



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

JULIANA FRANCO IBIAPINA

SMART METER: SISTEMA NÃO INVASIVO PARA MONITORAMENTO DE
CONSUMO ENERGÉTICO

SOBRAL

2022

JULIANA FRANCO IBIAPINA

SMART METER: SISTEMA NÃO INVASIVO PARA MONITORAMENTO DE CONSUMO
ENERGÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Wendley S. Silva

SOBRAL

2022

JULIANA FRANCO IBIAPINA

SMART METER: SISTEMA NÃO INVASIVO PARA MONITORAMENTO DE CONSUMO
ENERGÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia de
Computação do Campus Sobral da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do grau de bacharel em Engenharia de
Computação.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wendley S. Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Iális Cavalcante de Paula Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Erick Aguiar Donato
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Romualdo e Rosiana, e aos meus avós, Petrone, Rose Meire, Rosário e Antônio, por terem sido meu suporte e por serem os responsáveis por eu ter a oportunidade de realizar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

À minha família, meu pai Romualdo, minha mãe Rosiana e minha irmã Ana Júlia, pela dedicação, amor e apoio que deram incondicionalmente e por terem acreditado e investido nos meus sonhos.

Aos meus avós, Petrone, Rose Meire e Rosário, que sempre foram presentes e estiveram ao meu lado quando meus pais não puderam estar e pelo amor e incentivo ao longo desses anos.

Ao meu orientador, professor Wendley, pelas oportunidades dadas ao longo da graduação e pelo suporte no desenvolvimento de projetos, em especial pela orientação e auxílio na conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos, que estiveram comigo durante esses anos de graduação, com a companhia, auxílio e incentivo deles pude passar por diversos desafios e dificuldades tanto no âmbito acadêmico como no pessoal. Destaco João Victor, Fabrício e Raíssa por terem me acolhido quando mais precisei e, em especial, Igor, que esteve presente em diversos momentos e não me deixou desistir quando estive desanimada.

Àqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho e não foram nomeados nesta lista.

“Estabeleceste, de fato, e efetivamente acontece,
que toda alma desregrada seja seu próprio cas-
tigo.”

(Agostinho de Hipona)

RESUMO

As cidades inteligentes possuem como um de seus fundamentos a implementação de uma rede elétrica capaz de responder a eventos que podem acontecer em qualquer lugar da mesma, além de adotar respostas estratégicas a depender da situação. Para tornar isso possível foi criado o conceito de *Smart Meter*, um dispositivo que é capaz de medir a quantidade de energia consumida por uma carga e disponibilizar os dados coletados em tempo real ou sob demanda na internet, podendo, também, receber comandos remotos implementando um tipo de comunicação bidirecional. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de dispositivo IoT para monitoramento de consumo energético residencial utilizando um sensor de corrente não invasivo, disponibilizar em tempo real os dados obtidos por meio de uma aplicação Web e analisar a eficiência do mesmo para o contexto proposto. Foram realizados três ensaios para validar o protótipo, os resultados obtidos foram satisfatório, a média de erro relativo dos três ensaios foi de 10,21%.

Palavras-chave: *Smart Meter. Smart Grid. Internet of Things.* Monitoramento de consumo energético

ABSTRACT

The smart cities have as one of its principles the implementation of an electrical network capable to give answers which can happen everywhere, as well as it can give strategic answers depending on the situation. To make it possible the concept of Smart Meter was created, a device which is capable of measure the energy quantity consumed by a charge and provide the data that was collected in real timing or under request on internet, as well it can receive remote orders implementing a kind of bidirectional communication. This work aims to develop a prototype of an IoT device for monitoring residential energy consumption using a non-invasive current sensor, making the data obtained by a Web application available in real time and to analyze the efficiency of it in the proposed context. Three tests were carried out to validate the prototype; the results obtained were satisfactory. The average relative error of the three tests was 10.21

Keywords: Smart Meter. Smart Grid. Peasants. Internet of Things. Energy consumption monitoring

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de circuito para a lei de Faraday	23
Figura 2 – Características do TA 12-100 (PEREIRA <i>et al.</i> , 2019)	24
Figura 3 – Representação gráfica de tensão constante e tensão senoidal ao longo do tempo(FERRÃO; CONTRERA, 2013)	25
Figura 4 – Arquitetura geral do sistema	27
Figura 5 – Circuito completo do <i>Smart Meter</i>	27
Figura 6 – Forma de onda da corrente induzida na saída do sensor	30
Figura 7 – Circuito de <i>offset</i>	30
Figura 8 – Forma de onda da tensão nos terminais do sensor	31
Figura 9 – Protótipo do projeto	32
Figura 10 – Página Web exibindo os dados de consumo	33
Figura 11 – Comparação entre os erros relativos de cada amostra da carga de prova 1 . .	34
Figura 12 – Comparação entre os erros relativos de cada amostra da carga de prova 2 . .	34
Figura 13 – Comparação entre os erros relativos de cada amostra da carga de prova 3 . .	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre a rede elétrica tradicional e a <i>Smart Grid</i> (FANG <i>et al.</i> , 2012)	14
Tabela 2 – Lista de componentes	28
Tabela 3 – Resultados do primeiro ensaio	34
Tabela 4 – Resultados do segundo ensaio	34
Tabela 5 – Resultados do terceiro ensaio	35

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
\vec{B}	Campo magnético
C	Custo
E	Energia
\vec{E}	Campo elétrico
I	Corrente elétrica
P	Potência
R	Resistência
T	Tempo
U	Tensão
V	Tensão
W	Watt
μ_0	Constante de permeabilidade magnética do vácuo
fem	Força eletromotriz
ψ	Fluxo
Ω	Ohms

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problemática	14
1.2	Objetivos	15
1.3	Trabalhos Relacionados	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Internet das Coisas	17
2.1.1	<i>NodeMCU ESP32</i>	17
2.1.2	<i>Protocolo Wi-fi</i>	18
2.2	Medidores de Energia	19
2.3	Consumo de Energia	20
2.4	Lei de Ampere	21
2.5	Corrente Alternada	22
2.6	Lei da Indução de Faraday	22
2.7	Transformadores de Corrente	23
2.8	Valor eficaz ou Tensão RMS	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Visão geral da arquitetura do sistema	27
3.2	Implementação	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Ensaaios	32
4.1.1	<i>Monitoramento de consumo</i>	32
4.1.2	<i>Validação dos dados</i>	33
4.2	Conclusões	35
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O termo *Internet of Things* pode ser definido como um sistema de dispositivos inteligentes inter-relacionados, os quais possuem identificadores únicos e capacidade de comunicar dados através de uma rede ou da Internet sem necessidade de intervenção humana (PARIHAR, 2019). Na última década, esses dispositivos inteligentes vêm ganhando destaque, eles utilizam-se da comunicação sem fio e do processamento de dados para integrar mais funcionalidades a objetos cotidianos. Eles são a base para a criação de *Smart Cities*, um ambiente onde coisas e pessoas estão conectadas umas às outras em constante troca de informações, o que gera interações otimizadas, cujo objetivo é a melhoria da qualidade de vida dos seus habitantes.

Uma das bases para a construção de *Smart Cities* é a *Smart Grid*. Ela se caracteriza pela comunicação bidirecional de dados entre os usuários relevantes da cadeia de conversão de energia, resultando em uma rede participativa onde consumidores, concessionárias e prestadores de serviços compartilham responsabilidades e benefícios (CARRATU *et al.*, 2018). Em termos gerais, a *Smart Grid* tem a capacidade de responder a eventos que acontecem em qualquer parte da rede e adotar as estratégias correspondentes dependendo da situação (FANG *et al.*, 2012).

O objetivo da *Smart Grid* é desenvolver uma rede elétrica cujos processos de geração, transmissão, distribuição e consumo de eletricidade sejam feitos por um sistema limpo, seguro, confiável, resiliente e sustentável, no qual os sensores integrados se comunicam instantaneamente com cada subestação, como transformadores, conversores e geradores, identificando as demandas a fim de gerenciar o fluxo de energia em circunstâncias de decisão (MANDHALA *et al.*, 2016; FANG *et al.*, 2012; KABALCI, 2016).

A confiabilidade e a sustentabilidade da infra-estrutura da *Smart Grid* dependem do controle da medição integrado ao sistema de comunicação da rede elétrica (KABALCI, 2016). Tal rede necessita de medidores inteligentes que se comuniquem bidirecionalmente, enviando e recebendo informações e comandos. A partir dessa necessidade surgiu o conceito de *Smart Meters*, dispositivos que possibilitam o monitoramento e controle do consumo de energia de cada aparelho eletrônico em uma casa.

O *Smart Meter* é um medidor de consumo de energia que obtém informações da carga dos usuários finais usado na *Smart Grid* (ZHENG *et al.*, 2013). Ele deve ser capaz de detectar as taxas de consumo de energia e disponibilizá-las em tempo real. Os sistemas de medição inteligentes são compostos por um bloco de medição de consumo e outro bloco de comunicação. Essa infraestrutura de comunicação deve possibilitar a troca bidirecional de dados,

permitindo que o *Smart Meter* adquira dados sobre o cliente e sobre a rede elétrica, além disso, o dispositivo deve incluir um módulo de controle, a fim de executar comandos vindos dos centros remotos. Os *Smart Meters* também podem gerenciar a demanda de energia do cliente, limitando o consumo ou conectando e desconectando remotamente outros suprimentos (KABALCI, 2016).

1.1 Problemática

As redes elétricas tradicionais geralmente são usadas para transportar energia de alguns geradores centrais para um grande número de usuários. A *Smart Grid*, por outro lado, usa fluxos bidirecionais de eletricidade e informações para criar uma rede de fornecimento de energia automatizada e distribuída (FANG *et al.*, 2012). A Tabela 1 apresenta uma breve comparação entre a rede tradicional e a *Smart Grid*.

Tabela 1 – Comparação entre a rede elétrica tradicional e a *Smart Grid* (FANG *et al.*, 2012)

Rede Elétrica Tradicional	Smart Grid
Eletro-mecânico	Digital
Fluxo unilateral	Fluxo bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Poucos sensores	Sensores em várias partes
Monitoramento manual	Monitoramento automático
Restauração manual	Autorestauração
Falhas e apagões	Adaptável e isolado
Controle limitado	Controle difuso
Poucas escolhas do cliente	Muitas escolhas do cliente

Na rede tradicional o tipo mais comum de medidor de energia elétrica é o de indução eletro-mecânico watt-hora. Seu funcionamento se baseia na contagem da rotação de um disco de metal não magnético, que é feito para rotacionar a uma velocidade proporcional à potência que passa através do medidor; o número de revoluções é proporcional à quantidade de energia que o dispositivo em questão utiliza. O consumo de energia elétrica é calculado pela relação entre energia usada ou absorvida por unidade de tempo (YOESEPH *et al.*, 2019). Tais dispositivos não são aptos para atender aos requisitos de uma *Smart Grid*, pois não possuem tecnologias de comunicação, impossibilitando controle e monitoramento em tempo real.

O *Smart Meter* é um dos mais importantes mecanismos na *Smart Grid*, além da obtenção de informações dos dispositivos consumidores ele também possibilita o controle do comportamento desses dispositivos. Assim, quase todas as informações estão disponíveis em tempo real e sob demanda, permitindo operações aprimoradas do sistema e gerenciamento da

demanda de energia do cliente (FANG *et al.*, 2012). Enquanto o medidor tradicional mede o consumo de energia por meio de um disco giratório, o *Smart Meter* mensura o consumo por meio de sensores para medição de tensão, corrente e qualidade de energia (DAS; SAIKIA, 2016).

Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de monitoramento em tempo real de consumo energético domiciliar não invasivo. O sensor utilizado é um transformador de corrente, o qual não precisa estar conectado à rede elétrica para obter os dados de consumo. O objetivo é avaliar a eficiência do transformador de corrente para obtenção de dados de consumo e disponibilizá-los em tempo real por meio da Web.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um protótipo de dispositivo IoT para monitoramento de consumo energético residencial, a fim de disponibilizar em tempo real os dados obtidos aos usuários por meio de uma aplicação Web.

Alguns dos objetivos específicos são:

- Implementar um dispositivo com sensor não invasivo ACTA 12-100 para medição de corrente;
- Implementar as rotinas de cálculo e envio de consumo energético por meio da internet;
- Visualizar através de uma aplicação web os dados obtidos pelo dispositivo;
- Calcular a taxa de acerto ou a eficiência do sistema.

1.3 Trabalhos Relacionados

É possível encontrar na literatura diversos projetos de implementação de *Smart Meter*. Esses sistemas coletam, armazenam e processam os dados obtidos, disponibilizando-os para os usuários ou concessionárias de energia por meio de aplicações Web.

O projeto apresentado em (YOESEPH *et al.*, 2019) aborda o desenvolvimento de um sensor de medição de consumo energético inteligente utilizando a placa de prototipagem Arduino. O sistema possibilita o monitoramento em tempo real utilizando um sensor de corrente e um sensor de tensão, ambos conectados a um Arduino, cuja conexão com a internet pôde ser estabelecida através de um *shield* de Ethernet. Os dados foram armazenados e processados em um servidor, e podiam ser acessados pelo usuário por meio de um aplicativo *mobile*. O projeto apresentou uma acurácia de 77% para o sensor de tensão e 86% para o sensor de corrente elétrica.

Em (PEREIRA *et al.*, 2019) os autores desenvolveram um projeto para monitoramento de consumo de eletricidade no contexto de hospedagem compartilhada. O objetivo do sistema é possibilitar a contabilização dos gastos com energia elétrica de um hóspede, de forma a poder separar o consumo total da residência com o consumo individual do hóspede. O sistema é composto por um *Smart Meter*, uma *API Restfull* e uma aplicação Web. A modelagem de dados foi feita com persistência poliglota, usando tanto o modelo relacional como o não-relacional. Nesse sistema, um sensor de corrente não invasivo foi conectado a um Arduino, que envia os dados para um Raspberry Pi, que, por sua vez, é responsável por se conectar com a *API Restfull*. Os dados são entregues aos usuários por meio de uma aplicação Web.

Em (STUSEK *et al.*, 2017) um sistema não invasivo de monitoramento de consumo energético é implementado. Nesse trabalho uma estrutura semelhante aos projetos já mencionados é seguida: um sensor de corrente conectado a um Arduino, o qual interage com uma API para armazenar e processar os dados, que são disponibilizados aos usuários por uma aplicação Web. No entanto, o trabalho tem como assunto principal o funcionamento do sensor de corrente bem como o seu desempenho, acurácia e escalabilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados alguns dos principais temas utilizados como referência para o desenvolvimento do trabalho. Dentre eles Internet das Coisas, medidores de consumo de energia, transformadores de corrente e plataformas de prototipagem.

2.1 Internet das Coisas

O conceito de *Internet of Things* (IoT) é simples e resume-se à capacidade de interconexão entre diferentes dispositivos por meio da Internet. Desenvolver um sistema baseado em IoT é uma tarefa que envolve a utilização de diversas ferramentas e tecnologias relacionando-se, ainda, a tópicos como limitação energética, capacidade de armazenamento e processamento bem como variados tipos de padrões de comunicação.

De acordo com (RAYES; SALAM, 2019), no âmbito pessoal, a IoT dá a perspectiva de um mundo onde os objetos cotidianos estarão conectados à internet, comunicando-se uns com os outros a fim de prover um ambiente adaptativo que opera de forma inteligente melhorando a vida das pessoas. Já para os negócios, a IoT possui perspectivas mais ambiciosas, que incluem a detecção e análise automáticas de milhares de variáveis relacionadas a produtos ou serviços em tempo real, tornando automáticas as intervenções em operações antes que tal produto ou serviço sejam afetados por possíveis falhas.

A IoT vem mostrando uma taxa de crescimento sem precedentes nos últimos anos. Os autores de (RAYES; SALAM, 2019) mostram que houve um ponto de inflexão entre os anos de 2009 e 2010, onde o número de dispositivos conectados ultrapassou o número de pessoas no planeta, contando não apenas com computadores, *smartphones* e tablets, mas também com sensores e objetos que em épocas passadas não possuíam conexão com a internet. Os estudos recentes apontam que a adoção das tecnologias de IoT é cinco vezes mais rápida que o crescimento da eletricidade e telefonia, o que traz uma perspectiva de crescimento exponencial para os próximos anos (RAYES; SALAM, 2019).

2.1.1 NodeMCU ESP32

O NodeMCU é uma plataforma de prototipação *open source* de baixo custo semelhante ao Arduino. Ele possui como principal componente o chip ESP8266 desenvolvido pela Espressif Systems, que o habilita a fazer conexões por meio do protocolo TCP/IP. Além do wi-fi

ele também possui módulo Bluetooth integrado. A alimentação da placa é feita por uma porta micro-usb e a mesma pode ser programada em vários ambientes de programação.

O ESP32 é projetado para aplicativos móveis, eletrônicos vestíveis e *Internet of Things* (IoT). Ele apresenta todas as características de última geração dos chips de baixo consumo de energia, incluindo controle de *clock* de baixa granularidade, vários modos de potência e escalonamento de potência dinâmico. O ciclo de baixa carga é usado para minimizar a quantidade de energia que o chip gasta. A saída do amplificador de potência também é ajustável, contribuindo assim para um equilíbrio ideal entre faixa de comunicação, taxa de dados e consumo de energia (MAIER *et al.*, 2017). O ESP8266 é capaz de funcionar em ambientes com temperatura na faixa de -40°C até 125°C e pode funcionar como um sistema *standalone* ou como escravo de outro dispositivo (ESP, 2021).

A variedade de aplicação do ESP32 não se limita a projetos IoT. Em (MAIER *et al.*, 2017) há um exemplo de um projeto que visa construir um protótipo de um osciloscópio sem fio portátil baseado no ESP32 e um aplicativo de *smartphone* como unidade de exibição e controle. Em (BISWAS; IQBAL, 2018) é apresentado um sistema de bombeamento solar de água automatizado de baixo custo para irrigação em países em desenvolvimento. No sistema proposto em (SARJERAO; PRAKASARAO, 2018), sensores são utilizados para monitorar a qualidade do ar de cidades poluídas. Os dados medidos são colocados no servidor usando uma API REST (*Representational State Transfer*) e ESP32. Todas as leituras dos sensores são exibidas na página da *web* e no aplicativo móvel.

2.1.2 Protocolo Wi-fi

O Wi-fi é um dos mais populares protocolos de comunicação *wireless*, amplamente usado em ambientes corporativos e pessoais. Wi-Fi é uma marca criada pela Wi-Fi Alliance, com o propósito de identificar produtos testados, garantindo a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fornecedores. Os produtos Wi-Fi devem ser projetados usando um padrão conhecido como IEEE 802.11.

Tradicionalmente, protocolos como ZigBee e outros baseados em IEEE 802.15.4 são escolhidos para soluções IoT devido ao seu design de eficiência energética, no entanto, o desenvolvimento de componentes para Wi-fi de baixo consumo energético tornaram esse protocolo também uma ótima opção (TOZLU MURAT SENEL; KESHAVARZIAN, 2012). O protocolo Wi-fi tem a vantagem de configurar uma rede com compatibilidade IP nativa, sua

utilização reduz o custo de infraestrutura uma vez que a sua conectividade IP universalmente aceita supera os caros requisitos de *gateway* dos protocolos proprietários.

2.2 Medidores de Energia

A energia elétrica é comercializada como um produto, e para que o faturamento seja possível foram criados os medidores de energia para que seja possível mensurar a quantidade de energia utilizada por cada cliente. Existem dois tipos de medidores de eletricidade: eletromecânicos ou eletrônicos.

O medidor eletromecânico tipo indução começou a ser utilizado na década de 1880, ele tem seu funcionamento baseado no fenômeno da indução eletromagnética (SHARMA; SAINI, 2015). O medidor contabiliza o número de revoluções de um disco de alumínio, que pode girar em torno do seu eixo a uma velocidade proporcional à potência de carga. O medidor deve ser calibrado de forma que o número de rotações durante um intervalo de tempo seja proporcional à energia solicitada pela carga, ou seja, o disco terá um número certo de voltas por Wh. O movimento do disco é transmitido por meio de um sistema mecânico de engrenagens ao mostrador, que indicará o consumo em KWh da carga em questão (MÍNGUEZ, 2007).

Além do medidor analógico também existem os medidores eletrônicos, os quais garantem melhor exatidão, além da possibilidade de serem monitorados à distância através de uma linha telefônica ou mesmo da internet. Seu funcionamento baseia-se em um circuito com transdutores de corrente e tensão, multiplicadores e integradores, mais detalhes sobre seu funcionamento podem ser encontrados em (MÍNGUEZ, 2007). Além da potência ativa, esses medidores também podem medir parâmetros como tensão, corrente, potência ou mesmo dados de faturamento como quilowatt-hora (kWh) (SHARMA; SAINI, 2015).

Em relação aos modelos eletrônicos legados, o *Smart Meter* pode oferecer uma variedade de funções ditas inteligentes, tais como preço dinâmico, resposta à demanda, conexão/desconexão remota de energia, gerenciamento de interrupções e redução de perdas não técnicas. Tem um custo menor e é planejado para integrar comunicação bidirecional em milhões de equipamentos de energia, a fim de criar uma infraestrutura dinâmica e interativa com recursos de gerenciamento de energia (SHARMA; SAINI, 2015).

2.3 Consumo de Energia

O preço da energia elétrica inclui os gastos com os processos que vão desde a geração até a sua disponibilidade aos consumidores finais, os valores são estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (Arifin, 2018). Devido a ordem de grandeza do consumo cotidiano em residências e indústrias ser muito grande, as empresas de geração e distribuição de eletricidade adotam como unidade de energia o kWh (quilowatt por hora), sobre o qual é cobrado uma tarifa.

A energia utilizada por uma carga durante um dado intervalo de tempo é calculada pelo produto da potência (kW) da carga pelo número de horas que a mesma permaneceu ligada. O valor da tarifa (C_{tarifa}) por kWh pode mudar a depender da região, do horário ou da bandeira. O cálculo do consumo (C_{total}) em reais (R\$) é dado por:

$$C_{total} = E \cdot C_{tarifa} \quad (2.1)$$

Onde E é a energia total utilizada durante o intervalo de tempo em questão e C_{tarifa} é o valor da tarifa por kWh em reais (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020).

A energia elétrica é definida como a potência ativa consumida ao longo do tempo e sua unidade é watt segundo (Ws).

$$E = \int_{t_0}^t P \cdot dt \quad (2.2)$$

No entanto, conforme mencionado anteriormente, é mais usual utilizar a unidade watt hora (Wh).

Potência é a energia por unidade de tempo e é igual ao produto da tensão e da corrente, sendo expressa em watt (W).

$$P = \frac{dw}{dt} = V \cdot i \quad (2.3)$$

Potências em circuitos alternados possuem suas peculiaridades, pois diferentes impedâncias geram resultados distintos em função do tempo. Assim, a potência instantânea é definida como o produto entre valores instantâneos de tensão e corrente.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.4)$$

Onde tensão e corrente instantâneas são funções de seus valores de pico pelo cosseno em função do tempo:

$$v(t) = V_p \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.5)$$

$$i(t) = I_p \cdot \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

Impedâncias resistivas em circuitos alternados não alteram a fase φ entre tensão e corrente, ou seja, o produto da corrente que corresponde com a parcela da tensão que está em fase com ela é dito por potência ativa ou potência real.

2.4 Lei de Ampere

Em 1820, observou-se pela primeira vez a produção de efeitos magnéticos através de correntes elétricas. Hans Christian Orsted observou que um longo fio próximo a uma bússola alterava a orientação da agulha da mesma sempre que uma corrente elétrica passava pelo fio. A partir das observações de Orsted, Ampere realizou seus estudos sobre a relação entre corrente elétrica e campos magnéticos.

Segundo a Lei de Ampere, um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera ao seu redor um campo magnético proporcional ao valor da corrente (IF - USP, 2012). Essa lei pode ser descrita pela equação:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{env} \quad (2.7)$$

A equação relaciona a corrente contínua que atravessa o circuito S e a circulação do campo \vec{B} criado pela corrente i_{env} , onde i_{env} é a soma das correntes, positivas e negativas, que atravessam o circuito e μ_0 é a constante de permeabilidade magnética do vácuo.

A lei de Ampere também é válida para correntes que variam no decorrer do tempo. Isso significa que o campo \vec{B} terá a mesma dependência temporal que i_{env} ao longo do caminho C . Por exemplo, se a corrente total i_{env} for:

$$i_{env}(t) = i_0 \sin(\omega t) \quad (2.8)$$

O campo \vec{B} ao longo do caminho C será:

$$\vec{B}(x, y, z, t) = \vec{B}(x, y, z) \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

Em outras palavras, se a corrente i_{env} aumenta de t_0 a t o campo \vec{B} aumentará proporcionalmente.

2.5 Corrente Alternada

A energia elétrica que chega para os consumidores é gerada em grandes usinas, as quais transformam outros tipos de energia em eletricidade. O processo inicia em uma turbina, a qual tem a função de converter alguma forma de energia, como cinética, térmica, nuclear ou outras, em energia mecânica. Ela é conectada ao eixo de uma máquina elétrica, chamada de gerador ou alternador, que é responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica, fornecendo em seus terminais uma tensão senoidal com determinada magnitude e frequência (Ninla Elmawati Falabiba, 2019).

A tensão senoidal fornecida nos terminais desses geradores produz uma corrente alternada (CA), que é uma corrente cujo sentido varia no decorrer do tempo. Esse comportamento oscilatório possui uma frequência que pode ser de 50Hz ou 60 Hz, a depender do país ou região. No Brasil, a frequência adotada é de 60Hz, isso significa que a corrente altera entre seu máximo positivo e seu máximo negativo 60 vezes por segundo.

2.6 Lei da Indução de Faraday

Pouco mais de uma década após a descoberta de Hans Christian Orsted sobre a produção de efeitos magnéticos por meio de correntes elétricas, o inglês Michael Faraday realizou experimentos que constatarem o efeito contrário, ou seja, a geração de correntes elétricas a partir da aplicação de campos magnéticos. Faraday concluiu que a variação do fluxo magnético que atravessa um circuito produz uma tensão elétrica, que, por sua vez, origina uma corrente elétrica induzida.

Pode-se expressar a Lei de Faraday por meio de grandezas de campo. Na Figura 1, o caminho C é orientado de acordo com a regra da mão direita e a força eletromotriz (fem) induzida no circuito refere-se ao trabalho que seria realizado pela força elétrica do campo induzido para

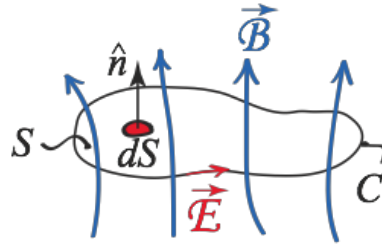


Figura 1 – Configuração de circuito para a lei de Faraday

transportar uma carga no percurso C, por unidade de carga.

$$fem = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.10)$$

Onde \vec{E} representa o campo elétrico no elemento $d\vec{l}$ do caminho. Assim, o fluxo enlaçado pelo caminho C é:

$$\psi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.11)$$

Com \vec{B} representando o vetor densidade de fluxo magnético aplicado ao circuito. A Lei de Faraday pode ser escrita na forma:

$$fem = -\frac{d\psi}{dt} \quad (2.12)$$

Ou da seguinte forma:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.13)$$

2.7 Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente são compostos por um conjunto de espiras colocadas ao redor de um condutor, a fim de medir a quantidade de corrente elétrica que passa pelo mesmo. Eles atuam como sensores de corrente não invasivos, pois não precisam estar diretamente conectados aos circuitos elétricos para realizar medições. Eles transformam valores de correntes elétricas em sinais analógicos de baixa voltagem por meio da indução eletromagnética.

O sensor possui uma bobina com um número específico de voltas, dependendo do modelo, que é chamada de enrolamento secundário. O enrolamento primário é o próprio condutor

monitorado. A corrente elétrica que passa pelo condutor primário gera ao redor do mesmo um campo magnético proporcional ao valor da corrente, que pode variar no tempo caso o condutor em questão esteja conectado a uma rede de corrente alternada. Pela Lei de Faraday, pode-se concluir que uma corrente alternada induzida proporcional ao valor da corrente no condutor principal será gerada. Essa corrente será inversamente proporcional ao número de espiras da bobina.

O artigo (PEREIRA *et al.*, 2019) aborda a implementação de um projeto que usa o transformador TA 12-100 para realizar a medição de corrente. O funcionamento do sensor está ilustrado na Figura 2.

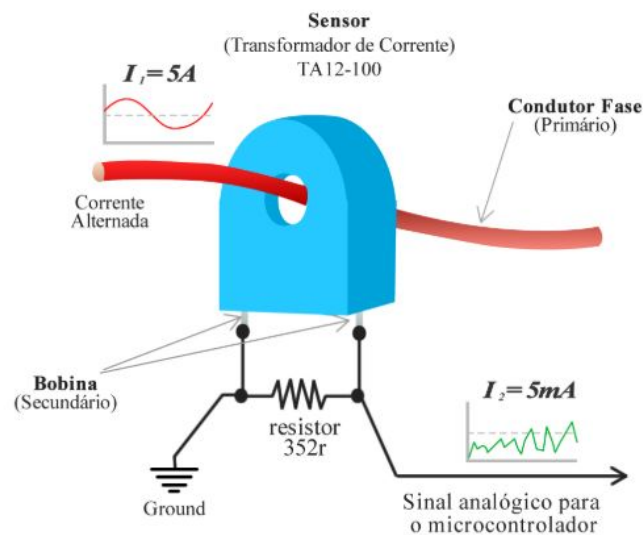


Figura 2 – Características do TA 12-100 (PEREIRA *et al.*, 2019)

O Módulo Sensor de Corrente Alternada TA 12-100 Não Invasivo é um componente voltado para medir corrente alternada (AC) de 0 A até 5 A sem a necessidade de abrir o circuito (não invasivo). A bobina do TA 12-100 possui 1000 voltas, ou seja, para cada 1 A no enrolamento primário uma corrente de 1 mA é induzida no enrolamento secundário. Um resistor de carga é conectado em paralelo à bobina do sensor para que seja possível medir o sinal em volts. Seu uso é ideal para monitoramento de equipamentos elétricos ou para montagem de circuitos de proteção contra sobrecarga.

2.8 Valor eficaz ou Tensão RMS

Em diversas situações na engenharia é preciso lidar com tensões ou correntes alternadas. Esses sinais variam de forma senoidal ao longo do tempo. Um exemplo bastante presente no cotidiano é a rede elétrica residencial, assim como também o rádio, a televisão e o celular.

Tensões alternadas ou tensões AC (*Alternating Current*) variam sua amplitude ao longo do tempo. O valor médio de uma tensão constante é seu próprio valor DC (*Direct Current*), já o valor médio de uma corrente senoidal é nulo. Graficamente, a tensão média pode ser representada pela área sob a curva, num intervalo de tempo t , dividido pelo período T (FERRÃO; CONTRERA, 2013). Para o sinal senoidal, T é o intervalo de repetição, também denominado de período. A figura 3 mostra a representação gráfica de um sinal de tensão constante e de um sinal de tensão senoidal ao longo do tempo. Assim, conclui-se que a tensão DC de um sinal senoidal é nula.

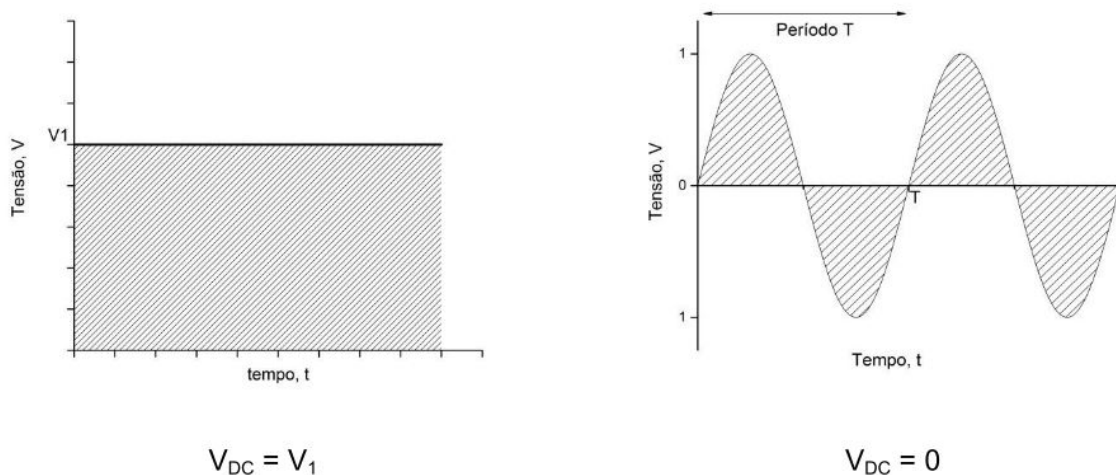


Figura 3 – Representação gráfica de tensão constante e tensão senoidal ao longo do tempo (FERRÃO; CONTRERA, 2013)

O valor eficaz ou a tensão RMS (*Root Mean Square*) de um sinal periódico no tempo é equivalente ao valor de uma tensão constante que produz a mesma dissipação de potência realizada pela tensão periódica. Também pode-se dizer que para uma corrente elétrica cíclica alternada, o valor RMS é igual ao valor da corrente contínua que produziria a mesma dissipação de potência média em uma carga resistiva (Arifin, 2018). A equação matemática para o cálculo

do valor eficaz (V_{ef}) de uma grandeza periódica $v(t)$ é dada por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 \dots V_n^2}{n}} \quad (2.14)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (2.15)$$

O valor RMS de um conjunto de valores é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores ou, para grandezas contínuas, o quadrado da função que define a forma de onda em questão. Além disso, o valor RMS de uma função contínua também pode ser calculado por meio do cálculo do RMS de uma sequência de amostras igualmente espaçadas (Arifin, 2018).

Em um sistema que utiliza energia alternada, os pontos máximos da crista da onda são chamados de corrente ou tensão de pico. Quando uma carga resistiva é conectada a esse circuito, nem toda essa tensão e corrente são absorvidos. Os valores absorvidos são os chamados valores eficazes. Assim, os valores mensurados por um multímetro, por exemplo, são os valores eficazes de corrente ou tensão, que podem ser calculados a partir do valor de pico segundo a equação:

$$V_{ef} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.16)$$

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.17)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho objetiva implementar um protótipo de *smart meter* para medição de corrente de forma não invasiva. O principal foco do projeto está na análise da eficiência do transformador de corrente como meio de medição no cenário de IoT, *Smart Home* e *Smart Meters*. Este capítulo aborda a descrição detalhada dos materiais e métodos utilizados durante o desenvolvimento do dispositivo.

3.1 Visão geral da arquitetura do sistema

A partir da pesquisa bibliográfica e da análise de trabalhos relacionados, foram definidas algumas funcionalidades mínimas que o protótipo deve possuir. São elas:

- Monitorar valores de corrente alternada de uma carga elétrica de forma não invasiva;
- Possuir comunicação sem fio bidirecional;
- Disponibilizar as informações provenientes do sensor em uma aplicação web;

A Figura 4 ilustra a visão geral da arquitetura do sistema e a Figura 5 demonstra a organização e a disposição dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento do protótipo.

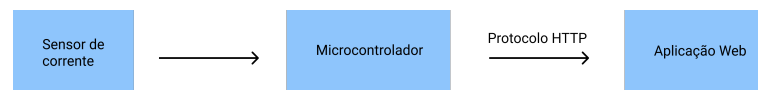


Figura 4 – Arquitetura geral do sistema

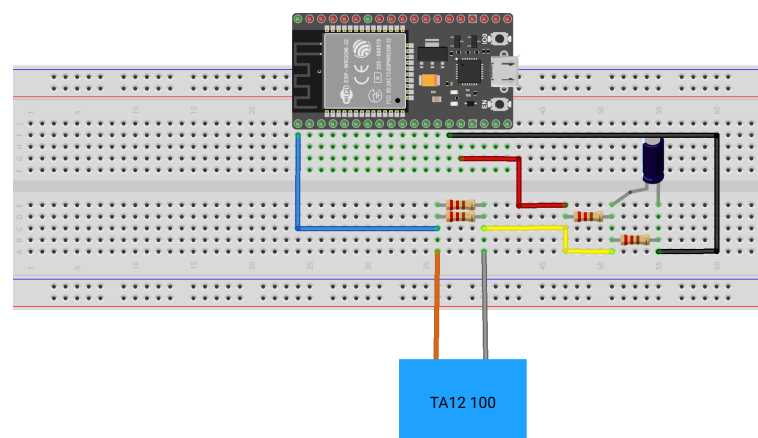


Figura 5 – Circuito completo do *Smart Meter*

Inicialmente, a corrente induzida nas bobinas do sensor será monitorada por meio da entrada analógica do NodeMCU. O sensor de corrente TA 12-100 é projetado para realizar leituras de corrente cujos valores variam de 0A a 5A. Como a entrada analógica apenas recebe valores

de tensão, um resistor de carga é colocado entre os terminais do sensor a fim de transformar os valores de corrente em valores de tensão. Esse resistor é escolhido de forma que a tensão máxima entre os terminais seja de 1,65V, pois a corrente alterna em torno de zero. Assim, o sinal na entrada analógica do dispositivo estará variando entre -1,65V e 1,65V.

O NodeMCU somente realiza leitura de valores de tensão positivos, por esse motivo um circuito de *offset* foi acrescentado. Ele funciona como uma bateria, que acrescenta 1,65V ao sinal, dessa forma ele varia entre 0V a 3.3V. As informações coletadas serão enviadas em tempo real para uma aplicação web, por meio da qual os usuários poderão monitorar os registros de consumo.

3.2 Implementação

O projeto é composto por duas partes: o *hardware* e o *software*. O NodeMCU foi programado em C# por meio da IDE do Arduino. Já o protótipo do *hardware* foi montado em uma protoboard. Os componentes utilizados na montagem estão listados na Tabela 2

Tabela 2 – Lista de componentes

Componente	Quantidade
NodeMCU 8266	1
Sensor TA 12-100	1
Capacitor 100 μF	1
Resistor 10k Ω	2
Resistor 470 Ω	2

Como mencionado anteriormente, o sensor TA 12-100 é projetado para mensurar correntes alternadas entre o intervalo de 0A a 5A. A corrente máxima de 5A é equivalente ao valor eficaz, ou seja, o real valor absorvido pelo circuito. Sabe-se que o valor RMS pode ser calculado pela equação:

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

Dessa forma, pode-se concluir que o valor da corrente de pico é:

$$I_{pico} = \sqrt{2} * i_{rms} = \sqrt{2} * 5A = 7,071A \quad (3.2)$$

De acordo com as especificações do sensor, para cada 1A percorrendo o condutor primário, 1mA será induzido nos terminais do condutor secundário, ou seja, nos terminais do sensor. Assim, é possível encontrar a quantidades de espiras no sensor por meio da equação:

$$I_p * N_p = I_s * N_s \quad (3.3)$$

$$1A * 1 = 1mA * N_s \quad (3.4)$$

$$N_s = 1000 \quad (3.5)$$

Onde, I_p é a corrente no condutor primário, N_p é o número de espiras do condutor primário e I_s e N_s referem-se, respectivamente, às mesmas grandezas, porém relacionadas ao condutor secundário. Conclui-se que o sensor possui 1000 voltas em sua espira.

É necessário calcular o número de voltas na espira do sensor para que seja possível encontrar o valor da corrente de pico induzida nos terminais do sensor. Essa corrente é inversamente proporcional ao número de voltas na espira, portanto:

$$I_s = \frac{I_p}{N_s} = \frac{7,071A}{1000} = 7,071mA \quad (3.6)$$

A partir desses cálculos encontra-se a forma de onda da corrente induzida nos terminais do sensor, ilustrada na Figura 6.

Os pinos de entrada de dados do NodeMCU realizam leituras de níveis de tensão que variam entre o intervalo de 0V a 3,3V. Por esse motivo é necessário converter o sinal de corrente alternada em níveis de tensão legíveis para o NodeMCU.

Um resistor de carga é colocado em paralelo aos terminais do sensor de corrente. A sua resistência foi escolhida de forma que o valor máximo de tensão seja 1,65 V, pois a corrente alterna em torno de zero. Utilizando a Lei de Ohm encontra-se o valor do resistor de carga ideal.

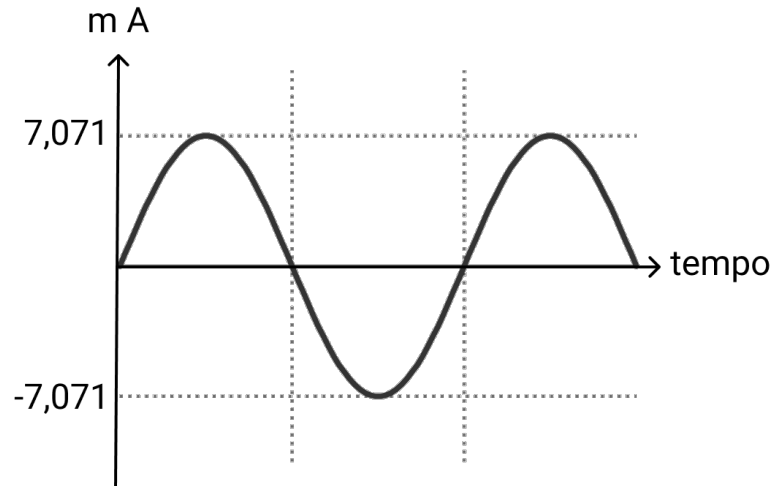


Figura 6 – Forma de onda da corrente induzida na saída do sensor

O resistor de carga ideal para correntes de, no máximo, 5A é de 233Ω , como demonstrado na equação abaixo.

$$R_{carga} = \frac{U_{sensor}}{i_{sensor}} = \frac{1,65}{7,071} \approx 233\Omega \quad (3.7)$$

Agora tem-se um sinal de tensão alternada oscilando entre -1,65V e 1,65 V. Os pinos de entrada do NodeMCU apenas realizam leituras de valores positivos e de, no máximo, 3.3V. Por essa razão um circuito de *offset* é montado de forma a acrescentar 1,65V ao sinal, dessa forma a entrada de dados no pino do NodeMCU passa a oscilar entre 0V e 3.3V.

Inicialmente um divisor de tensão é feito com a saída de alimentação do NodeMCU de 3.3V. Dois resistores de $10K\Omega$ são montados em série, de forma que a tensão de 3.3V é distribuída igualmente entre ambos. Posteriormente, um capacitor de $100\mu F$ foi conectado em paralelo ao resistor R_2 , como ilustrado na Figura 7. Esse circuito funcionará como uma bateria de 1,65V, valor que será somado ao sinal, resultando na forma de onda ilustrada na Figura 8.

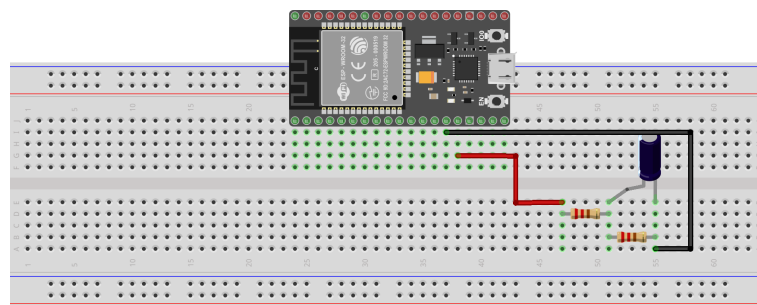


Figura 7 – Circuito de *offset*

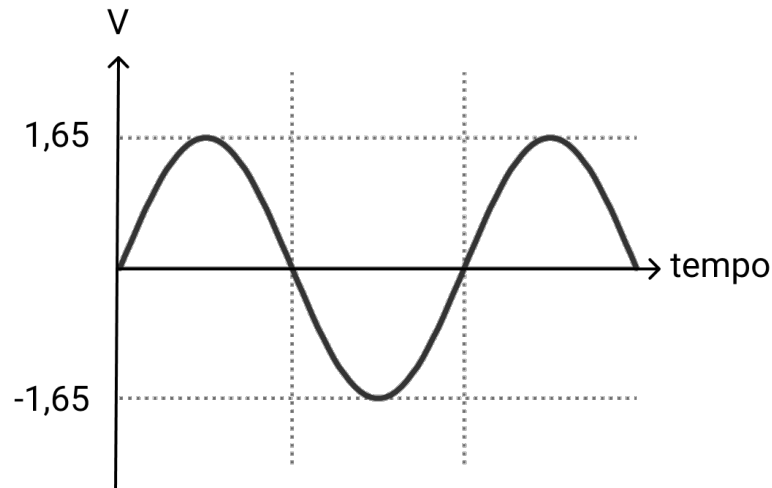


Figura 8 – Forma de onda da tensão nos terminais do sensor

O software implementado no NodeMCU realiza a rotina de leitura dos dados, cálculo da potência consumida e envio à plataforma de visualização. Para simplificar, o valor da tensão foi estabelecido como uma constante de 220V, conforme as especificações da rede elétrica do local onde foram realizados os testes. A potência, conforme demonstrado no capítulo anterior, representa a quantidade de energia consumida por uma carga e é definida como o produto entre a corrente e a tensão.

A leitura e o tratamento dos dados provenientes do sensor de corrente foram feitos com o auxílio da biblioteca Emonlib. Essa biblioteca é *opensource* e foi criada para auxiliar o desenvolvimento de projetos sobre eletricidade, eficiência energética e energias renováveis. Ela é mantida pela OpenEnergyMonitor, um projeto que comercializa unidades de monitoramento de eletricidade, temperatura e umidade baseadas em Arduino e Raspberry Pi, sendo também um projeto *open hardware*.

O NodeMCU envia os dados de consumo em tempo real para uma aplicação web por meio do protocolo HTTP. Essa aplicação web é chamada de ThingSpeak. Esse site é destinado para projetos de IoT, ele permite agregar, visualizar e analisar fluxos de dados em tempo real na *cloud*. Também permite a execução de códigos MATLAB para análise e processamento dos dados recebidos. Além disso, essa plataforma também pode ser usada para desencadear ações, a depender de situações específicas. Por meio dele será possível visualizar, em tempo real, o gráfico que representa o consumo energético em *watts*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo mostrar o protótipo desenvolvido e os resultados obtidos nos ensaios feitos para validação do mesmo.

4.1 Ensaios

Para realizar a validação do protótipo montado conforme especificado no capítulo anterior, foram feitos três ensaios, cada um com uma carga de prova diferente. As cargas foram escolhidas dentre eletrodomésticos e serão especificadas mais adiante. Os resultados obtidos pelo protótipo foram comparados com as leituras feitas por um multímetro, o qual foi inserido no circuito para tornar possível a validação dos dados.

A montagem do circuito foi feita de forma simples, em duas *protoboards* de 400 pontos, o circuito final pode ser visto na Figura 9, onde A representa o circuito de *offset*, B o sensor de corrente e C o circuito externo por onde a carga de prova é alimentada e a qual o sensor de corrente monitora.

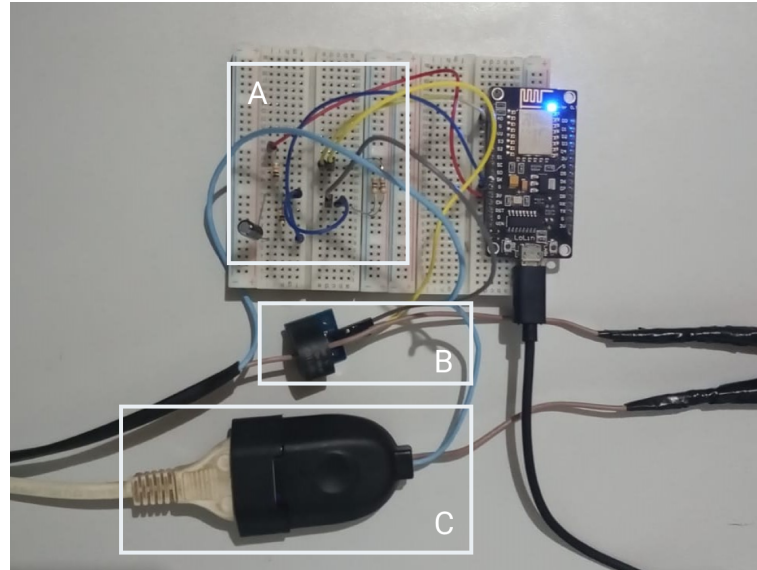


Figura 9 – Protótipo do projeto

4.1.1 Monitoramento de consumo

Conforme especificado nos capítulos anteriores, os dados de consumo serão enviados para uma plataforma web, por meio da qual os usuários poderão visualizar o histórico de consumo energético. No esquema demonstrado pela Figura 9, o ponto C indica um eletrodoméstico

conectado ao circuito de alimentação sendo monitorado pelo sensor. Os resultados de leituras são enviados para a plataforma ThingSpeak e exibidos para o usuário como demonstrado na Figura 10. Além da plataforma mencionada, existem outros sistemas que podem ser utilizados para armazenamento, processamento e exibição de dados como, por exemplo, o Google *Cloud IoT*¹, a Emoncms², a ThingWorx³, a Thinger.io⁴ e entre outros.



Figura 10 – Página Web exibindo os dados de consumo

O exemplo utilizado se trata de uma carga não linear, a qual também está sujeita a interferências provenientes de ruídos na rede, por esse motivo os valores podem mudar a cada segundo (Arifin, 2018).

4.1.2 Validação dos dados

Para avaliar a assertividade das informações obtidas por meio do *Smart Meter* foram realizados três ensaios. Os valores obtidos foram comparados com as leitura de um multímetro inserido em série com o circuito de alimentação da carga de prova. A fim de reproduzir o ambiente de uma rede residencial, as cargas de prova foram escolhidas entre eletrodomésticos, os quais têm suas especificações descritas a seguir.

A carga de prova utilizada no primeiro ensaio trabalha a uma tensão de 220V, com uma frequência de 60Hz e possui uma potência de 95W. Nesse ensaio o dispositivo apresentou uma taxa média de erro de 7,90%, os valores de cada amostra podem ser vistos na Tabela 3. O gráfico da Figura 11 demonstra a comparação entre os erros relativos de cada amostra coletada.

¹ <https://cloud.google.com>

² <https://emoncms.org>

³ <https://www.ptc.com/pt/products/thingworx>

⁴ <https://thinger.io>

Tabela 3 – Resultados do primeiro ensaio

Carga de prova 1		
Sensor	Multímetro	Erro relativo
0,27 A	0,291 A	7,22%
0,29 A	0,315 A	7,94%
0,31 A	0,339 A	8,55%

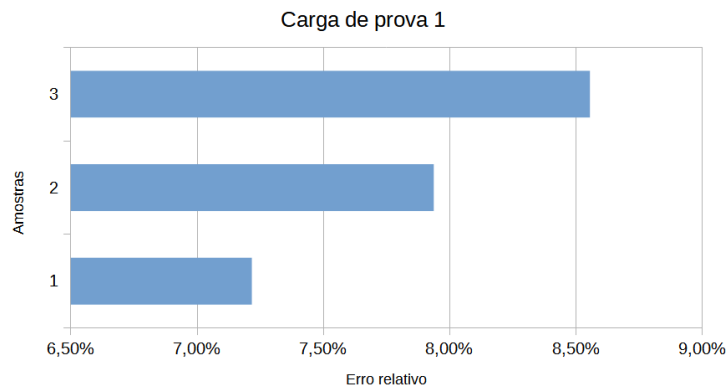


Figura 11 – Comparação entre os erros relativos de cada amostra da carga de prova 1

Tabela 4 – Resultados do segundo ensaio

Carga de prova 2		
Sensor	Multímetro	Erro relativo
0,85 A	0,928 A	8,41 %
1,07 A	1,174 A	8,86 %
0,62 A	0,662 A	6,34 %

O segundo ensaio teve como carga de prova um aparelho que pode trabalhar com tensões entre 110 e 230V, em frequências de 50 a 60Hz e possui uma potência que varia entre 42 a 46W. Nesse ensaio o dispositivo apresentou uma taxa média de erro de 7,87%, resultado que pode ser visto na Tabela 4. A comparação entre os valores percentuais de erros das amostras estão demonstrados no gráfico da Figura 12.

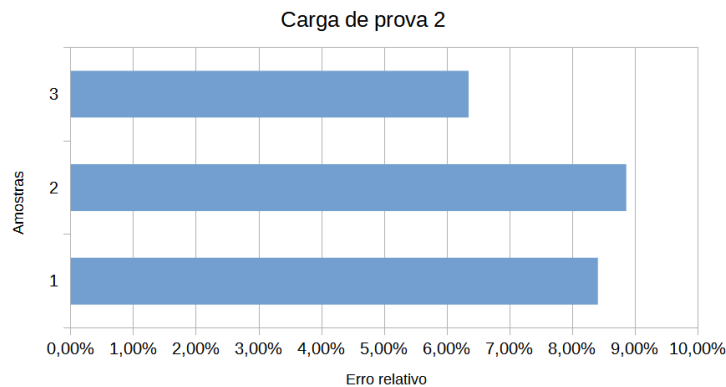


Figura 12 – Comparação entre os erros relativos de cada amostra da carga de prova 2

Tabela 5 – Resultados do terceiro ensaio

Carga de prova 3		
Sensor	Multímetro	Erro relativo
0,71 A	0,768 A	7,55 %
1,07 A	0,907 A	17,97 %
0,44 A	0,543 A	18,97 %

O último e terceiro ensaio teve como carga de prova um eletrodoméstico bivolt, ou seja, que pode ser conectado a redes de 110 ou 220V, em uma frequência de 60Hz e possuindo 45W de potência. O resultado desse ensaio está descrito na Tabela 5, o erro médio do *Smart Meter* foi de 14,83%. A Figura 13 demonstra o gráfico de comparação entre os erros de cada amostra coletada.

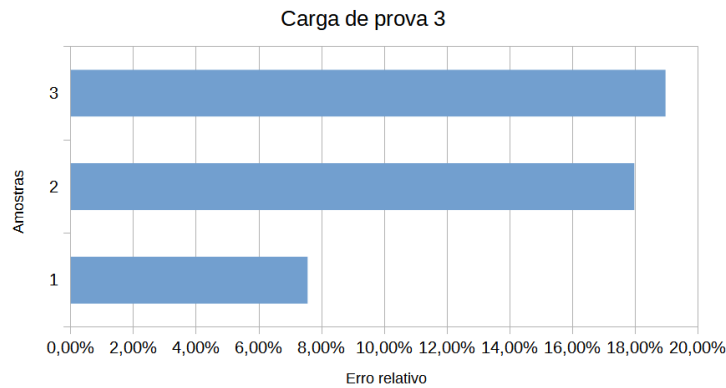


Figura 13 – Comparação entre os erros relativos de cada amostra da carga de prova 3

4.2 Conclusões

Este trabalho abordou o desenvolvimento de um protótipo de *Smart Meter* utilizando conhecimentos de protocolos de comunicação, eletrônica, programação e plataformas embarcadas. O protótipo foi submetido a ensaios com a finalidade de validar a confiabilidade e a eficiência do mesmo.

Um dos objetivos estabelecidos foi a construção de um dispositivo capaz de obter os valores de corrente elétrica da carga monitorada de forma a não precisar abrir o circuito, o que foi possível com o uso do sensor TA12 100. Também foi um dos objetivos disponibilizar os dados em tempo real em uma aplicação Web, isso foi possível por meio da placa de prototipação NodeMCU, que possui integração nativa com o módulo Wi-Fi ESP8266 e viabilizou o envio de dados diretamente para a plataforma ThingSpeak, por meio da qual os dados foram disponibilizados

para visualização.

Os resultados dos ensaios mostraram-se satisfatórios comparados às leituras realizadas com o multímetro, pois os dados obtidos com o sensor estavam próximos do valor real, apresentando uma taxa média de erro relativo de 10,21%.

Novas funcionalidades podem ser acrescentadas em trabalhos futuros, como a leitura do valor de tensão, pois a mesma pode variar devido a ruídos na rede, otimização na análise e exibição de dados, implementação de um sistema de alimentação para a plataforma embarcada, etc.

REFERÊNCIAS

- Arifin. MEDIDOR DO CONSUMO DE ENERGIA. **TCC - UFC Sobral**, v. 1, n. 1, p. 1–8, 2018. ISSN 09240136. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001>><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055>><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006>><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024>><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>><http://dx.doi.org/>.
- BISWAS, S. B.; IQBAL, M. T. Solar Water Pumping System Control Using a Low Cost ESP32 Microcontroller. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, IEEE, v. 2018-May, p. 1–5, 2018. ISSN 08407789.
- CARRATU, M.; FERRO, M.; PIETROSANTO, A.; PACIELLO, V. Smart Power Meter for the IoT. **Proceedings - IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2018**, p. 514–519, 2018.
- DAS, H.; SAIKIA, L. C. GSM enabled smart energy meter and automation of home appliances. **2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth, ICEPE 2015**, p. 0–4, 2016.
- ESP. ESP32 Series Datasheet. **Espressif Systems**, p. 1–65, 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>.
- FANG, X.; MISRA, S.; XUE, G.; YANG, D. Smart grid - The new and improved power grid: A survey. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012. ISSN 1553877X.
- FERNÁNDEZ, O.; KANG, S.; IKHSANTO, j. t. m. L. N.; ACEH, k. t. k. Desenvolvimento de Smart Meter integrado com IoT para monitoramento da energia elétrica em residências. v. 2017, n. 1, p. 1–9, 2020.
- FERRÃO, M. B. N. V. C.; CONTRERA, R. C. Medições de Grandezas Elétricas em Corrente Alternada (AC). p. 1–15, 2013.
- IF - USP. Lei de Âmpere. p. 1–4, 2012.
- KABALCI, Y. A survey on smart metering and smart grid communication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 57, p. 302–318, 2016. ISSN 18790690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.114>>.
- MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. **2017 Internet Technologies and Applications, ITA 2017 - Proceedings of the 7th International Conference**, p. 143–148, 2017.
- MANDHALA, V. N.; BHAGAVAN, K.; BABU, S. S.; ANANTHA, N. L. Advanced role of internet of things in the smart grid technology. **International Journal of Control Theory and Applications**, v. 9, n. 29, p. 175–179, 2016. ISSN 09745572.
- MÍNGUEZ, A. Medidores De Energia Ativa: Funcionamento, Práticas Usuais, Principais Ensaio E Análise Das Fraudes Mais Comuns. p. 80, 2007. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf>>

[//www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf%0Ahttp://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf](http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf%0Ahttp://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000368.pdf)>.

Ninla Elmawati Falabiba. **Circuitos de Corrente Alternada**. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 9781119130536.

PARIHAR, Y. S. Internet of Things and NodeMCU. **Jetir**, v. 6, n. 6, p. 1085–1088, 2019.

PEREIRA, R. S.; PEIXOTO, M. M. L.; JESUS, J. S.; BARBOSA, M. T. M.; BARROS, E. B. C. Energesis: Fog Smart Meter para Hospedagem Compartilhada. p. 208–221, 2019.

RAYES, A.; SALAM, S. **Internet of Things From Hype to Reality**. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 9783319995151.

SARJERAO, B. S.; PRAKASARAO, A. A Low Cost Smart Pollution Measurement System Using REST API and ESP32. **2018 3rd International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2018**, IEEE, p. 1–5, 2018.

SHARMA, K.; SAINI, L. M. Performance analysis of smart metering for smart grid: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 49, p. 720–735, 2015. ISSN 18790690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.170>>.

STUSEK, M.; POKORNY, J.; MASEK, P.; HAJNY, J.; HOSEK, J. A non-invasive electricity measurement within the smart grid landscape: Arduino-based visualization platform for IoT. **International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops**, v. 2017-Novem, p. 423–429, 2017. ISSN 2157023X.

TOZLU MURAT SENEL, W. M. S.; KESHAVARZIAN, R. B. L. A. Wi-Fi Enabled Sensors for Internet of Things : A Practical Approach. n. June, p. 134–143, 2012.

YOESEPH, N. M.; SAFI'IE, M. A.; PURNOMO, F. A. Smart Energy Meter based on Arduino and Internet of Things. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 578, n. 1, 2019. ISSN 1757899X.

ZHENG, J.; GAO, D. W.; LIN, L. Smart meters in smart grid: An overview. **IEEE Green Technologies Conference**, p. 57–64, 2013. ISSN 21665478.