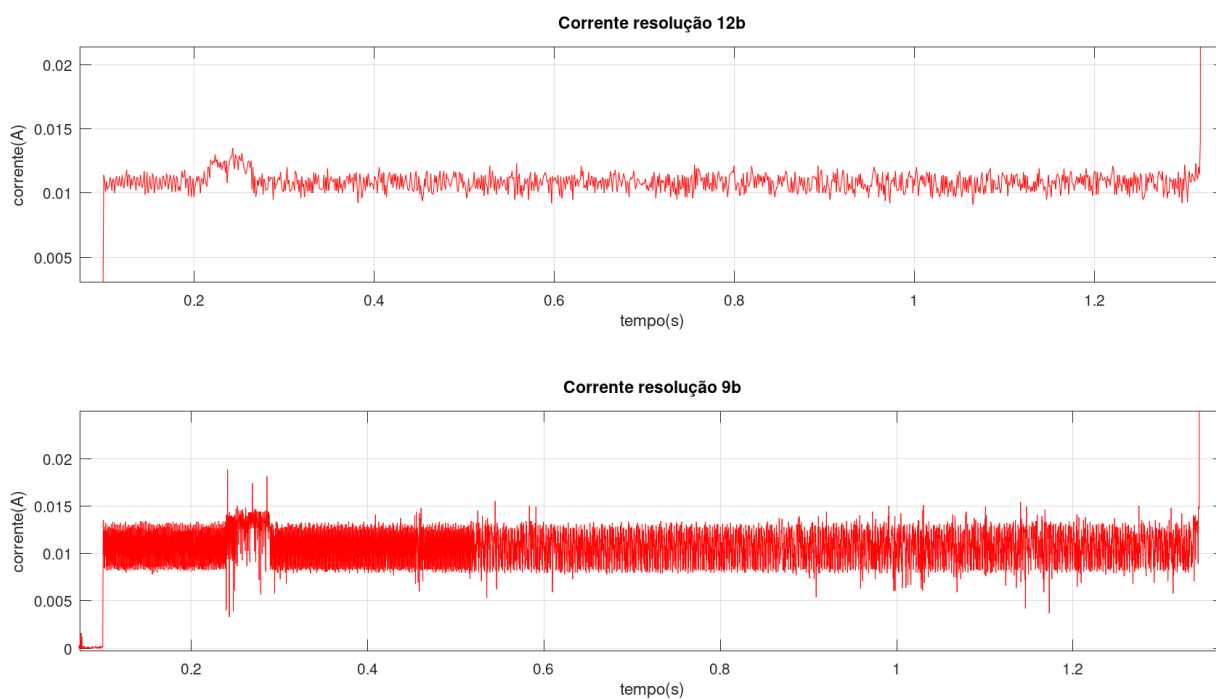


Fonte: O autor, 2023.

Para a configuração em 9 *bits* é possível observar que a corrente no momento da transmissão foi próxima de 175 mA enquanto que em 12 *bits* foi 150mA. Observa-se novamente uma queda na tensão de alimentação, que neste caso foi proveniente do RPi, durante os momentos de maior consumo do DUT, havendo uma queda maior na configuração de 9 bits que em 12 *bits*.

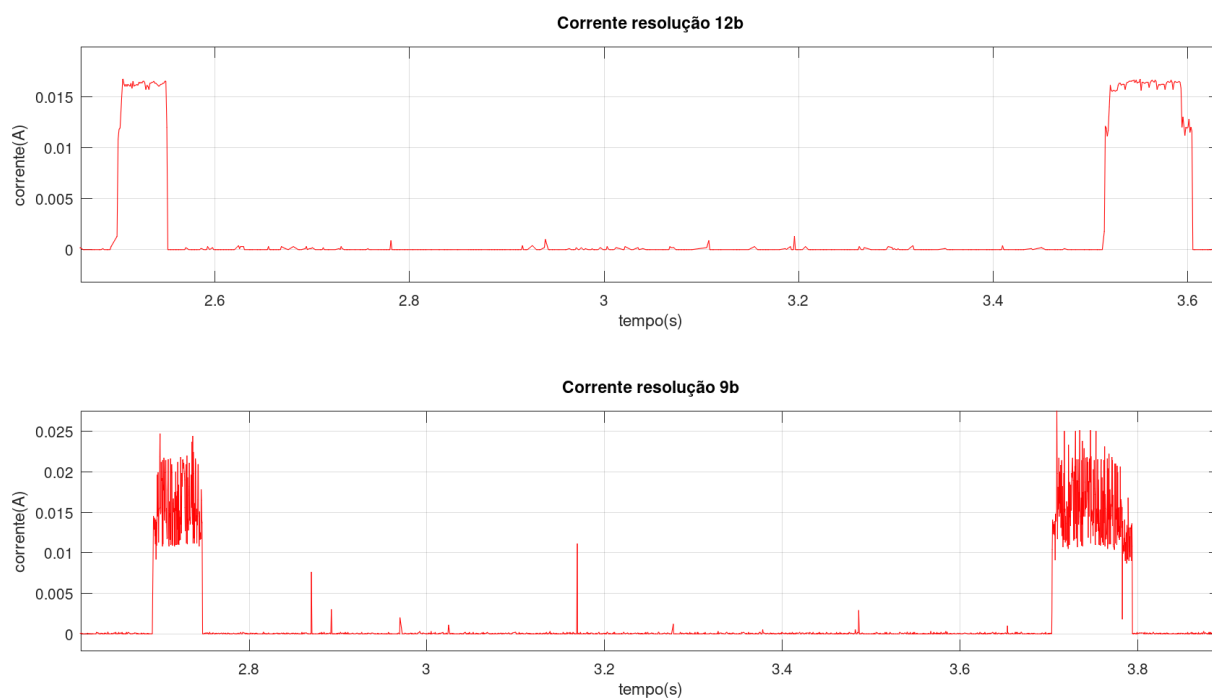
Conforme é possível observar nas figuras 39 e 40, nota-se que a resolução em 12 *bits* captou os valores de corrente com menos variações nas etapas de processamento e janelas de recebimento do que a resolução de 9 *bits*.

Figura 39: Comparação entre as medições de corrente em 9 bits e 12 bits no modo ativo na etapa de processamento.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 40: Comparação entre as medições de corrente em 9 bits e 12 bits no modo ativo das janelas de recebimento.



Fonte: O autor, 2023.

Foram realizadas dez medições com o osciloscópio e dez com o protótipo de medidor para cada resolução.

No quadro 2 são apresentados, para todo o período ativo, os valores médios da corrente RMS, duração, número de amostras e a energia. Apesar dos valores de corrente RMS obtidos pelo protótipo terem divergido consideravelmente dos do osciloscópio, nota-se que os valores de energia ficaram similares, principalmente quando comparado as medições do osciloscópio e do protótipo de medidor com resolução de 12 *bits*.

Quadro 2: Valores médios das medições de todo o período ativo

Medição	Corrente RMS (A)	Corrente RMS - desvio padrão (%)	Duração (s)	Duração - desvio padrão (%)	N. de amostras	N. de amostras - desvio padrão (%)	Energia (J)	Energia (J) - desvio padrão (%)
Protótipo Medidor 9 bits	0,044666	3,30	3,550	3,32	12707	3,02	0,14609	3,19
Protótipo Medidor 12 bits	0,042834	2,21	3,553	2,56	2408	2,48	0,14403	4,22
Osciloscópio	0,030986	1,14	3,637	3,56	1819	3,55	0,14175	3,29

Fonte: O autor, 2023.

No quadro 3 são apresentados as mesmas variáveis que no quadro 1, porém apenas para a etapa de processamento e com uma coluna a mais que representa a energia relativa a energia total quadro 1. Observa-se que os valores de corrente são mais similares nesta etapa, assim como os valores de energia.

Quadro 3: Valores médios das medições para a etapa de processamento

Medição	Corrente RMS (A)	Corrente RMS - desvio padrão (%)	Duração (s)	Duração - desvio padrão (%)	N. de amostras	N. de amostras - desvio padrão (%)	Energia (J)	Energia (J) - desvio padrão (%)	Energia relativa ao total (%)
Protótipo Medidor 9 bits	0,011521	3,30	1,2449	3,32	5552	3,02	0,043749	3,19	29,95
Protótipo Medidor 12 bits	0,011711	2,21	1,248	2,56	1218	2,48	0,044675	4,22	31,02
Osciloscópio	0,010555	1,14	1,3307	3,56	666	3,55	0,045304	3,29	31,96

Fonte: O autor, 2023.

No quadro 4 onde são mostrados os valores para a etapa de transmissão é evidente que há uma maior discrepância entre os valores de corrente e energia do

medidor e o osciloscópio, sendo a configuração de 12 *bits* a mais próxima do valor do osciloscópio.

Quadro 4: Valores médios das medições para a etapa de transmissão

Medição	Corrente RMS (A)	Corrente RMS - desvio padrão (%)	Duração (s)	Duração - desvio padrão (%)	N. de amostras	N. de amostras - desvio padrão (%)	Energia (J)	Energia (J) - desvio padrão (%)	Energia relativa ao total (%)
Protótipo Medidor 9 bits	0,1632	3,37	0,20553	0,18	919	0,17	0,094133	1,41	64,43
Protótipo Medidor 12 bits	0,14467	1,12	0,20676	0,36	202	0,51	0,091715	1,14	63,68
Osciloscópio	0,12582	1,12	0,20727	0,49	105	0,48	0,085796	1,19	60,53

Fonte: O autor, 2023.

Por fim, os quadros 5 e 6 apresentam os valores para as etapas da primeira e segunda janelas de recebimento. No geral, os valores de duração e energia ficaram semelhantes.

Quadro 4: Valores médios das medições para a primeira janela de recebimento

Medição	Corrente RMS (A)	Corrente RMS - desvio padrão (%)	Duração (s)	Duração - desvio padrão (%)	N. de amostras	N. de amostras - desvio padrão (%)	Energia (J)	Energia (J) - desvio padrão (%)	Energia relativa ao total (%)
Protótipo Medidor 9 bits	0,016471	1,99	0,05141	1,64	230	1,25	0,0026245	1,79	1,80
Protótipo Medidor 12 bits	0,015669	0,62	0,05135	5,17	50	0,85	0,0025176	0,97	1,75
Osciloscópio	0,014509	5,10	0,051273	5,59	27	5,38	0,0024065	4,52	1,65

Fonte: O autor, 2023.

Quadro 6: Valores médios das medições para a segunda janela de recebimento

Medição	Corrente RMS (A)	Corrente RMS - desvio padrão (%)	Duração (s)	Duração - desvio padrão (%)	N. de amostras	N. de amostras - desvio padrão (%)	Energia (J)	Energia (J) - desvio padrão (%)	Energia relativa ao total (%)
Protótipo Medidor 9 bits	0,016217	1,54	0,09082	0,40	406	0,63	0,0045537	1,38	3,12
Protótipo Medidor 12 bits	0,015389	0,36	0,0927	5,01	89	0,93	0,0044261	0,41	3,07
Osciloscópio	0,014567	3,56	0,090364	2,17	46	2,13	0,0042442	2,64	2,99

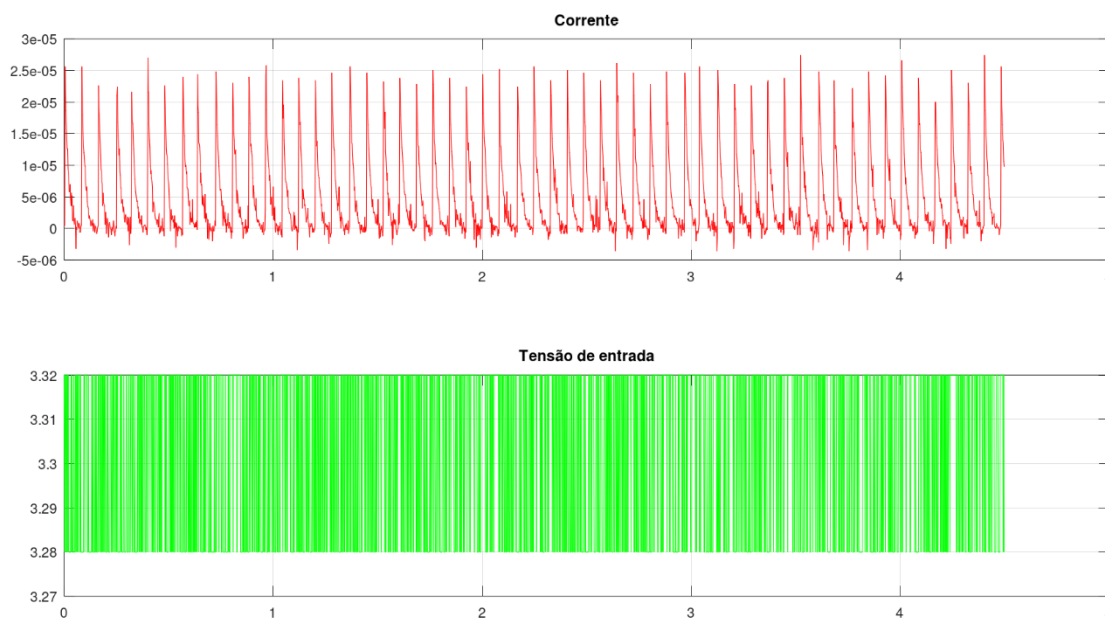
Fonte: O autor, 2023.

É possível notar que apesar da medição com o protótipo em 9 *bits* possuir um pouco mais que três vezes o número de amostras das medições em 12 *bits*, os valores entre si ficaram bem próximos, porém quando comparado aos valores do osciloscópio, as medições em 12 *bits* ficaram mais próximas.

4.2.2 Medições do modo ocioso

Conforme a figura 41, observa-se o gráfico da medição do nó sensor no modo ocioso com o osciloscópio na escala vertical de 10 mV/div e resistor *shunt* de 2 k Ω resultando em uma resolução de 0,2 μ A. A escala horizontal foi de 500 ms. É possível observar que a corrente oscila seguindo um padrão similar ao de uma exponencial decrescente com picos próximos a 25 μ A.

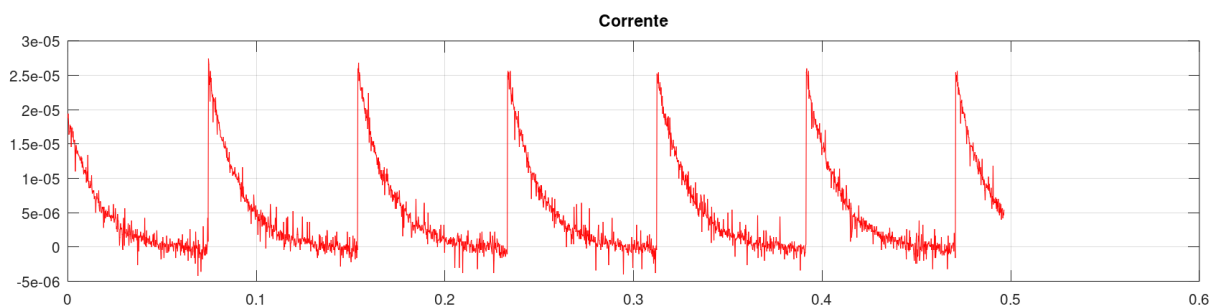
Figura 41: Medição do nó sensor no modo ocioso com o osciloscópio na escala vertical de 10 mV/div e resistor *shunt* de 2 k Ω a escala horizontal de 500 ms.



Fonte: O autor, 2023.

Na figura 42, foi realizado outra medição do DUT no modo ocioso utilizando o osciloscópio com a escala vertical de 10 mV/div, resistor *shunt* de 2 k Ω porém dessa vez com a escala horizontal em 50 ms. Aqui é possível observar com mais detalhes o padrão oscilatório cujo o período é de aproximadamente 80 ms.

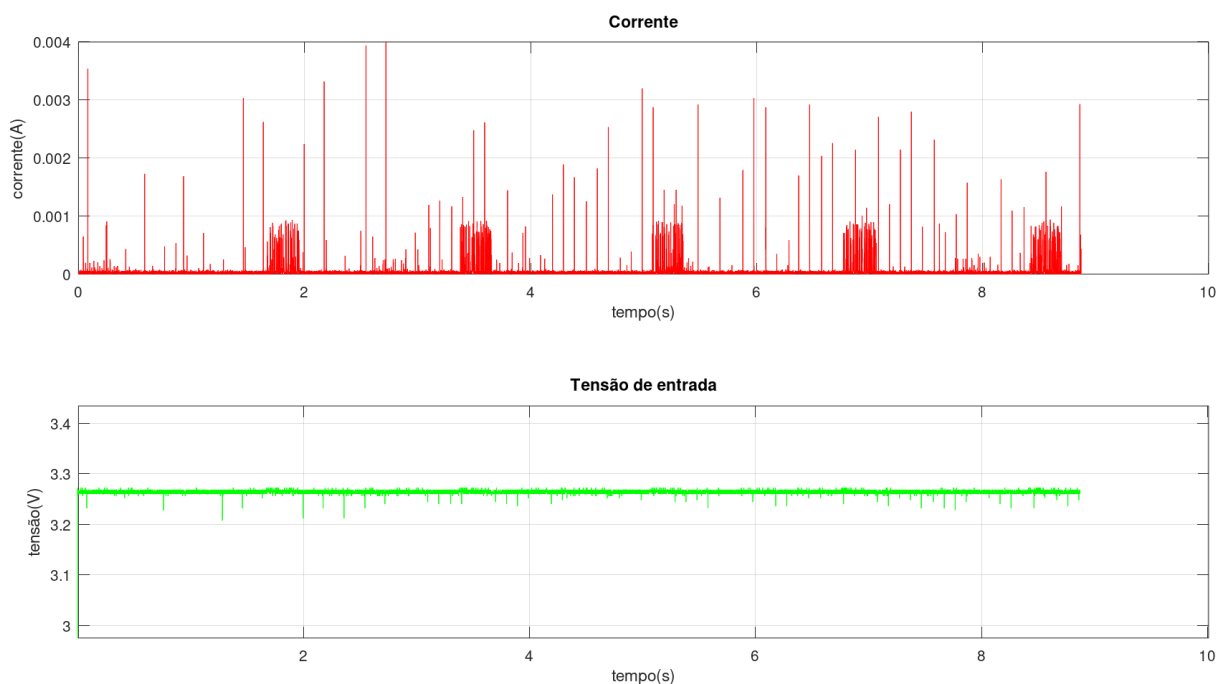
Figura 42: Medição do nó sensor no modo ocioso com o osciloscópio na escala vertical de 10 mV/div e resistor *shunt* de 2 k Ω a escala horizontal de 50 ms.



Fonte: O autor, 2023.

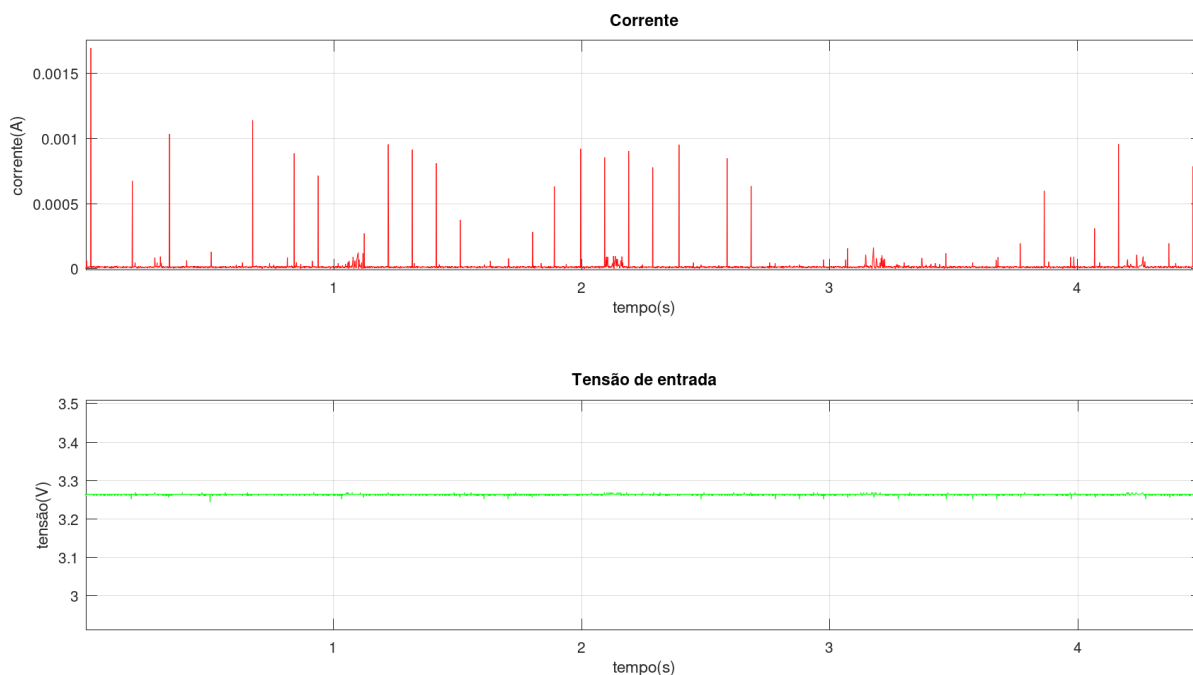
Nas figuras 43 e 44 é possível observar as medições resultantes utilizando o protótipo de medidor com o resistor *shunt* de 10 Ω para as resoluções de 9 e 12 *bits* respectivamente.

Figura 43: Medição no sensor no modo ocioso utilizando a resolução de 9 bits e resistor de 10 Ω .



Fonte: O autor, 2023.

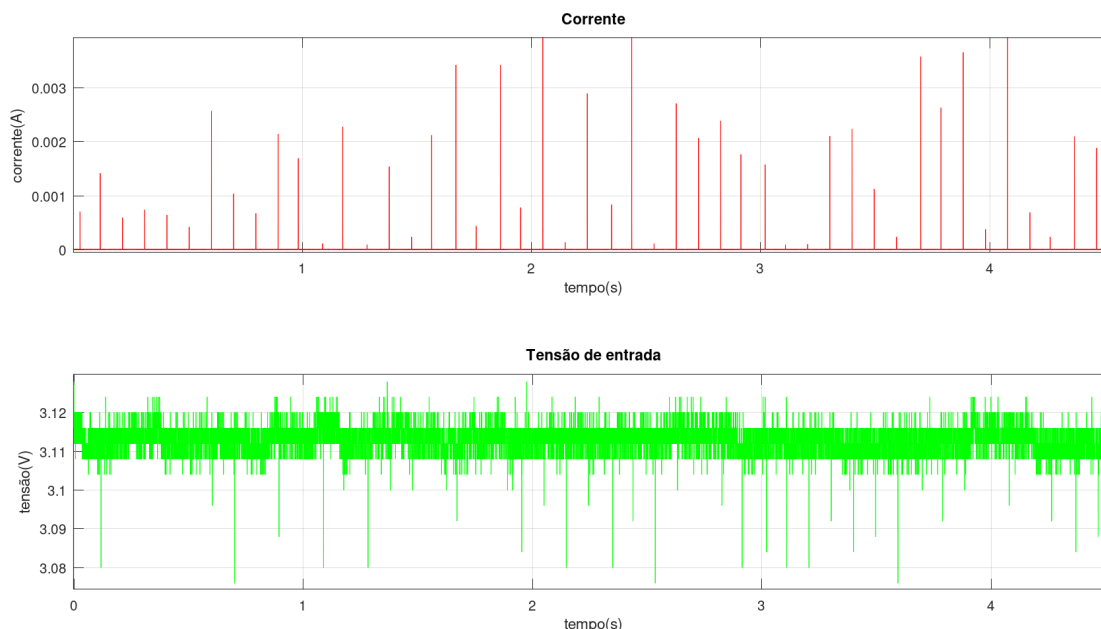
Figura 44: Medição no sensor no modo ocioso utilizando a resolução de 12 *bits* e resistor de 10 Ω .



Fonte: O autor, 2023.

A medição em 9 *bits* possui alguns valores máximos próximos de 4 mA enquanto a de 12 *bits* 1,5 mA. Além disso, nota-se um certo sinal periódico a cada 1 s em 12 *bits* e a cada 2 s em 9 *bits* onde este sinal periódico é mais evidente. Constatou-se que este sinal aparecia toda vez que o protótipo enviava as medições ao aplicativo cliente. Uma vez que o DUT estava sendo alimentado pelo RPi, optou-se por utilizar uma fonte de tensão externa e como é possível observar na figura 45, o sinal periódico gerado pelo envio já não estava mais presente nas medições mostrando assim que ao utilizar o RPi como fonte de tensão do DUT, fica mais evidente a influência de seu funcionamento nas medições de corrente menores. Por este motivo, as medições com o protótipo de medidor restantes no modo ocioso foram realizadas com o DUT alimentado por uma fonte de tensão externa.

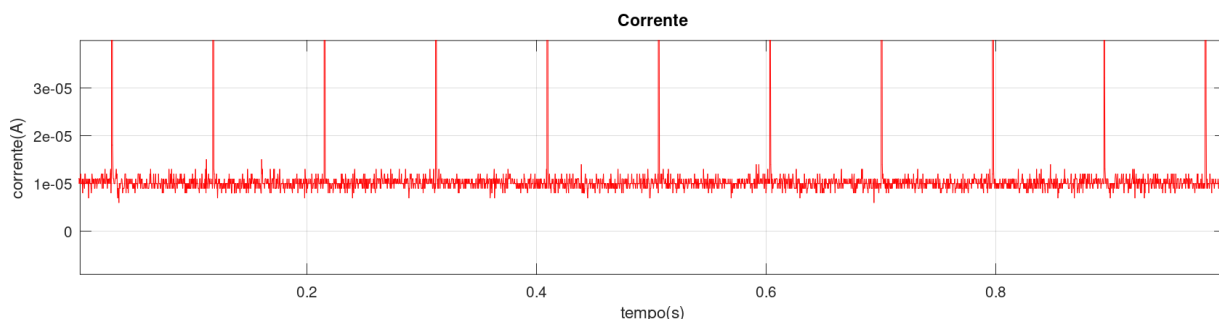
Figura 45: Medição nó sensor no modo ocioso utilizando a resolução de 9 *bits* e resistor de 10 Ω utilizando fonte de tensão externa.



Fonte: O autor, 2023.

Como é possível observar na figura 46, os picos de corrente possuem períodos semelhantes aos do obtido no osciloscópio, porém o período da exponencial decrescente não foi captado, apenas uma corrente constante de aproximadamente 10 μA .

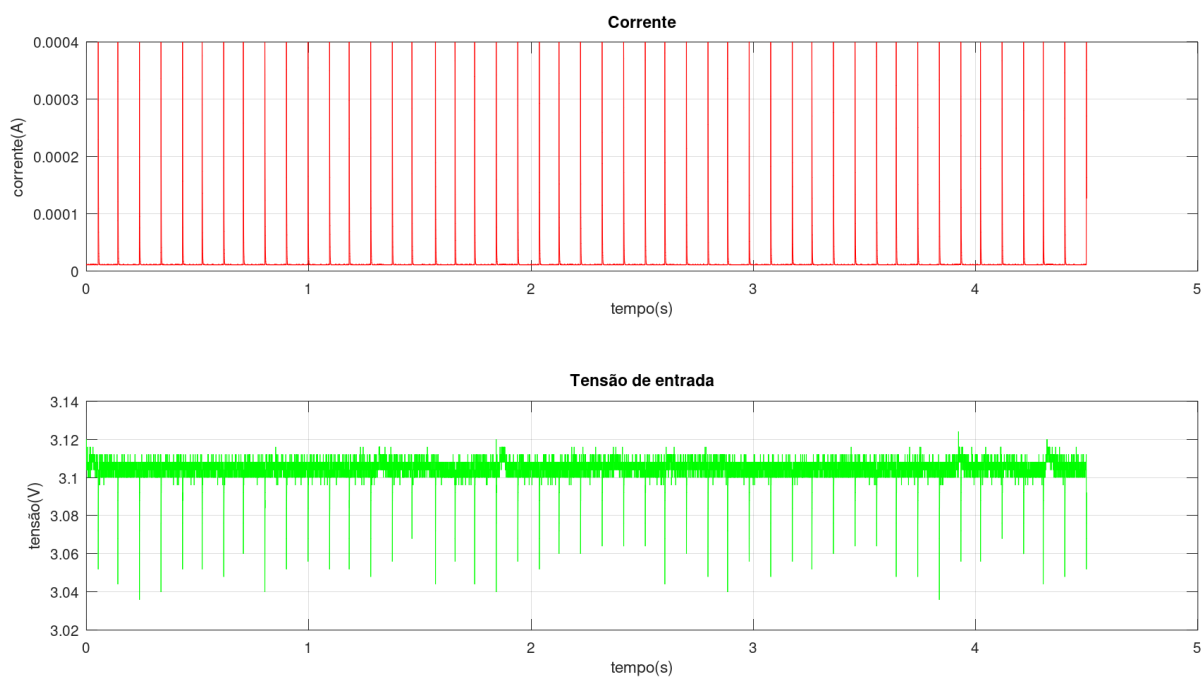
Figura 46: Ampliação da medição do nó sensor no modo ocioso utilizando a resolução de 9 bits e resistor de 10 Ω .



Fonte: O autor, 2023.

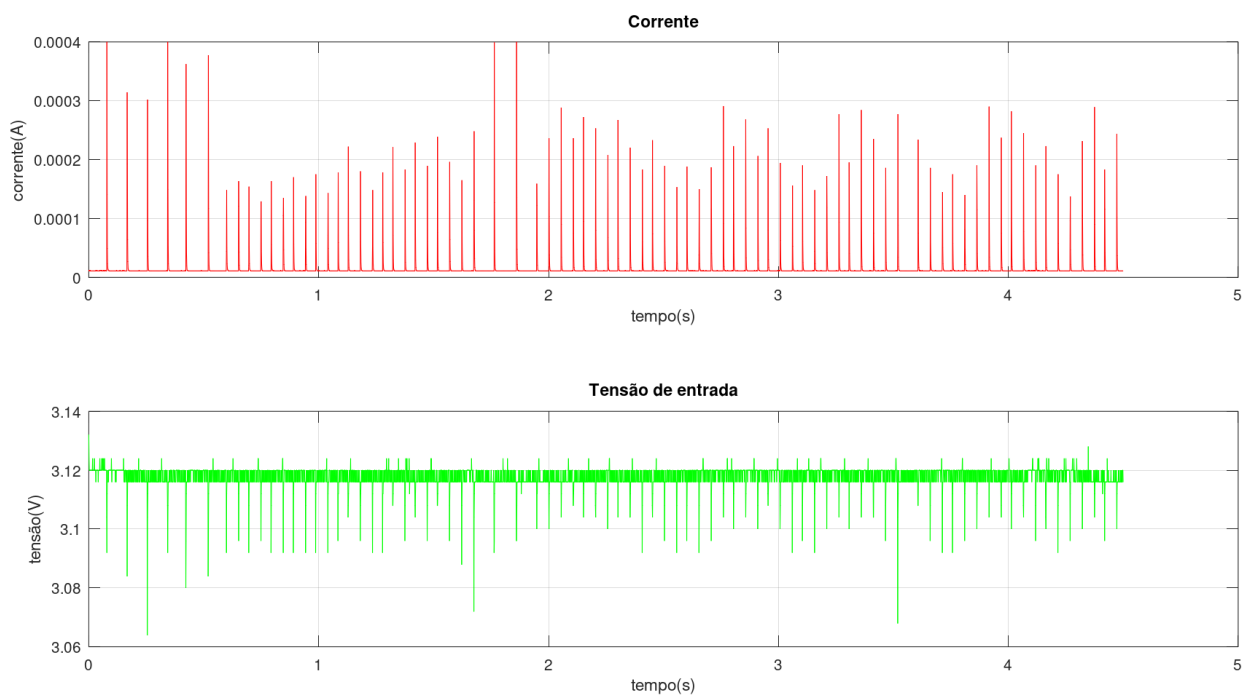
Nas figuras 47 e 48 é possível observar as medições realizadas utilizando um resistor *shunt* de 100 Ω nas resoluções de 9 bits e 12 bits.

Figura 47: Medição nó sensor no modo ocioso utilizando a resolução de 9 bits e resistor de 100Ω .



Fonte: O autor, 2023.

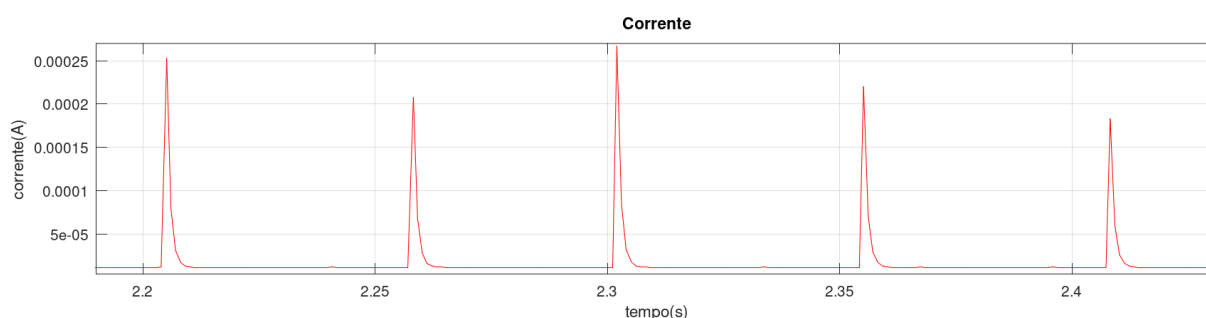
Figura 48: Medição nó sensor no modo ocioso utilizando a resolução de 12 bits e resistor de 100Ω .



Fonte: O autor, 2023.

Na medição realizada em 9 *bits* é possível observar que quase todos os picos de corrente ultrapassam os 400 μA , corrente máxima desta configuração, e ocorrem em aproximadamente a cada 100 ms. Já a medição em 12 *bits* apresentou menos picos que atingissem a corrente máxima de 400 μA , porém para os picos que não atingem o limite se repetem em um intervalo menor de aproximadamente 50 ms como é possível ver na figura 49.

Figura 49: Ampliação da medição do nó sensor no modo ocioso utilizando a resolução de 12 *bits* e resistor de 100 Ω .



Fonte: O autor, 2023.

No quadro 7 são apresentados os valores médios calculados a partir de 10 medições para cada caso. Junto aos valores médios também é apresentado o erro relativo aos valores do nó sensor fornecidos em seu *datasheet*¹, sendo 6,3 μA para a corrente e 20,79 μW (calculado considerando uma tensão de 3,3 V) para a potência. Como é possível observar no quadro, as medições utilizando o resistor de 100 Ω resultaram no menor erro relativo para a medição da corrente sendo 499,22% e 554,87% para as resoluções de 12 *bits* e 9 *bits* respectivamente. Apesar disso os valores de potência para todas as configurações obtiveram valores similares, sendo com menor erro relativo as configurações utilizando o resistor 10 Ω . Vale ressaltar que as medições utilizando o osciloscópio também divergiram do valor especificado no *datasheet* do nó sensor, porém assim como o protótipo de medidor, obtiveram valores de erro menor para a potência.

¹ https://www.khomp.com/wp-content/uploads/2019/02/Endpoint_LoRa_-_EN_v8-1.pdf

Quadro 7: Valores médios das medições do nó sensor no modo ocioso

Medição	Corrente (A)	Corrente - desvio padrão (%)	Duração (s)	Duração - desvio padrão (%)	N. amostras	N. amostras - desvio padrão (%)	Energia (J)	Energia - desvio padrão (%)	Potência (W)
Protótipo Medidor 9 bits (10 Ω)	123,45E-6	10,02	4,50	2,45E-3	14137	4,16	225,44E-6	5,15	50,10E-6
Protótipo Medidor 9 bits (100 Ω)	41,26E-6	3,50	4,50	1,17E-3	14526	4,60	232,44E-6	1,89	51,65E-6
Protótipo Medidor 12 bits (10 Ω)	77,52E-6	11,81	4,50	5,18E-3	4401	0,27	229,10E-6	6,98	50,92E-6
Protótipo Medidor 12 bits (100 Ω)	37,75E-6	7,70	4,50	4,09E-3	4404	0,09	236,38E-6	2,19	52,53E-6
Osciloscópio 500 ms	8,25E-6	2,42	4,50	4,20E-6	2250	0,00	72,05E-6	0,80	16,02E-6
Osciloscópio 50 ms	8,57E-6	2,23	0,50	11,71E-15	2500	0,00	8,13E-6	2,68	16,26E-6

Fonte: O autor, 2023.

4.2.3 Estimativa de consumo do nó sensor

Considerando um ciclo de operação de cinco minutos (300 segundos) e utilizando os valores de medição do modo ativo realizados pelo osciloscópio, o quadro 8 traz os valores de consumo energético do modo ocioso em um ciclo de operação para cada configuração de medição, onde realizaram-se cálculos de energia utilizando a energia média e também utilizando a corrente média RMS considerando uma tensão de 3,3V. É possível notar que a energia total utilizando a energia média nos cálculos ficou menor que os valores calculados utilizando a corrente média, isso se dá pois a energia média é obtida utilizando tanto a tensão instantânea quanto a corrente instantânea e como constatado na seção 4.2.1, há momentos onde ocorrem quedas de tensão consideráveis (transmissão por exemplo), enquanto utilizando a corrente média considera-se uma tensão constante de 3,3 V.

Observa-se que ao utilizar os valores de energia média, não houve diferença significativa entre os valores obtidos pelo protótipo de medidor, resultando em valores relativos entre 9 e 10%, porém a medição realizada pelo osciloscópio ficou mais baixa, sendo esta 3,24 %. Quanto ao cálculo da energia utilizando a corrente RMS média, ambas as configurações de resolução utilizando o resistor de 100 Ω não alteraram significativamente os seus valores relativos, com uma redução para 9.03 % na medição em 12 *bits*. Já os cálculos utilizando os valores com o resistor de 10 Ω tiveram um aumento na energia relativa, chegando a até 24,51 % para a resolução de 9 *bits*. Usando a medição do osciloscópio houve uma queda de 1,12 %.

Quadro 08: Consumo energético no modo ocioso em um ciclo de operação de cinco minutos

Medição	Energia - Energia média (J)	Energia relativa ao ciclo de op. (%)	Energia - corrente RMS média (J)	Energia relativa ao ciclo de op. (%)
Protótipo Medidor 9 bits (10 Ω)	14,8E-3	9,48	120,7E-3	24,51
Protótipo Medidor 9 bits (100 Ω)	15,3E-3	9,75	40,3E-3	9,79
Protótipo Medidor 12 bits (10 Ω)	15,1E-3	9,62	75,8E-3	16,93
Protótipo Medidor 12 bits (100 Ω)	15,6E-3	9,90	36,9E-3	9,03
Osciloscópio 500 ms	4,7E-3	3,24	8,1E-3	2,12

Fonte: O autor, 2023.

No quadro 9 são apresentados os valores de consumo energético para o modo ativo em um ciclo de operação. O valor de energia no modo ocioso utilizado é o da medição com o osciloscópio no intervalo horizontal de 500 ms. Os cálculos utilizando a corrente média RMS do protótipo de medidor resultaram em uma energia relativa maior que utilizando a energia média. Para ambos os resultados

utilizando os valores do protótipo de medidor houve um aumento na energia relativa de um pouco menos de 2% enquanto para o osciloscópio o aumento foi de 1,12%.

Quadro 9: Consumo energético no modo ativo em um ciclo de operação de cinco minutos

Medição	Energia - Energia média (J)	Energia relativa ao ciclo de op. (%)	Energia - corrente RMS média (J)	Energia relativa ao ciclo de op. (%)
Protótipo Medidor 9 bits	146,09E-03	96,85	523,31E-03	98,48
Protótipo Medidor 12 bits	144,03E-03	96,81	502,18E-03	98,42
Osciloscópio	141,75E-03	96,76	371,89E-03	97,88

Fonte: O autor, 2023.

Conforme o *datasheet* do nó sensor, a sua autonomia está estimada em 390 dias considerando uma bateria com carga de 2500 mAh e com envios a cada cinco minutos, porém não foi informado o ganho exato do transmissor. Com base nestes valores a autonomia total foi calculada utilizando os valores de energia média e corrente RMS média, onde as configurações de resolução são as mesmas nos dois modos. Os resultados estão presentes nos quadros 10 e 11.

Quadro 10: Autonomia do nó sensor utilizando os valores de energia média para um ciclo de operação de 5 minutos e uma bateria de 2500 mAh

Medição	Corrente média (A)	Duração (dias)	Erro relativo duração (%)
Protótipo Medidor 9 bits (10 Ω)	162,56E-06	640,78	64,30
Protótipo Medidor 9 bits (100 Ω)	163,03E-06	638,95	63,83
Protótipo Medidor 12 bits (10 Ω)	160,73E-06	648,10	66,18
Protótipo Medidor 12 bits (100 Ω)	161,21E-06	646,15	65,68
Osciloscópio	147,98E-06	703,94	80,50

Fonte: O autor, 2023.

Quadro 11: Autonomia do nó sensor utilizando os valores de corrente RMS média para um ciclo de operação de 5 minutos e uma bateria de 2500 mAh

Medição	Corrente média (A)	Duração (dias)	Erro relativo duração (%)
Protótipo Medidor 9 bits (10 Ω)	650,58E-06	160,11	58,95
Protótipo Medidor 9 bits (100 Ω)	569,36E-06	182,95	53,09
Protótipo Medidor 12 bits (10 Ω)	583,85E-06	178,41	54,25
Protótipo Medidor 12 bits (100 Ω)	544,56E-06	191,29	50,95
Osciloscópio	383,80E-06	271,41	30,41

Fonte: O autor, 2023.

Dentre os dois métodos de cálculo o que resultou em um menor erro relativo foi utilizando corrente RMS. Utilizando a energia média, os resultados foram de aproximadamente 250 dias a mais que o especificado pelo fabricante para o protótipo de medidor e de 314 para o osciloscópio. Já para a corrente RMS média os valores ficaram abaixo dos 390 dias, sendo o pior caso a medição com o protótipo utilizando a resolução de 9 *bits* e resistor de 10 Ω . O cálculo com a medição do osciloscópio resultou em uma autonomia de aproximadamente 271 dias, tendo um erro relativo de 30.41%.

A configuração para o protótipo de medidor que apresentou menor erro relativo no cálculo da autonomia foi utilizando a resolução de 12 *bits* com o resistor de 100 Ω resultando em um erro relativo de 50.95%. Quando comparado com a medição do osciloscópio o erro relativo foi de 29,52%.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de medidor capaz de medir o consumo energético de dispositivos de baixo consumo com um enfoque em dispositivos nós sensores que operam utilizando o padrão LoRa. Sua construção não requer dispositivos sofisticados ou o desenvolvimento de circuitos complexos, necessitando apenas de componentes facilmente encontrados no mercado.

Uma interface foi desenvolvida visando operar em qualquer dispositivo que tenha acesso a um navegador *web*. Ela opera em tempo real e já possui a apresentação em gráfico da medição realizada, possibilitando exportar os dados de forma estruturada para serem utilizados em outros *softwares*.

Todo o sistema é de código aberto e está disponível em um repositório online², permitindo assim que ele possa ser aprimorado e melhorado, além de permitir ser integrado com outros sistemas e projetos, bastando ter acesso apenas aos *hardwares* utilizados.

Quanto ao seu funcionamento, ele conseguiu captar o perfil de corrente característica de um dispositivo nó sensor que opera utilizando o padrão LoRa, sendo possível observar os diferentes níveis de corrente durante as diferentes operações realizadas, como o processamento, envio e recebimento dos dados. Para medição do modo ativo, o protótipo apresentou valores próximos ao do osciloscópio para as correntes de processamento e de recebimento, porém para a corrente de transmissão o protótipo acabou medindo um pouco acima que o osciloscópio, chegando a divergir em até 40 mA apesar de que os valores de energia desta etapa ficaram similares. Todos os valores obtidos com o protótipo de medidor no modo ativo ficaram acima dos valores obtidos com o osciloscópio, sendo uma das possíveis causas a utilização do valor nominal do resistor de 0,1 Ω para os cálculos ao invés do real medido, o qual divergiu em quase 6%.

Houve uma maior imprecisão para as medições no modo ocioso, onde quando comparado aos valores do *datasheet*, a corrente medida obteve um erro de 500% além de não ter captado o mesmo padrão de corrente que o osciloscópio. Apesar disso, ao utilizar os valores de energia média, os quais consideram também os valores de tensão instantânea, e, portanto acredita-se ser o método mais confiável, a autonomia resultante utilizando os valores medidos pelo protótipo ficou

² <https://github.com/mateuscelio/empiot-server>

em 65,58% a mais que o especificado pelo fabricante enquanto utilizando os valores do osciloscópio ficou em 80,50% a mais, e havendo apenas uma diferença de 8,21% entre o osciloscópio e o protótipo de medidor. Vale ressaltar que o fabricante não traz o valor exato do ganho do transmissor usado em suas estimativas, podendo este ser um dos motivos da divergência dos valores, pois o consumo total é em mais de 97,88% representado pelo modo ativo, que por sua vez depende maioritariamente do consumo durante a transmissão.

Há espaço para melhorias quanto a usabilidade do sistema, como por exemplo permitir salvar em memória mais de uma medição e permitir navegar entre elas, pois atualmente cada medição é perdida caso não seja exportada. Outra funcionalidade interessante seria realizar os cálculos sobre as diversas medições obtendo assim os valores médios sem precisar processar posteriormente estes dados em outros *softwares*.

Na parte do *hardware* um circuito poderia ser desenvolvido para permitir automatizar a mudança de resistência entre as medições das diferentes etapas. Além disso, mais estudos poderiam ser realizados a fim de investigar e melhorar a questão da imprecisão na medição dos valores de corrente no modo ocioso, analisando por exemplo com mais cuidado a influência do funcionamento do RPi nas medições, mesmo quando o DUT é alimentado por uma fonte externa. Por fim, estudos poderiam ser realizados analisando o funcionamento do protótipo com outros dispositivos nós sensores similares ou que utilizam outros padrões e/ou protocolos.

REFERÊNCIAS

- ADELANTADO, Ferran *et al.* Understanding the Limits of LoRaWAN. **Ieee Communications Magazine**, Barcelona, v. 55, n. 9, p. 30-40, set. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8030482>. Acesso em: 8 jan. 2022.
- ANDERSEN, Jacob; HANSEN, Morten Tranberg. Energy Bucket: A tool for power profiling and debugging of sensor nodes. **Proceedings - 2009 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2009**, [S. l.], p. 132–138, 2009. DOI: 10.1109/SENSORCOMM.2009.29.
- BALBINOT, Alexandre; BRUAMARELLO, Valder João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2010. 398 p.
- BOUGUERA, Taoufik *et al.* Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. **Sensors**, Nantes, v. 18, n. 2014, p. 1-23, jun. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2104>. Acesso em: 19 fev. 2022.
- BOUT the LoRaWAN® Specification. Disponível em: <https://loro-alliance.org/lorawan-for-developers>. Acesso em: 23 fev. 2021.
- DEZFOULI, Behnam; AMIRTHARAJ, Immanuel; LI, Chia Chi (Chelsey). EMPIOT: An energy measurement platform for wireless IoT devices. **Journal of Network and Computer Applications**, [S. l.], v. 121, n. NOVEMBER, p. 135–148, 2018. DOI: 10.1016/j.jnca.2018.07.016.
- DEVICE Current Waveform Analyzers: The CX3300 series of Device Current Waveform Analyzers precisely visualizes low-level current waveforms previously unmeasurable or undetectable.. The CX3300 series of Device Current Waveform Analyzers precisely visualizes low-level current waveforms previously unmeasurable or undetectable.. Disponível em: <https://www.keysight.com/br/pt/product/CX3324A/device-current-waveform-analyzer-1-gsa-s-14-16-bit-4-channel.html>. Acesso em: 02 jun. 2021.
- DESIGN REUSE. **Cycleo unveils its first innovative semiconductor IP bringing unprecedented range to wireless data transmission**. 2009. Disponível em: <https://www.design-reuse.com/news/21552/wireless-semiconductor-ip.html>. Acesso em: 8 jan. 2022.
- FILIFELOP (Florianópolis). **O que é Raspberry Pi?** 2020. Disponível em: <https://www.filifeelop.com/blog/o-que-e-raspberry-pi/>. Acesso em: 2 fev. 2022.
- GUPTA, Sourav. **Current Sensing Techniques using Different Current Sensors**. 2019. Disponível em: <https://circuitdigest.com/article/how-to-measure-current-in-a-circuit-with-different-current-sensing-techniques>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentals of Physics**. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. 1450 p.
- HEALY, Michael; NEWE, Thomas; LEWIS, Elfed. Wireless Sensor Node hardware: A review. *In*: 2008 IEEE SENSORS 2008, **Anais** [...]. : IEEE, 2008. p. 621–624. DOI: 10.1109/ICSENS.2008.4716517. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4716517/>.

HOPERF. **Low Power Long Range Transceiver Module**: model no.: rfm95w/96w/98w. Guangdong: Hoperf, 2019. 123 p. Disponível em: <https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html>. Acesso em: 1 fev. 2022.

KHOMP. **NIT Sensor/Transmissor de temperatura e umidade**. Disponível em: <https://www.khomp.com/iot/pt/produto/endpoint-lora-nit-sensor-ransmissor-iot/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

KIM, Dong-Hoon; LEE, Eun-Kyu; KIM, Jibum. Experiencing LoRa Network Establishment on a Smart Energy Campus Testbed. **Sustainable Communication Networks**. Incheon, p. 1-32. mar. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/1917>. Acesso em: 8 jan. 2022.

KUHLINS, Christian; RATHONYI, Bela; ZAIDI, Ali; HOGAN, Marie. Cellular networks for Massive IoT. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/cellular-networks-for-massive-iot--enabling-low-power-wide-area-applications>. Acesso em: 17 nov. 2020.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN**: what is it?. San Ramon: Lora Alliance, 2015. 20 p. Disponível em: https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/. Acesso em: 9 jan. 2022.

LORA ALLIANCE. **What is LoRaWAN® Specification**. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>. Acesso em: 8 jan. 2022.

LORA CHIRP. Direção de Richard Wenner. [S.l.]: Richard Wenner, 2017. Son., color. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dxYY097QNs0>. Acesso em: 8 jan. 2022.

MAAYAN, Gilad David. The IoT Rundown For 2020: stats, risks, and solutions. Stats, Risks, and Solutions. 2020. Disponível em: <https://securitytoday.com/Articles/2020/01/13/The-IoT-Rundown-for2020.aspx?Page=1#>. Acesso em: 16 fev

MARTINEZ, Borja *et al.* The Power of Models: Modeling Power Consumption for IoT devices. **Ieee Sensors Journal**. Lausanne, p. 1-13. out. 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7122861>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MOUSER. **TBS1062**. Disponível em: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Tektronix/TBS1062?qs=LaANLJhG4Mf2CIb6ihz5QQ%3D%3D>. Acesso em: 2 fev. 2022.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A.. **Electric Circuits**. 10. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2015. 820 p.

ONSEMI. **AND8093/D**: current sensing power mosfets. Aurora: Onsemi, 2017. Disponível em: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND8093-D.PDF>. Acesso em: 18 jan. 2022.

PETRIĆ, Tara; GOESSENS, Mathieu; NUAYMI, Loutfi; TOUTAIN, Laurent; PELOV, Alexander. Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN. **IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC**, [S. l.], p. 1–7, 2016. DOI: 10.1109/PIMRC.2016.7794569.

PIAUINO. **Placa Arm STM32 - STM32F103C8T6**. Disponível em: <https://www.piauino.com.br/pd-7d3482-placa-arm-stm32-stm32f103c8t6.html>. Acesso em: 1 fev. 2022.

QOITECH Otii Arc. Disponível em: <https://core-electronics.com.au/qoitech-otii-arc.html>. Acesso em: 02 jun. 2021.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi 3 Model B**. Cambridge: Raspberry Pi, 2017. 5 p. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>. Acesso em: 2 fev. 2022.

RECICOMP. **Sensor de Corrente DC INA219 I2C**. Disponível em: <https://www.recicomp.com.br/produtos/sensor-de-corrente-dc-ina219-i2c/>. Acesso em: 2 fev. 2022.

REGAN, Tim; MUNSON, Jon; ZIMMER, Greg. **AN-105: current sense circuit collection making sense of current**. Current Sense Circuit Collection Making Sense of Current. Disponível em: <https://www.analog.com/en/app-notes/an-105fa.html>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SALEAE. **How to Measure Current with an Oscilloscope**. Disponível em: <https://articles.saleae.com/oscilloscopes/how-to-measure-current-with-an-oscilloscope>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SANTOS, Raphael Rocha dos; GUIMARÃES, Fernanda Rodrigues; BARBOSA, Raphael Ferreira. **Arquitetura de Nós Sensores**. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/rssf/de_nos_sensores.html. Acesso em: 19 jan. 2022.

SELLER, Olivier Bernard André. **Wireless communication method**. . FR n. US 9647718 B2. Depósito: 4 set. 2014. Concessão: 9 maio 2017. Disponível em: <https://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/neftahtml/PTO/srchnum.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&s1=9647718.PN>. Acesso em 8 jan. 2022.

SEMTECH. **What are LoRa® and LoRaWAN®?** Disponível em: <https://loro-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/loro-and-lorawan/>. Acesso em: 8 jan. 2022.

SHARMA, Sukhwinder; BANSAL, Rakesh Kumar; BANSAL, Savina. Issues and challenges in wireless sensor networks. **Proceedings - 2013 International Conference on Machine Intelligence Research and Advancement, ICMIRA 2013**, [S. l.], p. 58–62, 2014. DOI: 10.1109/ICMIRA.2013.18.

SIOTLAB. **Empiot**. 2019. Disponível em: <https://github.com/SIOTLAB/empiot>. Acesso em: 4 fev. 2022.

SIVARAMAN, X.; FERNANDES, Clinton; CLARK, Narelle; KARLIYCHUK, Tanya. Smart IoT Devices in the Home. **IEEE Technology and society Magazine**, [S. l.], n. June, p. 71–79, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8371556>.

SUDEVALAYAM, Sujesha; KULKARNI, Purushottam. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 443–461, 2011. DOI: 10.1109/SURV.2011.060710.00094.

TEKTRONIX. **Digital Storage Oscilloscopes**: TBS1000 series datasheet. Beaverton: Tektronix, 2012. 11 p. Disponível em: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Tektronix/TBS1062?qs=LaANLJhG4Mf2C1b6ihz5QQ%3D%3D>. Acesso em: 2 fev. 2022.

TEXAS INSTRUMENTS (Texas). **INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current / Power Monitor With I2C Interface**. Dallas: Texas Instruments, 2015. 39 p. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2022.

THOMAS, Michael Onuoha; RAD, Babak Bashari. Reliability Evaluation Metrics for Internet of Things, Car Tracking System: A Review. **International Journal of Information Technology and Computer Science**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 1–10, 2017. DOI: 10.5815/ijitcs.2017.02.01.

THE THINGS NETWORK. **What are LoRa and LoRaWAN?** Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>. Acesso em: 8 jan. 2022.

THE THINGS NETWORK. **Frequency Plans by Country**. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

WHAT is LoRa®? Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. Acesso em: 23 fev. 2021.

YARBOROUGH, Bryan. **Components and Methods for Current Measurement**. Malvern: Vishay, 2015. 7 p. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/30304/currentmeasurement.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2022.

DIGI-KEY. **PAM2306AYPKE**. 2022. Disponível em: <https://www.digikey.com.br/en/products/detail/diodesincorporated/PAM2306AYPKE/5306176>. Acesso em: 11 jul. 2023.

FOUNDATION, Free Software. **LICENÇA PÚBLICA GERAL GNU**. 2007. Free Software Foundation. Disponível em: <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>. Acesso em: 11 jul. 2023.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi OS**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html>. Acesso em: 11 jul. 2023.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi OS**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/software/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

FOUNDATION, Free Software. **GNU Octave**. General Public License. Disponível em: <https://octave.org/about>. Acesso em: 11 jul. 2023.

RASPBERRY PI. **GPIO and the 40-pin Header**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>. Acesso em: 11 jul. 2023.

DEZFOULI, Behnam. **EMPIOT: An energy measurement tool for IoT devices**. 2020. Disponível em: <https://github.com/SIOTLAB/empiot>. Acesso em: 11 jul. 2023.

MDN WEB DOCS. **SPA (Single-page application)**. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/SPA>. Acesso em: 11 jul. 2023.

NODE.JS. **About Node.js**. Disponível em: <https://nodejs.org/en/about>. Acesso em: 11 jul. 2023.

NODE.JS. **Node.js v20.4.0 documentation**. Disponível em: https://nodejs.org/api/child_process.html. Acesso em: 11 jul. 2023.

FETTE, Ian; MELNIKOV, Alexey. **The WebSocket Protocol**. 2011. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6455>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SOCKET.IO. **What Socket.IO is**. 2023. Disponível em: <https://socket.io/docs/v4/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SYSTEMD. **System and Service Manager**. 2022. Disponível em: <https://systemd.io/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SOCKET.IO. **Client API**. 2023. Disponível em: <https://socket.io/docs/v4/client-api/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

CHART.JS. **Simple yet flexible JavaScript charting library for the modern web**. Disponível em: <https://www.chartjs.org/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - UFRN. **Soma de Riemann**. Disponível em: <https://aulainterativa.ect.ufrn.br/riemann/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

WEBPACK. **Webpack**. Disponível em: <https://webpack.js.org/concepts/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

MARPLES, Roy. **Dhcpd**. Disponível em: <https://roy.marples.name/projects/dhcpd>. Acesso em: 11 jul. 2023.

MCCAULEY, Mike. C library for Broadcom BCM 2835 as used in Raspberry Pi. Disponível em: <https://airspayce.com/mikem/bcm2835/>. Acesso em: 23 ago. 2023.

KELLEY, Simon. **Dnsmasq**. Disponível em: <https://thekelleys.org.uk/dnsmasq/doc.html>. Acesso em: 11 jul. 2023.

MALINEN, Jouni. **IEEE 802.11 AP, IEEE 802.1X/WPA/WPA2/EAP/RADIUS Authenticator**. 2019. Disponível em: <https://w1.fi/hostapd/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

KEYSIGHT. **CX3324A Device Current Waveform Analyzer, 1 GSa/s, 14/16-bit, 4 Channel**. Disponível em: <https://www.keysight.com/br/pt/product/CX3324A/device-current-waveform-analyzer-1-gsa-s-14-16-bit-4-channel.html>. Acesso em: 13 jul. 2021.

QOITECH. **Otii Arc Pro**. Disponível em: <https://www.qoitech.com/otii-arc-pro/>. Acesso em: 13 jul. 2023.

KHOMP. **LoRa Endpoint**. Disponível em: <https://www.khomp.com/en/produto/lora-endpoint/>. Acesso em: 13 jul. 2023.

PINI, Arthur. **Understanding, Selecting, and Effectively Using Current Probes**. 2021. Disponível em:

<https://www.digikey.com.br/pt/articles/understanding-selecting-effectively-using-current-probes>. Acesso em: 09 ago. 2023.

MONTAGNY, Sylvain. **LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners: a low power, long range, wireless technology**. Chambéry: Université Savoie Mont Blanc, 2022. 132 p. Disponível em: <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2023.