



**FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA**

**SMART GRID: AUTOMAÇÃO DE MEDIÇÃO DE ENERGIA**

**SMART GRID: ENERGY METERING AUTOMATION**

**Lucas Nicolau Aperguis<sup>1</sup>**

**Hermon Leal Moreira<sup>2</sup>**

## **RESUMO**

As redes elétricas ao redor do planeta estão entrando em uma nova etapa, a era digital, a qual traz conceitos de redes inteligentes que serão capazes analisar e tomar decisões por conta própria trazendo uma rede mais eficiente, conectada e facilmente mais operada pelas concessionárias. Este artigo se propõe a navegar pelos conceitos de *Smart Grid* e medição inteligente, trazendo visões sobre diferentes tecnologias utilizadas para estabelecer uma rede elétrica 4.0 com automação. Ademais, foi desenvolvido um protótipo que visa aplicar algumas dessas tecnologias emergentes que podem ser utilizadas para a automação de energia, sendo elas o microcontrolador ESP32 e o protocolo de comunicação MQTT, o qual foi o responsável por fazer a ligação entre o sistema embarcado, que coleta informações via sensores, e a *web*, e por conseguinte, a nuvem. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo possível obter medições muito próximas aos valores aferidos pelo amperímetro e a conectividade com a *web* foi estabelecida com sucesso.

**Palavras-chave:** Automação, Energia, Redes Inteligentes, IoT.

## **ABSTRACT**

Electrical grids around the planet are entering a new stage, the digital age, which brings smart grid concepts that will be able to analyze and make decisions on their own, leading to a more efficient grid, connected, and easily operated by power distribution companies. This article proposes to navigate through the concepts of Smart Grid and smart metering, bringing views on different technologies used to establish a 4.0 electrical grid with automation. Additionally, a prototype was developed that aims to apply some of these emerging technologies that can be used for energy automation, being chosen the ESP32 microcontroller and the MQTT communication protocol, that was responsible for making the connection between the embedded system, which collects information via sensors, and the *web*, and therefore the cloud.

---

<sup>1</sup>Pós-Graduado em Automação e Controle na Faculdade SENAI. E-mail: lucasaperguis@hotmail.com

<sup>2</sup>Professor na Faculdade SENAI São Paulo - Campus "Mariano Ferraz". E-mail: hermom.moreira@sp.senai.br

The results obtained were satisfactory, making it possible to obtain measurements very close to the values measured by the ammeter and the connectivity to the successfully established.

**Keywords:** Automation, Energy, Smart Grid, IoT.

## 1. INTRODUÇÃO

Seja na indústria ou numa infraestrutura, a rede elétrica requer segurança e eficiência para suprir a demanda energética. Esses requisitos vêm tornando-se cada vez mais fortes e estão presentes nos grandes e pequenos empreendimentos. Há um sólido conceito baseado em diminuir o consumo de energia elétrica, e, realizar o consumo inteligente. Para isso, o advento de tecnologias tais como *Edge Computing*, *Big Data*, *Internet of Things* (IoT), vêm possibilitando um controle e uso mais gerenciável da energia elétrica. A união dos sistemas elétricos com tecnologias de computação e redes de comunicação caracterizam o que hoje está sendo chamado de Redes Elétricas Inteligentes (REIs), ou *Smart Grid* (Berger e Iniewski, 2015).

As REIs abarcam toda a cadeia da energia elétrica, partindo da geração, passando pela transmissão e distribuição, até ao final da cadeia de utilização, considerando já as redes internas de cada consumidor. Entretanto, há um enorme desafio no que tange a aplicabilidade da *Smart Grid* dado que o parque de geração instalado atualmente no Brasil é de 180.348 MW (ONS, 2022) e a maior parte dessa malha elétrica foi construída numa época em que não existia o conceito de *Smart Grid*. Logo, fazer a integração de um sistema antigo com um novo que já possua as características de REI não é uma tarefa fácil e tão pouco rápida de ser aplicada.

Exemplos dessa diversidade de tecnologias em todo o sistema é de que em muitas casas ainda é possível encontrar medidores de luz analógicos e tomando um exemplo de aplicação mais robusta, algumas subestações que alimentam a região metropolitana de São Paulo ainda possuem sistema de proteção com relés eletromecânicos, os quais, hoje já são substituídos pelos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) em novas subestações.

Essa mobilização para tornar as redes elétricas mais inteligentes, abrirá portas para um sistema elétrico mais ágil, conectado, eficiente, seguro, gerenciável e passível de reconfigurar e contornar eventuais falhas. Para consumidores menores, como residências, prédios, infraestruturas, o usuário poderá ter uma visão clara da sua demanda de energia, bem como ter uma rede preparada para integrar diversos equipamentos do cotidiano, como eletrodomésticos, à Internet.

Nesse contexto, há a tarifação dinâmica (TD) na qual o preço e o tempo de aplicação variam mais frequentemente do que as tarifas tradicionais, o que permite às concessionárias fornecerem serviços mais personalizados de acordo com cada cliente e estipular padrões para consumidores sem medição inteligente. Devido a modelagem horária diária da tarifa dinâmica e curvas de carga, a rede elétrica pode ser mais precisamente analisada e controlada pela operação da rede da concessionária (Moreira, *et al.*, 2019).

O desafio que se enfrenta hoje e o problema que se quer abordar nesse trabalho é encontrar meios para adaptar o que existe, e é claro, encontrar novas formas que sejam mais fáceis de serem implementadas em novas infraestruturas e que possam proporcionar uma medição inteligente de circuitos elétricos, trazendo os dados em tempo real até um dispositivo do usuário de forma prática e ser um caminho para que concessionárias possam atuar remotamente nesses sistemas para realizar as intervenções necessárias, ou seja, um sistema de automação tanto para o operador quanto para o consumidor.

Para isso, tecnologias novas devem ser exploradas e consideradas para o trabalho, tais como, comunicação sem fio, novos protocolos de comunicação, novas ferramentas de aquisição de dados em *hardwares* e *softwares*.

Dado que o tema de *Smart Grids* é bem amplo e envolve inúmeras vertentes, tecnologias e aplicações, objetiva-se com esse trabalho, apresentar um estudo focado em sistemas de medição inteligentes focados para infraestruturas. De forma geral, discutir-se-á as principais formas de se estabelecer uma medição inteligente, quais tecnologias e formas de comunicação, além de ser explorado o cenário mundial e nacional da medição inteligente. Pretende-se elaborar uma simulação com protótipo de medição e focar em testes de conectividade.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. *Smart Grid*

Em plena expansão do setor elétrico, nota-se que a sociedade está cada vez mais dependente da energia elétrica. Pessoas dependem da energia para processos básicos do dia a dia, indústrias precisam dela para que seus processos de fabricação sejam realizados, sistemas de comunicação que conectam diversas partes do mundo, só permitem isso, porque existe uma fonte energética para garantir seu funcionamento. Em suma, a energia elétrica, não é somente um bem básico, mas também garante o desenvolvimento socioeconômico de uma região ou país. E para garantir tal desenvolvimento, um sistema elétrico de potência mais robusto, de alta disponibilidade e digitalizado está sendo requerido.

O *Smart Grid* ou REI abrange as redes elétricas desde a geração de energia elétrica numa usina até o consumidor final nas residências e infraestruturas. O termo “inteligente” se deve a utilização de alguns itens tecnológicos, tais como: (Berger e Iniewski, 2015).

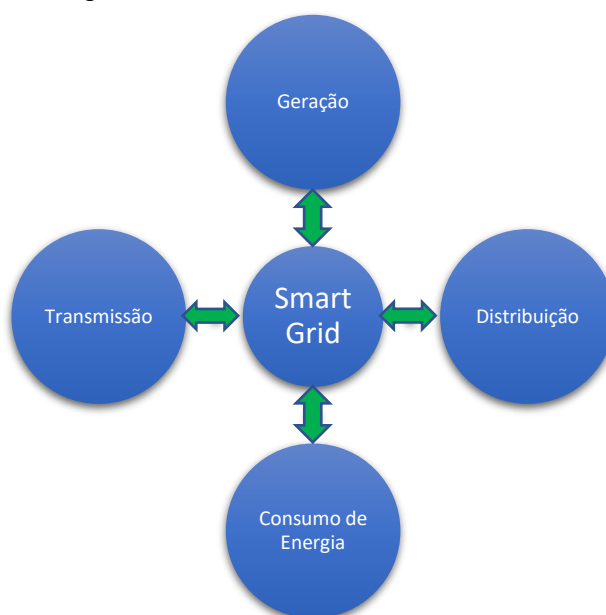
- Atuadores: geradores, capacitores, reatores, armazenamento de energia;
- Sensores: tensão, corrente, potência, pressão, temperatura, entre outros;
- Controladores: Sistemas microprocessados, microcontroladores, controladores lógicos programáveis (CLPs), entre outros;
- Sistemas de comunicação: redes de comunicação a cabo ou sem fio;
- Aplicações: lógicas para tomada de decisão.

Tais tecnologias podem ser aplicadas em todos os âmbitos das REIs o que pode proporcionar maiores e melhores empreendimentos, facilidade em processos de manutenção, maior possibilidade de mitigar riscos e contorná-los com maior facilidade. Além

disso, está em linha com pautas socioambientais com redução de gastos e emissão de gases poluentes, possibilidade de armazenamento de energia, inserção de geração distribuída e maior confiabilidade (Moreira, 2021). Nas REIs, o fluxo de potência bidirecional possibilita a combinação de informação com comunicação. Todos os equipamentos aplicados nessa rede podem ser conectados, comunicam-se entre si e são acessíveis e controláveis. A

Figura 1 retrata a bidirecionalidade da *Smart Grid* tanto no ponto de vista de potência elétrica como de comunicação em todas as áreas do sistema integrado de energia, geração, transmissão, distribuição e o consumidor final.

Figura 1 - Estrutura Básica de um Sistema *Smart Grid*.



Fonte: Adaptado de Colak, Bayindir e Sagioglu, 2020.

A divisão denominada por consumo de energia representa os tipos de cargas que vão consumir a energia oriunda das usinas, sendo elas: fábricas, casas, iluminação pública, carros elétricos, transportes públicos e pequenos e grandes centros comerciais. A possibilidade desses consumidores produzirem energia através de alguma fonte renovável como a energia solar e vender essa energia para a concessionária, deve ser viabilizada pela aplicação de medidores inteligentes para medir o fluxo bidirecional da energia (Colak, Bayindir e Sagioglu, 2020).

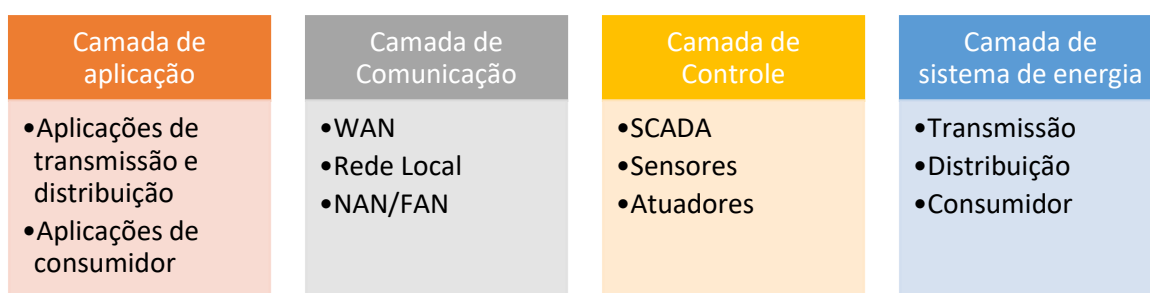
Os sistemas de energia possuem duas infraestruturas básicas que trabalham em conjunto. A primeira é elétrica, responsável por levar a energia até a carga. A segunda é de informação, responsável por trafegar os dados de grandezas e comandos entre os instrumentos e o sistema de controle. Tratando-se de dados, essa rede de informação requer a segurança necessária para garantir a confiabilidade das operações e do armazenamento dos dados contra possíveis ataques cibernéticos, advindo daí os conceitos de segurança cibernética (Berger e Iniewski, 2015).

Alguns desafios encontrados nesses sistemas são: flutuações das fontes de energia, picos de demanda, realimentação de curto intervalo dos usuários em seu consumo de energia,

necessidade de integrar carregadores para veículos elétricos, o que torna uma demanda muito dinâmica. Esses desafios trazem novos serviços como tarifação dinâmica, tarifação por tempo de uso, venda de energia local e a medição inteligente (Berger e Iniewski, 2015). Tais serviços são itens integrantes do que pode ser chamado de Residência Inteligentes, as quais poderão fornecer ao morador uma clareza maior do uso de energia, demonstrando o consumo de energia para cada carga da residência.

Analisando o sistema de REIs com uma visão macro, é possível estabelecer a arquitetura de rede conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Arquitetura do sistema para as REIs.



Fonte: Adaptado de Berger e Iniewski, 2015.

A primeira camada, de aplicação, compreende os serviços que podem ser utilizados por cada divisão mostrada na Figura 2. A segunda camada, de comunicação, é a interface mencionada anteriormente, podendo ser de várias formas como a WAN (*Wide Area Network*), uma rede local doméstica ou uma rede utilizada numa fábrica como a FAN (*Field Area Network*). A camada de controle contempla os dispositivos responsáveis por captar os dados necessários e o sistema de supervisão. E a última camada é o nicho envolvido propriamente dito.

## 2.2. Internet of Things (IoT)

A primeira vez que o termo foi utilizado foi em 1999 pelo pesquisador britânico Kevin Ashton, o qual descreveu um sistema no qual objetos poderiam se conectar à Internet por meio de sensores (Kramp, Van Kranenburg e Lange, 2016). O termo veio para ilustrar etiquetas de identificação que funcionavam por radiofrequência (RFID) que eram aplicadas em redes de suprimento que auxiliariam no rastreo das mercadorias sem a necessidade da intervenção humana (The Internet Society, 2015). O conceito hoje se expande para uma enorme gama de soluções que envolvem diversas redes de comunicação tais como TCP/IP, MQTT, Wi-Fi, Zigbee, RFID, redes móveis (3G, 4G e 5G) (Moreira e Kagan, 2020). Essa emergente tecnologia proporciona justamente o que o *Smart Grid* traz de conceito, ou seja, obter informações com maior facilidade e enviá-las para a *web* por diferentes aplicações, o que permite o usuário visualizar as informações e os status desses dispositivos. Isso permite um maior controle dos dispositivos e, portanto, um uso eficiente deles (Pradyumna, *et al.*, 2022).

Sistemas embarcados tem sido uma ferramenta amplamente utilizada para realizar protótipos e testes que envolvam o tema. Pode-se citar os microcontroladores Arduino, ESP32 e o Raspberry PI que por meio de linguagem de programação como C e C++ podem ser programados para esse tipo de aplicação como por exemplo projeto de medição de força por IoT para análise de elementos finitos com apresentação de dados em tempo real (Miguel, *et al.*, 2022) e controle de umidade para plantas de pequeno porte (Fernandes, *et al.*, 2013).

### 2.3. Comunicação nas Redes Elétricas Inteligentes

Uma REI depende de uma rede de comunicação que permite com que os equipamentos sejam acessados. No começo da automação, os primeiros indícios de comunicação ainda eram feitos por meio sensoreamento e pneumática. No entanto, atualmente, protocolos modernos baseados em *Ethernet* podem ser utilizados com ou sem fio. A comunicação estabelecida pode ser caracterizada de três maneiras. A primeira delas é a *unicast* em que um dito parceiro da comunicação está conectado diretamente a um outro. O segundo modo, *multicast*, envolve o padrão de assinatura, em que um editor envia informações a todos assinantes dessas informações. Por último, o *broadcast*, no qual o provedor envia informações a todos que estão conectados na rede. A rede pode assumir uma dessas características de acordo com o protocolo utilizado (Berger e Iniewski, 2015).

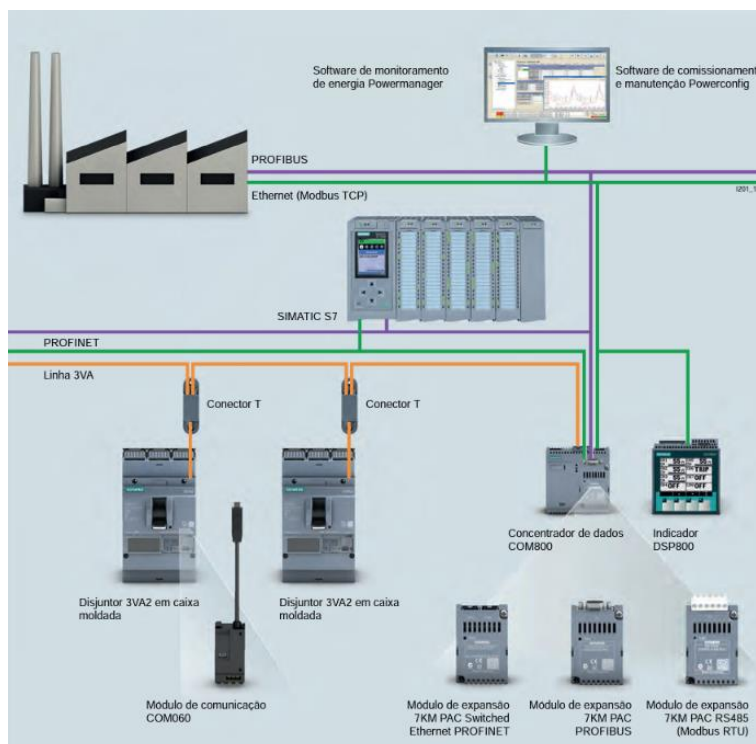
Focado em REIs, alguns protocolos foram destacados pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos EUA como relevantes para tal aplicação. Tomando por exemplo uma estrutura macro, numa usina pode-se utilizar um sistema de controle distribuído com CLPs, que por sua vez, acessa os sensores e atuadores por meio do protocolo OPC UA. A subestação pode ser acessada pelo Centro de Operação via Unidades Terminais Remotas (UTRs) as quais aquiram dados via protocolo DNP3. Já a automação e controle dos dispositivos de proteção podem se comunicar via IEC 61850 (Berger e Iniewski, 2015). Esta norma estabelece um padrão aberto e foi um modo que permitiu uma operação eficaz do sistema, mesmo envolvendo equipamentos de fabricantes diferentes (Ribeiro, 2010).

Existem então alguns protocolos que seguem a norma IEC 61850, como por exemplo o *Manufacturing Message Specification* (MMS), do tipo *unicast*, que envia mensagens para um endereço que pode ser um supervisor mostrando sinais analógicos ou digitais. Há também o protocolo GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), do tipo *multicast* que carregam informações entre os IEDs, ou seja, é um tipo de comunicação horizontal. O protocolo SV (*Sampled Variables*) é utilizado para o tráfego de variáveis analógicas em uma subestação, como no caso de sinais de corrente e tensão oriundos de transformadores de corrente e de potencial enviados para IEDs (Souza, 2012). E através do IEC 61850, está sendo possível também trazer dados digitalizados diretamente dos equipamentos de pátio de uma subestação que possuem seus dados convertidos para sinais de luz em fibra óptica por meio do equipamento *Merging Unit*.

É possível também que os próprios dispositivos como disjuntores sejam inseridos na rede de comunicação e sejam operados remotamente via CLP. A

Figura 3 mostra exatamente essa integração entre disjuntores, que por meio de um módulo de comunicação interno (COM060), se ligam numa rede própria a um concentrador (COM800) responsável por estabelecer a comunicação com controladores através de diversos protocolos tais como o Profinet, Profibus e Modbus RTU. Desse modo é possível realizar parametrizações, acionamentos remotos, obter diagnósticos, que podem contribuir para redução de custos e melhorar a produtividade em plantas industriais, edifícios e infraestruturas.

Figura 3 - Arquitetura de comunicação.



Fonte: Siemens, 2022.

Em contrapartida, já no consumidor final, em uma residência por exemplo, pode ser utilizado o protocolo *Zigbee* e entre consumidor e concessionária há o OpenADR fornecendo sinais de resposta à demanda. Outros protocolos podem ser mencionados como o IEC 61698 para as áreas de transmissão e distribuição e o BACnet para automações prediais (Berger e Iniewski, 2015).

## 2.4. Comunicação sem fio nas redes elétricas inteligentes

Em determinados casos, há certas dificuldades para tornar o acesso físico mais frequente, como um terreno de difícil acesso ou que esteja muito longe. Para isso, realizar uma comunicação sem fio torna muito mais viável de levar até esses lugares as aplicações de rede *smart*. Esse tipo de comunicação também pode ser uma alternativa para diminuir o número de cabos utilizados. A comunicação sem fio emprega radiofrequência como meio de ligação entre dois nós. O espectro de frequência é extremamente grande, entretanto, deve ser regulamentado seu uso e as diferentes frequências trazem propriedades que se adequam melhor a diferentes aplicações (Berger e Iniewski, 2015).

Existem várias tecnologias que podem ser aplicadas dentro de uma REI. As redes sem fio pessoais, ou WPANs englobam a comunicação de dispositivos portáteis tais como: computadores, celulares, sensores etc. Um dos protocolos desse nicho é o *ZigBee*, construído em cima do IEEE 802.15.4, destinado a rede de sensores de baixo consumo de energia e baixo custo para automação residencial. Pode ser utilizado em áreas de automação residencial, cuidados com a saúde, telecomunicações e para o *smart metering* com a medição avançada, perfis de carga, consumo em tempo real, controle de carga e mensagens de texto. O *ZigBee* manipula os dados de forma que eles são reduzidos e colocados em máscaras de bits. O protocolo suporta os modelos de comunicação *unicast*, *multicast* e *broadcast*, mas cada uma delas é indicada para alguma tarefa. Por exemplo, o broadcast só deve ser utilizado para informação de tarifação (Berger e Iniewski, 2015).

Uma rede local, ou LAN, é destinada a conectar vários dispositivos dentro de uma área geográfica, seja uma casa, escritório ou prédio. A principal forma de comunicação sem fio numa LAN é o padrão IEEE 802.11, conhecido como Wi-Fi, elaborado pela Aliança Wi-Fi. O Wi-Fi tem uma velocidade mais rápida, maior alcance e segurança comparado a outros meios de comunicação sem fio. Esse padrão utiliza as frequências de 5GHz e 2,4GHz e a maioria dos dispositivos eletrônicos como celulares, televisões e carros já vem com a possibilidade de estabelecer essa comunicação. Todas as redes Wi-Fi são sistemas TDD centrados em contenção, em que estações móveis e pontos de acesso competem para usar o mesmo canal (Embarcados, 2021).

O *Bluetooth* também é uma forma de comunicação sem fio, estabelecido pela norma IEEE 802.15.1, sendo um meio de baixo custo para as aplicações e possui a vantagem de ter baixo consumo de energia. Entretanto, tem uma taxa de transmissão baixa de kbit/s até alguns Mbits/s (De Menezes, 2020).

As redes celulares podem ser aplicadas também em projetos de *Smart Grid*. Dentro de uma cidade inteligente, uma forma de haver conexão entre vários concentradores espalhados numa grande área urbana, é uma rede celular. A rede celular é composta por clusters, sendo eles compostos por um conjunto de células, as quais possuem grupos diferentes de frequências. Esses grupos apenas se repetirão em clusters diferentes. As células com mesmo grupo de frequência são chamadas de células cocanais e são separadas suficientemente para que não haja interferência. As tecnologias conhecidas por 2G, 3G, 4G e 5G, trabalham em faixas de frequência diferentes e diferentes métodos de acesso aos canais de comunicação tais como CDMA (*Code Division Multiple Access*) e o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) (Rappaport, 2009).

## 2.5. Medidor Inteligente (MI)

Associado ao advento das REIs, o conceito de *Smart Metering* e os MIs que assim são chamados, pois além de realizarem as medições de tensão, corrente e potência elétrica de uma rede local, coletam informações sobre consumos de equipamentos, horários com maiores demandas e permite realizar cortes e religamentos de energia de forma remota, ou seja, uma forma mais eficiente de se medir energia elétrica acompanhando tecnologias de



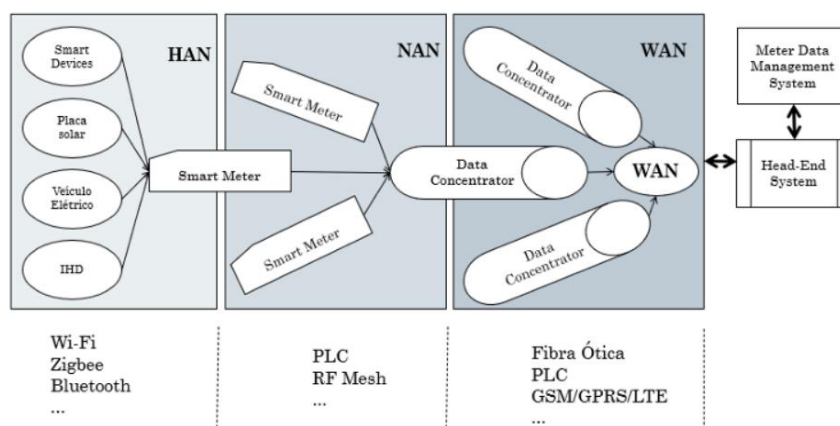
informação aplicadas ao usuário final e concessionária, que terão acesso às informações de consumo de forma detalhada. Basicamente essa inclusão de medidores inteligentes traz consigo uma resposta à demanda, que por consequência traz redução da operação e custos de manutenção das redes de alta, média e baixa tensão, além de melhores níveis de qualidade e confiabilidade do sistema, maior satisfação do cliente e maior inserção de mini e microgerações no sistema (Moreira e Kagan, 2020).

Com esses dispositivos, é possível aplicar a tarifação dinâmica (TD), a qual possui algumas vertentes, tais como: *Critical Peak Pricing* (CPP), *Peak Time Rebate* (PTR), *Real Time Pricing* (RTP) e *Time of Use* (TOU). Considerando uma REI, pode-se haver por exemplo o caso de uma rede em que tenha uma maior ocorrência de desligamentos por sobrecarga, nessa situação o valor da tarifa será maior comparado a de uma rede com menor incidência de desligamento. Quanto mais consumidores tiverem os MIs, mais curvas de cargas a concessionária poderá obter e desenvolver tarifas especiais para cada tipo de consumidor, o que trará o *Advanced Meter Management* (AMM), o qual por meio da bidirecionalidade do medidor, fornecerá dados em tempo real de consumo, preço, tarifa, além de atuação direta em aparelhos elétricos (Moreira, 2021).

O medidor inteligente acaba sendo o meio pelo qual a concessionária estabelece a comunicação com o usuário final, possibilitando o gerenciamento de energia baseado em estratégias de controle em tempo real de dispositivos inteligentes, a partir de diagnósticos, alarmes de acordo com a programação de consumo ou geração, sendo estabelecidos pelo agente ou usuário, o que implica em uma grande gama de cenários de resposta em demanda (Moreira, 2021).

Os MIs podem utilizar diversos tipos de tecnologia para comunicação, como por exemplo: *Power Line Carrier* (PLC), *Zigbee*, *RF Mesh*, redes móveis; que servirão como o meio para se conectar a algum concentrador ou a própria distribuidora. Por exemplo, a Figura 4 traz uma arquitetura de um sistema inteligente de medição, trazendo os conceitos abordados nas seções anteriores. É mostrado que no nível de consumidor há uma rede doméstica que conecta dispositivos inteligentes, sistemas de energia renovável, mobilidade elétrica a um MI, através de uma comunicação via Wi-Fi, *Zigbee* ou *Bluetooth*.

Figura 4 - Arquitetura para uma rede de Advanced Metering.



O MI se conecta a um concentrador por meio de uma rede de campo, que conecta vários MIs por meio de *PLC* ou *RF Mesh*. Esse concentrador, por sua vez, faz a ponte com um *Meter Data Management System*, por meio de uma WAN, para gerenciar, armazenar e analisar os dados recebidos. Essa conexão final pode ser feita mais uma vez por PLC ou também por fibra óptica e redes móveis (Da Silva, 2021).

Um exemplo prático é o do município Bento Gonçalves no Rio Grande do Sul, o qual utilizou um sistema de Rádio Frequência (RF Mesh) para seu sistema de medição inteligente. A sua rede possui os concentradores de dados, repetidores de RF e cartões de interface de rede (*Network Interface Card – NIC*) nos medidores. Na *RF Mesh*, os dispositivos atuam como roteadores e encaminham as mensagens de outros dispositivos até um *Access Point* (AC), o concentrador, o qual se comunica com os MI por meio de radiofrequência com os cartões de interface de rede que estão nos medidores. O concentrador também possui uma rede *Ethernet* para se conectar à rede de dados da distribuidora RGE pertencente à CPFL Energia. Os repetidores de sinal auxiliam no alcance do sinal de RF entre os concentradores e o MI. Para alguns casos mais complexos, questões de relevo, cerca de 15%, optou-se por utilizar rede móvel GPRS (De Menezes, 2020).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tema de *Smart Metering* vem sendo constantemente abordado nas pesquisas científicas. Seu advento já vem englobado, na maioria das vezes, no tema de *Internet of Things* e traz diferentes tipos de aplicação, diferentes métodos de aquisição de dados, tratamento e envio desses a um servidor, além de diversos tipos de interface para expor o que foi coletado.

O estudo tratado por Martins e Pelegrini (2020) demonstra que com um simples sensor de corrente e um microcontrolador, já é possível monitorar o consumo de energia de algum aparelho via *browser*.

O Sistema de Informação Integrado a *Smart Meter* Construído com Arduíno não somente realiza a medição via sensores e os processa com o Arduíno, mas também envia os dados para a *web*, armazenando-os em um banco de dados, sendo o MySQL o escolhido para tal tarefa. O autor propôs em sua aplicação *web*, uma interface denominada SISM (Sistema Integrado a *Smart Meter*) e o usuário realiza seu login com nome e senha, onde pode cadastrar separadamente cada equipamento e monitorá-los de forma independente, gerando gráficos de consumo.

Similar ao caso anterior, Romancini (2020) propõe uma aplicação *web* desenvolvida em HTML e *JavaScript*, no qual é mostrado um *dashboard* com informações sobre tensão, corrente, potências, fator de potência e os custos gerados pelo consumo da energia. Para essa aplicação foi utilizado o ESP32-WROOM-32 com Wi-Fi e *Bluetooth* integrado, o que permitiu a aplicação de comunicação sem fio para a *web*. Os dados foram coletados realizando testes em alguns eletrodomésticos, como uma televisão e um ferro de passar roupas.

Leonhardt (2021) por sua vez, desenvolveu um medidor de consumo de energia elétrica que possui uma plataforma de monitoramento por parte do consumidor e do fornecedor. Optou-se por utilizar o microcontrolador ATmega328P com transmissão de dados

via protocolo de comunicação LoRa e um *gateway* para recebimento dos dados e envio ao servidor. Seus testes foram feitos direto no disjuntor geral de uma residência, por meio de 3 fases de testes diferenciadas pela quantidade de horas de aquisição de dados. Outro ponto testado foi a distância máxima alcançada pela comunicação sem fio LoRa, tendo como resultado a distância de 120m.

Carratù, *et al.*, (2018) traz uma solução que engloba a medição de energia elétrica, gás e água de uma mesma infraestrutura. Traz o wM-Bus como canal de rádio de curto alcance para estabelecer a comunicação entre medidores e o uso de concentradores espalhados por uma área urbana para transmitir os dados recebidos até uma unidade central utilizando o protocolo CAN-BUS.

### 3.1. Cenário mundial

Não somente países ditos desenvolvidos estão na empreitada em busca de estruturar uma *Smart Grid*, mas países emergentes também estão caminhando para tal no seu próprio ritmo. A Índia, integrante do importante grupo emergente dos BRICS, formalizou um fórum denominado *India Smart Grid Forum* (ISGF) e o *India Smart Grid Task Force* (ISGTF) para trazer ações em busca da implementação do *Smart Grid*. Tal fórum elencou vários objetivos a serem alcançados dentro dos setores da distribuição, transmissão e área regulamentadora de energia (Ministry Of Power, Government Of India, 2013).

Também pela região asiática, a China mergulhou em um projeto de 10 anos para construir uma REI, que iria elevar a rede de transmissão para uma era digital através de fornecimento seguro de energia e aumento da conservação de energia. É esperado um investimento de CNY 500 bilhões a partir de 2022, concentrando-se em projetos de ultra alta tensão, na atualização da rede de distribuição e na digitalização das redes. O Japão, por sua vez, estimou que as implementações de energia renovável irão consumir cerca de US\$51 a US\$74 bilhões até 2030. A Coreia do Sul pretende investir US\$ 60 bilhões para criar sua *Smart Grid* (Lamba, 2011).

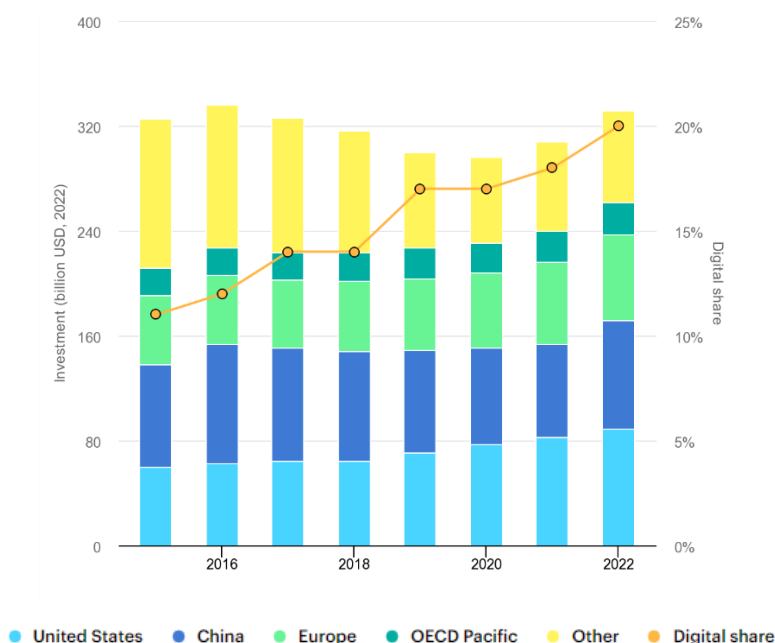
Na Europa, a maior parte dos investimentos vem por parte dos países do EU15, tais como Reino Unido, Alemanha e França, totalizando €56 bilhões na União Europeia. A Itália por exemplo, iniciou em 2006 o projeto denominado *Telegestore*, o qual objetivava a implementação de mais de 30 milhões de medidores inteligentes. A Suécia, já em 2003 determinou que toda medição de energia elétrica deveria ser feita de forma automática em nível nacional. A França trouxe o projeto *Pilot Linky*, iniciado em 2007, focando na instalação de 35 milhões de medidores tendo até 2016, 95% de cobertura nacional. Finlândia trouxe um novo marco para a eletricidade nacional tornando obrigatório os pontos de entrada acima de 63 Amperes com acesso remoto. Malta também se mobilizou para realizar a troca dos medidores e em 2008 iniciou um teste piloto com a troca de 250.000 medidores com tecnologia que detecta possíveis problemas antes da troca prevista do medidor (Giordano, *et al.*, 2011).

No continente americano, o Canadá iniciou um projeto piloto que englobou várias áreas do *Smart Grid*, tais como: *Advanced Metering Infrastructure*, Resposta de Demanda,

Armazenamento de Energia para *peak shaving*, redes *self-healing* (detecção de faltas, isolamento e restauração), micro redes inteligentes e controle reativo de tensão com investimento aproximado de \$350 bilhões no setor elétrico. A área de armazenamento de energia é a que mais vem recebendo recursos do governo, com grande investimento em 2010, cerca de \$45 milhões. As reservas energéticas do Canadá oferecem a capacidade de armazenar energia e que podem ser acionadas para responder a mudanças previstas na demanda de cada estação (Hiscock, 2015). Outras ações também foram feitas como no estado de Ontario, onde a instalação de *smart meters* tornou-se obrigatório. Uma associação denominada *Smart Grid* Canadá também foi formada para incentivar a tecnologia no país (Butt, Butt e Zulqarnain, 2021).

Os Estados Unidos, que possui uma matriz energética em maior parte baseada em combustíveis fósseis, tenta ser uma economia *low-carbon*. Um caminho para isso seria a aplicação do *Smart Grid*. Alguns esforços foram realizados por parte do governo, como A Lei Americana de Recuperação e Reinvestimento de 2009, a qual propõe acelerar o desenvolvimento da tecnologia das REIs, direcionando cerca de \$4,5 bilhões no setor de eletricidade e energia para ações de modernização. Alguns estados americanos colocaram metas de instalação de MIs. Até 2013, no Texas deveriam ser instalados 6,6 milhões de medidores e na Califórnia 11,8 milhões (Brown e Zhou, 2012). Em 2021, os EUA já apresentaram o maior investimento comparado a China e Europa, com valor de \$84 milhões. Na Figura 5, os investimentos são mostrados por país e há também o percentual *Digital Share* do investimento que foi direcionado a automação da transmissão e distribuição, redes de comunicação, medidores inteligentes, sistemas avançados de gestão, sensores de linhas de transmissão, gestão da vegetação em torno de linhas e digitalização de transformadores de potência e subestações.

Figura 5 - Valores investidos em redes elétricas no período de 2015 a 2021.



Fonte: IEA analysis with calculations from Guidehouse 2022.

### 3.2. Cenário Brasileiro

O Brasil, quinto maior país do mundo e um dos mais importantes países emergentes, também tem feito ações para implementar REIs. Em 2012, a ANEEL aprovou o regulamento dos medidores inteligentes, sendo o passo inicial para tal revolução, já que ainda não há no país uma *Smart Grid* consolidada. Alguns projetos pilotos foram desenvolvidos anos atrás como por exemplo o Cidades do Futuro de 2011, feito pela CEMIG em Sete Lagoas, em Minas Gerais com instalação de 3,8 mil medidores inteligentes. E continuando a modernização, a CEMIG projeta ativar 250 mil dispositivos por ano em sua rede de baixa tensão entre 2023 e 2027 com investimento de R\$ 1,3 bilhão (Diário Oficial de Minas Gerais, 2012).

Em São Paulo a empresa Eletropaulo se comprometeu a instalar 60 mil medidores até 2015. Mais recente, o projeto Energia do Futuro, concluído pela Neoenergia na região de Atibaia, em São Paulo, é um exemplo de novo modelo de distribuição, cujo sistema permite ações mais rápidas em casos de interrupção no fornecimento. Ademais, foram instalados 75 mil medidores que permitem leitura remota do consumo e acompanhamento diário feito pelo cliente no site da empresa. Tal projeto foi o primeiro no país que utilizou rede de telecomunicação 4G LTE para conectar os equipamentos de automação e os medidores (Neoenergia, 2019).

Outro projeto piloto envolve uma cidade inteligente no estado da Bahia. Aguaduna é um complexo habitacional que vem sendo construído e contará com várias iniciativas para reportar falhas em equipamentos públicos (semáforos, iluminação, etc), obter informações de serviços e atividades da cidade, reservar posto de carregamento de veículo elétrico, notificar gestores sobre a qualidade de espaços públicos e tudo à base de energia renovável de matriz solar, eólica e biomassa (Siemens, 2021).

O ano de 2022 também contou com grandes marcos na transmissão de energia elétrica no Brasil, visto que foi inaugurada a primeira subestação digital do SIN (Sistema Interligado Nacional). A Subestação Lorena da ISA CTEEP conta com dados já digitalizados oriundos do próprio equipamento de pátio, transferido por meio de fibra ótica até a sala de comando (ISA CTEEP, 2022). Outro avanço para o sistema de energia do Brasil foi mais um empreendimento da ISA CTEEP, porém no ramo de armazenamento de energia. A empresa criou o primeiro banco de baterias do sistema de transmissão brasileiro na Subestação Registro, litoral sul de São Paulo, com baterias de 60 MWh, que permitirá um maior suporte ao incremento pontual da demanda de energia no litoral nas altas temporadas (ISA CTEEP, 2021). No último dia de 2022 foi realizado o primeiro *peak-shaving* do sistema brasileiro mostrando que o projeto foi de fato um sucesso (Eletricidade Moderna, 2023).

Apesar desses projetos citados, o Brasil ainda não possui um desempenho equiparável ao dos países citados na seção 3.1. Um estudo elaborado pelo *American Council of Energy-Efficient Economy* colocou o Brasil entre os cinco últimos numa lista de 25 países no que se refere as políticas públicas e práticas para gestão eficiente de energia (V2, 2022).

## 4. METODOLOGIA

A fim de estabelecer uma simulação que represente a integração de dados físicos com sistemas de visualização de dados, foi desenvolvido por meio da IDE do Arduino, um código

que permitisse realizar a leitura de dois sensores, um de corrente e um de temperatura e umidade, e tais leituras fossem passadas para um ambiente em que o usuário pudesse monitorar tais variáveis.

O sensor de corrente escolhido para os experimentos foi o SCT-013 de 100A, por ser não invasivo e dar maior flexibilidade na sua utilização. Esse sensor, é um transformador de corrente, o qual possui sua relação de transformação dada pela expressão (1).

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

Construtivamente, esse sensor possui número de espira do primário ( $N_1$ ), igual a 1, e espiras do secundário ( $N_2$ ) igual a 2000, conforme o datasheet do fabricante YHDC. E considerando que o máximo de corrente eficaz que ele mede é de 100A, temos a corrente máxima de pico fornecida no secundário:

$$I_2 = \frac{100 * \sqrt{2}}{2000} = 0,0707A \quad (2)$$

Obtendo a corrente medida, e sabendo a tensão da rede, será possível obter a potência do circuito e a energia consumida. Sabendo que a corrente elétrica é a variação de carga elétrica no tempo, expressa por:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (3)$$

E a tensão elétrica é o trabalho necessário em Joules para mover 1C de carga entre dois pontos, dado por:

$$E(t) = \frac{dW(t)}{dq(t)} \quad (4)$$

Pode-se relacionar as duas equações por meio da carga elétrica, e isolando-se o termo diferencial:

$$E(t).i(t) = \frac{dW(t)}{dt} = P(t) \quad (5)$$

Ou seja, multiplicando-se a tensão pela corrente instantânea, tem-se a taxa de variação de energia absorvida ou liberada em um determinado tempo. Se considerarmos tempo como sendo 1s, essa taxa de variação é denominada de potência elétrica P, dada em Watts. Entretanto, numa determinada faixa de tempo, tem a seguinte expressão (6).

$$W(t) = \int_0^t P(t) dt \quad (6)$$

Se tomarmos a tensão (eficaz) e a corrente como constantes,

$$W = V.i.\Delta t = R.i^2.\Delta t \quad (7)$$

Na equação (7) está representada o cálculo para a energia em Joules, ou Watt-segundo (W.s) que é liberada ou absorvida. Nos sistemas de medição, para a tarifação de energia, há uma outra unidade utilizada para medir a energia consumida, essa unidade é o kW-hora (kWh), que indica o consumo de  $3,6 \times 10^6$  J em 1 hora. Portanto, para se ter o consumo total em kWh, a seguinte expressão é válida:

$$E_{kwh} = \frac{P}{3,6 \times 10^6} \quad (8)$$

Além do sensor de corrente, optou-se por utilizar o DHT22 para aquisição da temperatura e umidade local. Este sensor, possui uma faixa de medição de temperatura de -40°C a 80°C e medição de umidade de 0 a 100%, com tensão de operação de 3 a 5 Vcc. Para a leitura dos sensores, utilizou-se o microcontrolador ESP32, a qual possui integrado nela Wi-Fi e *Bluetooth*. Isso permite um ganho na montagem de circuitos pois não é necessário nenhum periférico a mais como seria caso fosse utilizada a placa Arduino.

Dentre todo o universo de uma REI, há vários pontos que podem ser abordados no âmbito da automação de energia. Moreira (2021), aborda vários aspectos dessa automação, desde a aquisição de dados dentro de uma subestação por meio da UTR que leva os dados até um Centro de Operações (CO), até o monitoramento do consumo de cargas residenciais. Dos vários aspectos demonstrados na tese de Moreira, o trabalho presente foca em um nicho específico e adaptado com outra ferramenta, o ESP32, já mencionado. A Figura 6 mostra a definição de um cenário geral, ilustrado a interface entre subestação de 13,8kV e o CO, conectado à nuvem, transformação da tensão de média para baixa tensão, distribuição da energia em residências com medidor inteligente, conexão à rede de geração distribuída e equipamentos da residência conectados à rede Wi-Fi, que é o ponto focal do trabalho circulado em vermelho. E fazendo referência a Figura 2, a simulação traz então uma aplicação no consumidor final, com uma rede local, com sensores e sistema de supervisão na *web* na camada de controle para um sistema de baixa tensão.

Figura 6 - Mapa de integração de domínios.

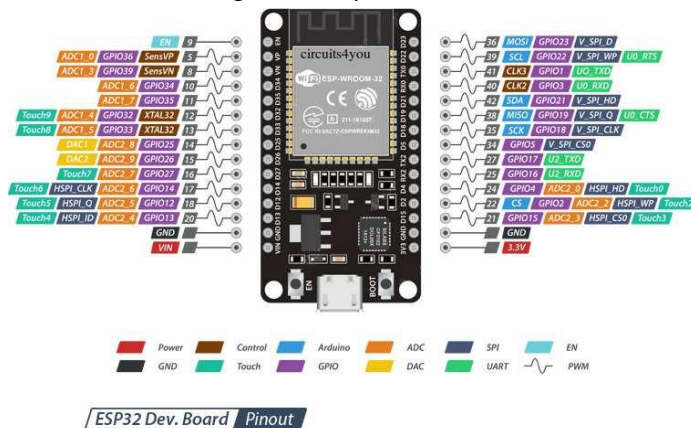


Fonte: Adaptado de Moreira, 2021.

#### 4.1. Montagem do protótipo

O ESP32 possui o que é chamado de *General Purpose Input/Output* (GPIO), ou seja, Interfaces de Propósito Geral de Entrada e Saída. Tais pinos podem assumir valores 0 ou 1, como entrada ou saída e podem fazer a leitura de sinais analógicos também, trabalhando com o nível de tensão 3,3V. Para o protótipo, foram escolhidos dois pinos GPIO para a leitura dos sensores. Para o sensor DHT22, foi configurado o pino 12 e para o SCT-013 foi configurado o pino 34. A arquitetura e pinagem do ESP32 é mostrada na Figura 7.

Figura 7 - Arquitetura do ESP32.

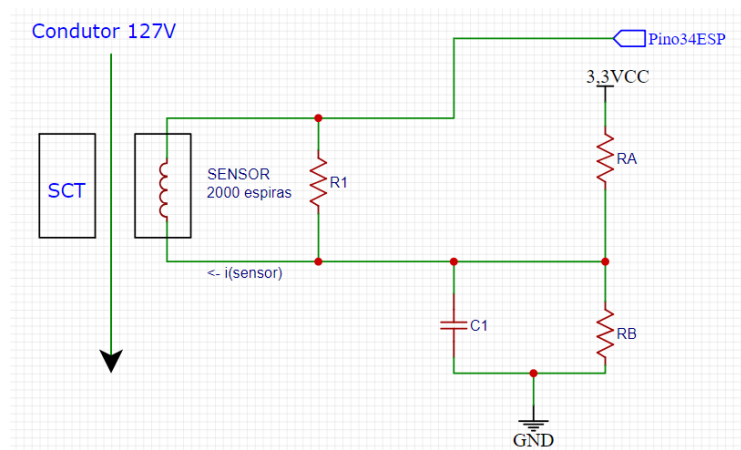


Fonte: Lobo da Robótica, 2021.

O sensor DHT22 é um sensor que possui apenas 3 pinos: positivo (5V ou 3,3V), GND e o pino de saída o qual é ligado diretamente no ESP32. Por sua vez, o sensor de corrente SCT-013, possui uma saída de corrente. Em um caso prático para uma corrente no primário, de 100A, haverá na saída 50mA. Como o pino do ESP32 só consegue ler níveis de tensão de até 3,3V, é necessário montar um circuito de conversão com resistor de carga e um divisor de tensão para que a tensão máxima seja 3,3V.

A Figura 8 mostra o circuito específico para o SCT-013, sendo que foi definido R1 como 330Ω e RA e RB sendo 10kΩ. O capacitor C1 utilizado foi 10μF.

Figura 8 - Circuito de ligação do SCT-013.

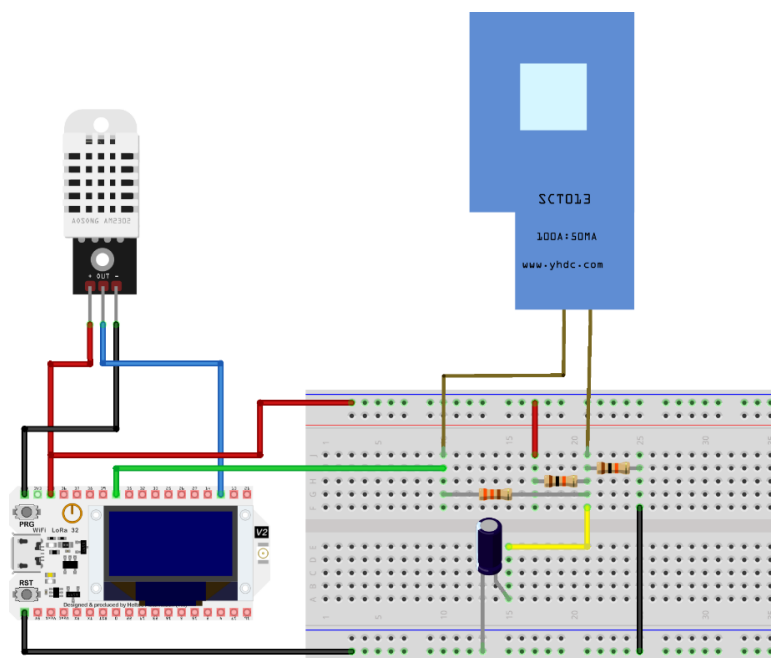


Fonte: Elaborado pelo autor.



A Figura 9 traz o resultado do esboço, feito com a ferramenta Fritzing, da montagem da ligação entre componentes e o ESP32.

Figura 9 - Esquema com todos os componentes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em suma, os materiais utilizados foram:

- Microcontrolador ESP32;
- Sensor DHT22;
- Sensor SCT-013;
- Capacitor 10  $\mu$ F;
- 1 resistor de 330 $\Omega$ ;
- 2 resistores 10k $\Omega$ .

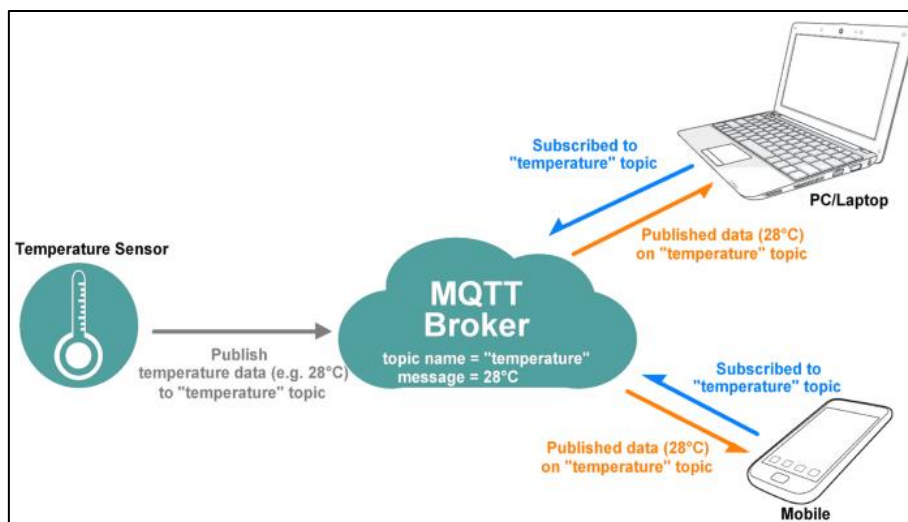
#### 4.2. Integração com web

O ponto focal da simulação é realizar uma integração da eletrônica com a *web*, trazendo então, o lado *Smart* da aplicação. Para isso, foi utilizado o protocolo MQTT e a ferramenta *Node-red*.

O protocolo MQTT é bastante difundido nas aplicações de IoT. Ele utiliza o conceito de *brokers*, os quais atuam como um *software publisher-subscriber* que recebe solicitações e as repassa, quando solicitado, ou seja, o *broker* atua nos dois sentidos, recebendo e enviando dados. O protocolo foi idealizado para ser *Machine-to-Machine*, ou seja, de dispositivo para dispositivo. Os elementos IoT geram dados por meio dos sensores e os enviam para o broker, onde são registrados e podem ser acessados por outros dispositivos IoT sem a necessidade prévia de endereços, abertura de portas em roteadores e *firewalls* (De Oliveira, 2021). O *broker* utilizado no projeto foi o HiveMQ. Nele são criados “tópicos” onde são direcionados os dados. Para o projeto, foram criados quatro tópicos, sendo eles: temperatura, umidade,

corrente e potência. A Figura 10 representa o funcionamento do protocolo MQTT, em que a informação da temperatura é enviada ao tópico em questão e dispositivos como um computador ou celular estão inscritos no mesmo tópico para ter acesso à essa informação.

Figura 10 - Funcionamento básico do MQTT.



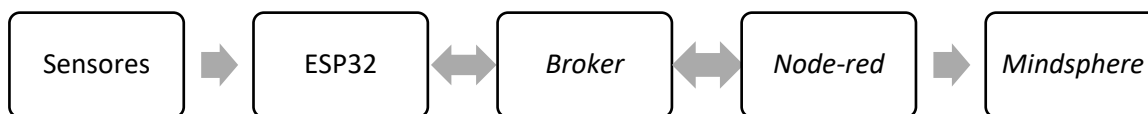
Fonte: DAVE, 2018.

Estabelecido o *broker*, o próximo passo é obter os dados através de alguma ferramenta. Para tal foi escolhido o *Node-red*, o qual é uma ferramenta de programação para conectar dispositivos de *hardware* IoT, *Application Programming Interfaces* (APIs) e serviços online de forma simples e utiliza programação em forma de fluxo, orientada a componente, onde cada um é uma aplicação em um bloco chamado de nó (*node*) que pode ser configurado. Além dele receber os dados e ser possível manipulá-los, há um ambiente de criação de dashboards dentro da ferramenta que foi utilizado para validação da aquisição dos dados. Mas, ainda assim, optou-se por levar os dados para um aplicativo mais robusto e preparado para aplicações complexas. A conectividade alvo da simulação foi levar os dados coletados pelo ESP32 ao *Mindsphere* da Siemens.

O *Mindsphere* é um sistema operacional aberto que oferece uma plataforma de serviço em nuvem para a conexão e utilização dos dados em nuvem. Nele é possível utilizar aplicativos já existentes e criar aplicativos, agregando cada vez mais funcionalidades. Com essa plataforma o usuário não apenas tem dados para visualizar, mas é capaz de configurar ações, alarmes, tomadas de decisões baseadas em determinados acontecimentos, inserir aplicativos de inteligência artificial, entre outros (Petrik e Herzwurm, 2019). Para o projeto, foi utilizado os aplicativos gratuitos da plataforma.

A Figura 11 mostra o fluxograma das informações que serão monitoradas, ou seja, desde sua aquisição pelos sensores, conversão analógica-digital no ESP32, envio via WiFi ao *broker*, transmissão ao *Node-red* e *Mindsphere*. Nota-se que entre o *broker*, pode tanto enviar como receber mensagens oriundas de ambos os lados, com o ESP32 e o *Node-red*, estabelecendo nesse ponto uma bidirecionalidade do fluxo.

Figura 11 - Fluxograma do processo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3. Código

Para a simulação, utilizou-se um código em C++, nele contém algumas bibliotecas necessárias para realizar a aplicação. A primeira biblioteca utilizada foi a WiFi.h, a qual é responsável por trazer a funcionalidades que fazem o ESP32 se conectar à uma rede Wi-Fi. Para a comunicação com MQTT, a biblioteca PubSubClient.h foi a utilizada.

Com relação aos sensores, para o sensor de temperatura utilizou-se a biblioteca DHT.h. Para ela são definidos apenas dois parâmetros: o modelo do sensor, e o pino de entrada do ESP32.

Para o sensor de corrente, utilizou-se a biblioteca EmonLib.h. Para ela é necessário definir um valor de calibração para a medição de corrente e de tensão se ela também for medida. No caso do projeto, optou-se por definir uma tensão de rede já fixa.

Essa biblioteca possui duas possibilidades de uso: uma para medir tensão e corrente juntos e outra considerando apenas medição de corrente. Optou-se pela segunda forma. Para isso é colocado uma linha do código que envia o número de amostras que o código da biblioteca deve realizar. Esse número de amostras configurado, servirá como limite para um laço *for* no qual uma variável de iteração será incrementada até que seja igual ao número de amostras. Dentro do laço, é realizada a leitura do pino analógico do ESP32 e para cada amostra é retirado o *offset* causado pelo circuito físico. Esse valor filtrado é então elevado ao quadrado e realizado o somatório dos quadrados de cada valor filtrado. Por fim, o código divide o somatório pela quantidade de amostras e extrai a raiz desse valor que é então multiplicado pelo coeficiente de calibração e retornado o valor eficaz da corrente.

### 4.4. Cenário

Pode-se criar um cenário em que o consumidor final queira ter um monitoramento inteligente de seu consumo de energia, podendo visualizar em tempo real cada circuito de sua residência e poder atuar cada uma dessas cargas. Além disso, estabelecer limites de consumo mensais que tornar-se-iam gatilhos para que se o consumo ultrapassasse uma porcentagem desse limite, a carga fosse desligada remotamente a fim de garantir maior economia. Além de poder ter seu perfil de demanda e estabelecer avisos se o consumo de energia estiver ultrapassando a média. Todo esse estudo aqui mencionado, visa criar um ponto de partida para estabelecer uma conectividade que possa garantir essas funcionalidades, desde os *hardwares* até os *softwares*.

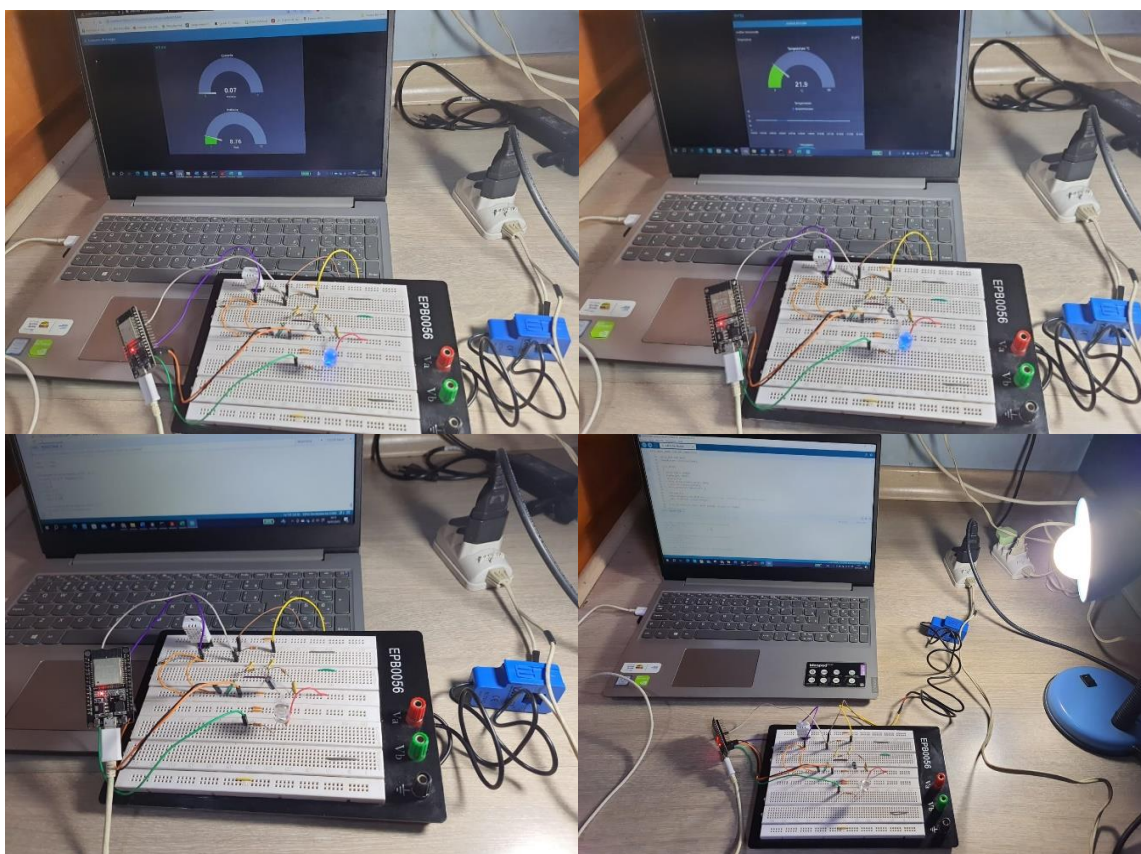
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção apresenta os resultados obtidos para as medições de corrente utilizando algumas cargas diferentes a fim de se comparar o desempenho da medição do sensor. Para validar os valores obtidos pelo sensor de corrente, foi utilizado um multímetro ICEL MD-1700 para ajudar na calibração do código para que fosse feita uma leitura mais precisa da corrente elétrica.

### 5.1. Testes de medição

Foram definidas duas cargas para os testes: uma lâmpada de 9 W e um ventilador de 55 W. Ambos testados na tensão de 127 V. Além da medição, a conectividade com o *broker* também foi testada a fim de haver as medições na *web* em tempo real. A montagem do protótipo pode ser vista por meio da Figura 12, na qual é mostrado o circuito montado na protoboard, com a carga resistiva (lâmpada) e o dashboard mostrando em tempo real as medições.

Figura 12 - Protótipo de medição de energia e condições climáticas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2. Medições Coletadas

Foram coletadas 15 amostras de corrente para cada tipo de carga a fim de se obter uma média, conforme Tabela 1. *A posteriori* foi comparada a média com o valor dado com o

multímetro em Tabela 2. O ventilador foi medido nas suas três potências e em conjunto com a lâmpada para haver uma carga maior. No total foram estabelecidos seis cenários sendo eles: lâmpada avulsa, o ventilador avulso em suas três potências, e a lâmpada mais o ventilador em sua primeira e terceira potência. O multímetro, por sua vez, foi colocado na sua função de amperímetro na escala de corrente alternada e ligado em série com a carga.

Tabela 1 - Amostras de corrente com o SCT-013

#	Lâmpada LED 9W (A)	Ventilador potência 1 (A)	Ventilador potência 2 (A)	Ventilador potência 3 (A)	Lâmpada LED + Ventilador potência 1 (A)	Lâmpada LED + Ventilador potência 3 (A)
1	0,0669	0,2535	0,2909	0,401	0,3181	0,4556
2	0,0674	0,2536	0,291	0,402	0,3164	0,4556
3	0,0676	0,2531	0,2913	0,4107	0,3162	0,4553
4	0,0673	0,2529	0,2897	0,399	0,3157	0,4550
5	0,0669	0,2531	0,2888	0,4003	0,3158	0,4547
6	0,0676	0,2532	0,289	0,4000	0,3159	0,4551
7	0,0663	0,2529	0,2894	0,4003	0,3173	0,4550
8	0,0673	0,2532	0,2887	0,4003	0,3166	0,4556
9	0,0675	0,2532	0,2886	0,399	0,3162	0,4549
10	0,0676	0,253	0,2894	0,4005	0,3168	0,4546
11	0,0668	0,2529	0,2886	0,4002	0,3163	0,4548
12	0,0671	0,2528	0,2885	0,4004	0,3166	0,4546
13	0,067	0,2526	0,2902	0,4004	0,3157	0,4542
14	0,0666	0,2524	0,2903	0,3986	0,3166	0,4548
15	0,0668	0,2526	0,2909	0,3982	0,3167	0,4541
Média	0,0671	0,253	0,2890	0,4007	0,31646	0,4549

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 2 por sua vez, mostra o comparativo entre a média das amostras coletadas e a medição do multímetro, mostrando em módulo a diferença entre elas.

Tabela 2 - Comparativo de medidas entre SCT-013 e multímetro.

Equipamento ligado	Medição via SCT-013 (A)	Medição no multímetro (A)	Módulo da diferença
Lâmpada LED 9W	0,0671	0,0668	0,0003
Ventilador potência 1	0,253	0,26	0,007
Ventilador potência 2	0,289	0,30	0,011
Ventilador potência 3	0,400	0,42	0,020
Ventilador potência 1 + Lâmpada LED	0,316	0,33	0,014
Ventilador potência 3 + Lâmpada LED	0,455	0,49	0,035

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 3, os valores são exibidos em potência, obtidos por meio da equação (5), além da diferença das medidas em módulo.

Tabela 3 - Comparativo de medidas em W.

Equipamento ligado	Medição via SCT-013 (W)	Medição no multímetro (W)	Diferença em módulo
Lâmpada LED 9W	8,52	8,48	0,04
Ventilador potência 1	32,12	33,02	0,10
Ventilador potência 2	36,70	38,10	1,40
Ventilador potência 3	50,80	53,34	2,54
Ventilador potência 1 + Lâmpada LED	40,13	41,91	1,78
Ventilador potência 3 + Lâmpada LED	57,78	62,23	4,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando um cenário em que se utiliza os equipamentos em um intervalo de tempo de 8h, em 30 dias serão 864000 segundos, e utilizando a equação (8), temos o consumo em kWh mensal.

Tabela 4 – Valores em kWh.

Equipamento ligado	Medição via SCT-013 (kWh)
Lâmpada LED 9W	2,04
Ventilador potência 1	7,71
Ventilador potência 2	8,83
Ventilador potência 3	12,21
Ventilador potência 1 + Lâmpada LED	9,64
Ventilador potência 3 + Lâmpada LED	13,87

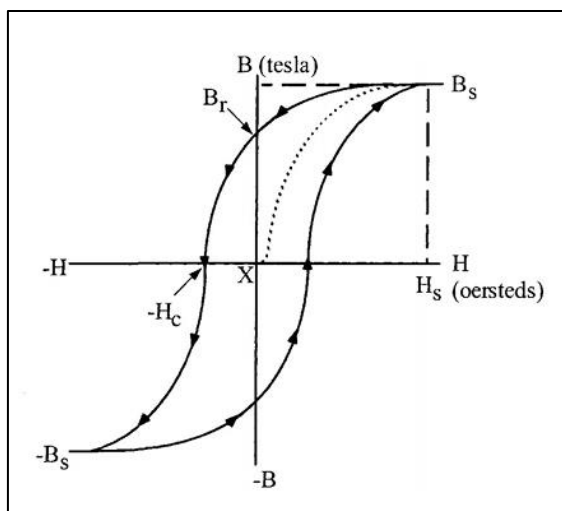
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que à medida que a carga teve um acréscimo de corrente, a diferença de medição também aumentou, mesmo que tenha chegado a um máximo de 35 mA para as cargas escolhidas, o que representa 4,45 W para 127 V. Pode-se afirmar que para determinada faixa de corrente, a medição apresentou-se bem coerente com o real e para faixas maiores seria indicado realizar uma nova calibragem do código fonte. Um fenômeno que pode estar relacionado a essa pequena diferença de medição é a saturação do núcleo do sensor no ciclo de histerese do material magnético. A histerese é uma fonte de perda de energia que acomete materiais de composição ferro magnético. Nestes materiais existe uma forte interação de dipolos magnéticos vizinhos que os deixam alinhados e mesmo na ausência de um campo magnético externo, os dipolos continuam alinhados. Em um dado ponto, todos momentos magnéticos estão alinhados ao campo externo, sendo o ponto de magnetização por saturação. Mesmo que haja um acréscimo no campo externo, a magnetização não sofre aumento. E no sentido inverso, ao haver diminuição do campo externo e este passar pelo zero, ainda haverá magnetização (Departamento de Física, 2016).

A Figura 13 ilustra o ciclo de histerese, no qual é possível observar o campo magnético B em função do campo magnético aplicado H. Quanto a corrente aumenta gradualmente a partir de zero, o campo B aumenta de zero partindo da origem X até o ponto B<sub>s</sub>. A partir desse

ponto, a curva torna-se horizontal, ou seja, próxima da saturação. Ao diminuir o campo  $H$  a partir de  $B_s$ , o campo  $B$  não diminui seguindo a mesma trajetória de magnetização, porém no sentido inverso, de modo que quando  $H$  é zero, ainda há um campo  $B_R$  residual.

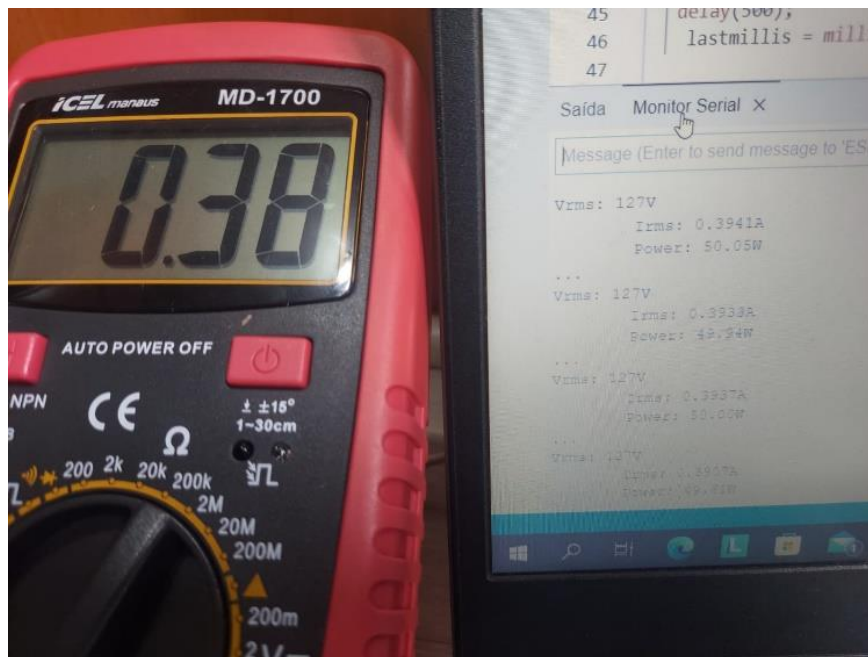
Figura 13 - Ciclo de histerese.



Fonte: Zhang, *et al.*, 2011.

Por outro lado, a Figura 14 mostra a medição com o multímetro lado a lado com os valores mostrados no monitor serial da IDE do Arduino, mostrando que é possível obter um valor muito próximo ao de um aparelho oficial de medição.

Figura 14 - Comparativo entre multímetro e medição com ESP32.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto a temperatura como a umidade mostraram-se bastante estáveis na sua aquisição e coerentes de acordo com o medido no dia das análises.

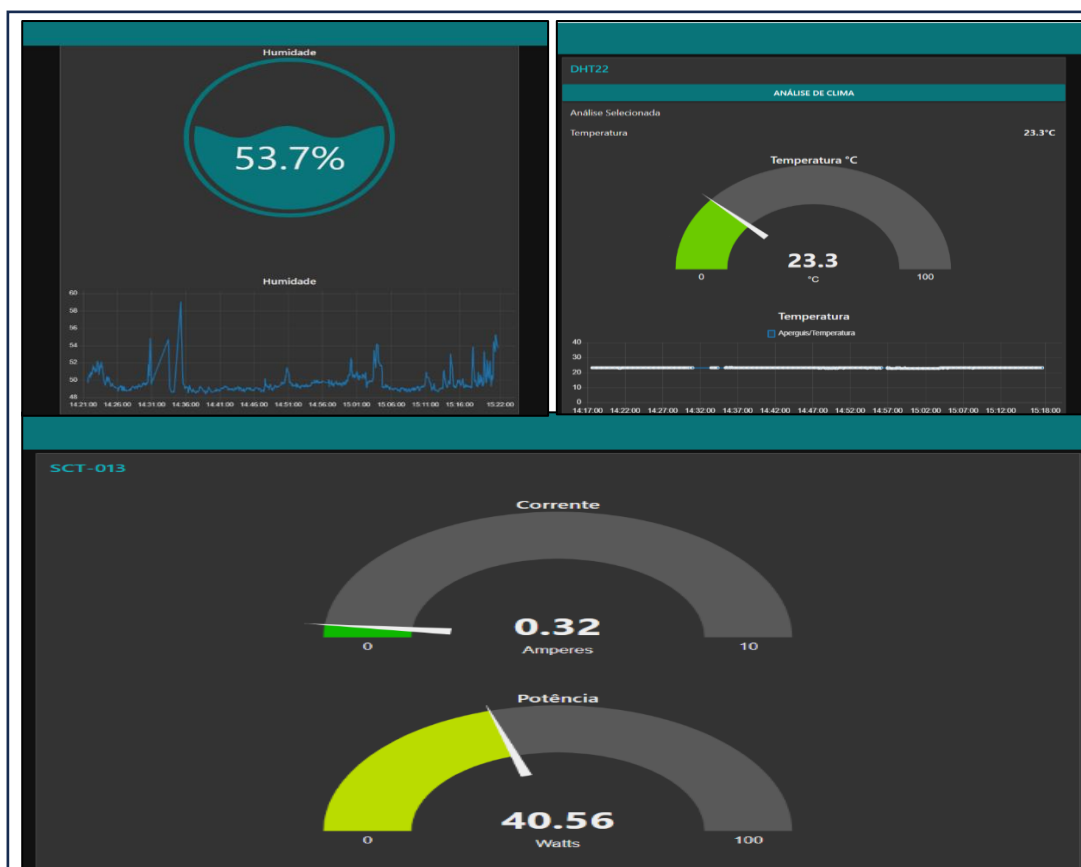


### 5.3. Conectividade

A segunda etapa do projeto, a conectividade com interfaces IoT, também foi executada tanto via *Node-red* como *Mindsphere*. Primeiramente os dados foram expostos no *Node-red* em duas folhas de dashboard, uma dedicada a dados climáticos e outro de energia. Por meio dos nodes “*Mqtt In*”, nos quais foram colocados os mesmos tópicos configurados no *broker*, foram transferidos os dados para os nodes de visualização gráfica, conforme Figura 15.

Também foi criada uma função no ESP32 que fica inscrita no tópico, aguardando alguma informação vinda do *Node-red*, trazendo a bidirecionalidade da rede. Essa função trabalha de forma que, quando receber uma informação específica aciona determinada saída digital do ESP32 para nível lógico 1, o que permite atuar diferentes elementos, como um simples LED (elemento visual) ou um relé, que pode estar chaveando uma carga. Isso permite então, o controle automatizado de carga.

Figura 15 - Visualização das medições no Node-red.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ter esses dados já no *Node-red*, foi configurada a conexão entre o próprio *Node-red* e o *Mindsphere*. Dentro do sistema da Siemens, foi utilizado o aplicativo *Asset Manager* para configurar dois *Assets*, sendo eles “*Monitoramento\_Energia*” e o “*Monitoramento\_Temperatura*”, eles representam o que poderiam ser duas máquinas diferentes, nas quais estão sendo monitoradas diferentes variáveis. No *Aspect type* foram



configuradas as estruturas das variáveis, ou seja, onde definimos quais são as variáveis, de qual tipo são (*string*, *double*, *boolean*, etc) e a categoria (*dynamic* ou *static*).

Em seguida, em cada *Asset*, foi gerado um código para ser colado no nó “*MindConnect Node-RED Agent*”, o qual é ligado em um bloco *function* que recebe o *payload* do bloco MQTT.

Por fim, no aplicativo “Monitor” é onde foi configurado o dashboard propriamente dito. A Figura 16 traz uma imagem do relatório construído na ferramenta da Siemens.

Figura 16 – Interface gráfica no aplicativo Mindsphere.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.4. Discussões

O presente trabalho traz consigo uma nova perspectiva do monitoramento de energia, a qual mostra a possibilidade de adaptar circuitos tradicionais ao sistema de REIs e IoT. A conectividade explorada entre um microcontrolador já com sistema de comunicação sem fio embarcada foi o ponto marcante do trabalho, o qual tornou-se um *gateway* de tráfego de informações, podendo levar as medições para a *web* e atuar suas saídas de acordo com um controle estabelecido dentro do *dashboard* do *Node-red*, análogo ao Aplicativo do Prossumidor de Energia descrito por Moreira (2021). A conexão com o aplicativo *Mindsphere* também abre precedentes para diversas pesquisas, pois não é apenas uma ferramenta de visualização, mas com os dados em sua nuvem, pode-se realizar análises que são providenciais para atuadores e máquinas tomarem suas decisões.

Este projeto traz a possibilidade de unir novas ferramentas nesse campo. Como um ponto de partida para novas aplicações e como pontos de melhorias pode-se citar: apesar de resultados satisfatórios, percebe-se que para correntes maiores seria necessário um refino da calibração do código no ESP32 ou até mesmo torná-lo variável para que se ajuste conforme a carga. Trazer mais funcionalidades ao *dashboard*, como configuração de alarmes, avisos e ações que são disparadas de acordo com os acontecimentos em tempo real, integração com dispositivos *mobile*, estabelecer um controle automático de cargas, baseado no histórico e limites de consumo de energia. Entretanto, uma parte pouco explorada pelo trabalho são as

técnicas de tomadas de decisão que poderiam ser aplicadas em um sistema como esse utilizando microcontrolador e protocolo MQTT, como por exemplo, trazer o levantamento da curva de carga e controlar as cargas a partir dela.

Conforme os objetivos expostos no início do trabalho, foi possível explorar as diversas formas de comunicação que são utilizadas nas REIs e realizar testes de conectividade em um protótipo de medição de energia e temperatura, que traz consigo, microcontrolador de baixo custo, conexão sem fio e interface com sistemas nos quais é possível tomar decisões que tornam a automação de energia mais prática e avançada.

## 6. CONCLUSÃO

A humanidade enfrenta atualmente um grande desafio em busca de melhorias contínuas de eficiência energética e tecnologia em prol de uma rede elétrica mais verde, sustentável e livre de carbono. Espera-se que nas próximas décadas haja uma transformação muito incisiva no mundo inteiro.

O trabalho realizado trouxe um panorama dessa mudança a nível mundial, como estão grandes nações na frente desse tema, que tipos de tecnologias são empregadas em busca dessa modernidade e como isso vai afetar a vida das pessoas. Mas não só grandes empresas e grandes fabricantes tem a oportunidade de trazer tais evoluções. O trabalho mostrou que com poucos itens de eletrônica, tais como um microcontrolador e dois sensores, pode-se obter bons resultados que unem IoT e medição de energia e temperatura fazendo a interface desses componentes com uma potente ferramenta como sistema Mindsphere, no qual foi possível visualizar em tempo real quatro grandezas.

Por fim, o trabalho faz jus a proposta de trazer mais conhecimento e possibilidades nessa grande área da tecnologia e instiga que novos trabalhos possam explorar ainda mais essas técnicas voltadas para gerenciamento de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

- BERGER, Lars T.; INIEWSKI, Krzysztof. **Redes Elétricas Inteligentes**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 347 p.
- BROWN, Marilyn; ZHOU, Shan. **Smart-Grid Policies: An International Review**. Ivan Allen College. Atlanta, p. 1-31. 2012.
- BUTT, Osama M.; BUTT, Tallal M.; ZULQARNAIN, Muhammad. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, 2021. 687-695. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.004>. Acesso em: 09 jul. 2023.
- CARRATÙ, Marco *et al.* Smart Power Meter for the IoT. **IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**, Porto, 20118. 514-519.
- CAVALHEIRO, Rafael D. S. **Sistema de Informação Integado a Smart Meter Contruído com Arduíno**. Universidade Federal do Pará. Belém, p. 94. 2018.

COLAK, Ilhami; BAYINDIR, Ramazan; SAGIROGLU, Seref. The Effects of the Smart Grid Systema on the Nacional Grids. **8th IEEE International Conference on Smart Grid**, 17-19 June 2020. 5.

DA SILVA, Rafael G. **Um Estudo Sobre Medidores Inteligentes de Energia**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 1-53. 2021.

DAVE, Jaydev. What is MQTT Protocol?, 26 Fevereiro 2018. Disponível em: <https://medium.com/@jaydev.dave93/what-is-mqtt-protocol-c6a0caffa8c>. Acesso em: 02 jun. 2023.

DE MENEZES, Wesley R. **Medidores Inteligentes e Comunicação de Dados em Redes Inteligentes**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 1-59. 2020.

DE OLIVEIRA, Sérgio. **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2021. 311 p.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA. Histerese e Relaxação Ferromagnética. **Apostila de Laboratório de Física B**. Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 2016. p. 1-7. Disponível em: [https://dfi.ufs.br/uploads/page\\_attach/path/2913/Histerese\\_V4.pdf](https://dfi.ufs.br/uploads/page_attach/path/2913/Histerese_V4.pdf). Acesso em: 16 set. 2023.

DIÁRIO OFICIAL DE MINAS GERAIS. **Jornal Minas Gerais**, 2012.

ELETRICIDADE MODERNA. **ISA Cteep inaugura baterias em sistema de transmissão**, 31 mar. 2023. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/em/noticia/6305-ISA-Cteep-inaugura-baterias-em-sistema-de-transmissao.html>. Acesso em: 15 mai. 2023.

EMBARCADOS. **Conheça as principais Tecnologias de comunicação sem fio**, 2021. Disponível em: <https://embarcados.com.br/tecnologias-de-comunicacao-sem-fio/>. Acesso em: 2023 mai. 26.

FERNANDES, Paula L. D. S.; VIANA, Paulo Í.; DE ARAÚJO, Isadora P. **Controle de Umidade para Plantas de Pequeno Porte**. Liceu de Artes e Ofícios de São Paulo. São Paulo. 2013.

GIORDANO, Vincenzo *et al.* **Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current develeopments**. Petten, p. 1-118. 2011.

HISCOCK, Jennifer. Smart Grid in Canada. **natural Resources Canada**, Março 2015. 32.

ISA CTEEP. **ISA CTEEP DESENVOLVE PRIMEIRO PROJETO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS EM LARGA ESCALA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO**, 16 Novembro 2021. Disponível em: <https://www.isactEEP.com.br/pt/noticias/isa-ctEEP-desenvolve-primeiro-projeto-de-armazenamento-de-energia-em-baterias-em-larga-escala-no-sistema-de-transmissao-brasileiro>. Acesso em: 15 mai. 2023.

ISA CTEEP. **INTERLIGAÇÃO ELÉTRICA ITAPURA: SUBESTAÇÃO LORENA**, 12 Janeiro 2022. Disponível em: <https://www.isactEEP.com.br/pt/interligacao-eletrica-itapura-subestacao-lorena>. Acesso em: 15 mai. 2023.

KRAMP, Thorsten; VAN KRANENBURG, Rob; LANGE, Sebastian. **Enabling things to talk: Designing IoT solutions with the IoT architectural reference model**. Berlim: Springer, 2016.

LAMBA, Gurlin S. Smart Grid and its Development Prospects In the Asia-Pacific region. **CIS Journal**, 2011. 5.

LEONHARDT, Douglas B. **Medidor de Consumo de Energia Elétrica Integrado à Internet das Coisas**. Instituto Federal de Santa Catarina. Itajaí, p. 1-170. 2021.

LOBO DA ROBÓTICA, 2021. Disponível em: <https://lobodarobotica.com/blog/esp32-pinout/>. Acesso em: 22 abr. 2023.

MARTINS, Paulo J.; PELEGRIN, Matheus C. **Monitoramento de Consumo de Energia, Utilizando Arduino e Sensor de Tensão e Corrente Elétrica**. UNESC. Criciúma, p. 17. 2020.

MIGUEL, Ricardo G. *et al.* Medição de Força por IoT para Análise de Elementos Finitos com Apresentação de Resultados em Tempo Real por Realidade Aumentada. **Revista Brasileira de Mecatrônica**, 2022. 28.

MINISTRY OF POWER, GOVERNMENT OF INDIA. **Smart Grid Vision and Roadmap for India**. [S.I.]. 2013.

MOREIRA, Hermom L. *et al.* An Infrastructure of Dynamic Tariff Management and Demand Response applied to Smart Grids using Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems, São Paulo, 2019.

MOREIRA, Hermom L. **Aplicações da resposta da demanda em redes elétricas inteligentes: uma abordagem para implementação, prototipagem e otimização**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2021.

MOREIRA, Hermom Leal; KAGAN, Nelson. **Applications of Demand Response on Smart Grids**. São Paulo. 2020.

NEOENERGIA. Elektro instala 10 mil medidores do projeto Energia do Futuro, 17 jan. 2019. Disponível em: <https://www.neoenergiaelektro.com.br/noticias/01/17/2019/elektro-instala-10-mil-medidores-do-projeto-energia-do-futuro>. Acesso em: 25 mai. 2023.

ONS. O Sistema em Números. **Operador Nacional do Sistema**, 29 dez. 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 05 jul. 2023.

PETRIK, Dimitri; HERZWURM, Georg. IoT ecosystem development through boundary resources: a Siemens MindSphere case study. **Proceedings of the 2nd ACM SIGSOFT International Workshop on Software-Intensive Business: Start-Ups, Platforms, and Ecosystems**, 2019.

PRADYUMNA, Achhi *et al.* **IoT Based Smart Grid Communication with Transmission Line fault Identification**. Vardhaman College of Engineering. Hyderabad, p. 1-5. 2022.

RAPPAPORT, Theodore. **Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2009.

RIBEIRO, Rodolpho R. R. **Estudo da Norma IEC 61850**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 1-52. 2010.

ROMANCIINI, Eliel M. R. **Desenvolvimento de Smart Meter interado com IoT para monitoramento da energia elétrica em residências**. Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá. 2020.

SIEMENS. **Uma cidade nas nuvens**, 2021. Disponível em: <https://www.siemens.com/br/pt/empresa/stories/cidades/aguaduna-cidade-inteligente-brasil.html>. Acesso em: 01 jun. 2023.

SIEMENS. **Catálogo Siemens de Produtos no Brasil**, Abril 2022. Disponível em: <https://www.siemens.com/br/pt/produtos/catalogos.html>. Acesso em: 09 jul. 2023.

SOCIETY, THE INTERNET. *The Internet of Things*, Geneva, 2015.

SOUZA, Rafaela. Redes IEC-61850 - Estudo de Protocolo e Exemplo de Aplicação (Parte I). **Automação Industrial**, 2021. Disponível em: <https://www.automacaoindustrial.info/redes-iec-61850-estudo-de-protocolo-e-exemplo-de-aplicacao/#comments>. Acesso em: 16 set. 2023.

V2. Política Energética no Brasil: pauta precisa acelerar mudanças. **V2**, 31 ago. 2022. Disponível em: <https://v2com.com/2022/08/31/politica-energetica-no-brasil-uma-pauta-que-precisa-acelerar-mudancas/>. Acesso em: 01 jul. 2023.

YHDC. Datasheet Split core current transformer. Disponível em: <http://en.yhdc.com/product/SCT013-401.html>. Acesso em: 9 set. 2023.

ZHANG, Pinjia *et al.* A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 47, 2011. 34-46.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **<sup>i</sup> LUCAS NICOLAU APERGUIS**



Possui graduação em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do ABC – UFABC (2018), graduação em Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica UFABC (2021), pós-graduação em Automação e Controle pela Faculdade SENAI de Tecnologia (2023). Atualmente, graduando da Engenharia de Informação UFABC e Especialista de Produto no departamento Electrical Products da Siemens Infraestrutura e Indústria.

### **<sup>ii</sup> HERMOM LEAL MOREIRA**



Possui doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo – USP (2021), mestrado Engenharia Elétrica pela UNESP (2015), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UNIC (2007) e graduação em Engenharia Elétrica-Telecomunicações pela UFMT (2006). Atualmente é professor da Escola e Faculdade SENAI São Paulo “Mariano Ferraz”. <https://orcid.org/0000-0001-8339-7303>