

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
ISRAEL MARQUES TONELLI

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE ENERGIA
INTEGRADO À INTERNET DAS COISAS PARA GESTÃO PELO
LADO DA DEMANDA

ARARANGUÁ

2019

ISRAEL MARQUES TONELLI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE ENERGIA INTEGRADO À
INTERNET DAS COISAS PARA GESTÃO PELO LADO DA DEMANDA**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Engenheiro(a) de Energia.

Araranguá, 11 de julho de 2019.

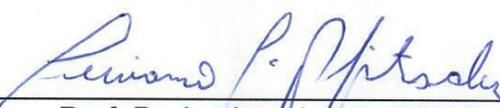
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (Orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. César Cataldo Scharlau
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher
Universidade Federal de Santa Catarina

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE ENERGIA INTEGRADO À INTERNET DAS COISAS PARA GESTÃO PELO LADO DA DEMANDA

Israel Marques Tonelli

RESUMO

Com o aumento populacional nos últimos anos, a crescente demanda de energia torna-se um desafio a ser superado, em especial pelo setor elétrico. Cada vez mais equipamentos são conectados à rede elétrica, e é necessário que o usuário final passe a consumir a energia elétrica de forma consciente. Uma das maneiras de promover esse consumo consciente é monitorar o consumo para avaliar o comportamento de consumo de forma que o mesmo possa consultar e tomar decisões sobre seus hábitos de utilização dos equipamentos elétricos baseado no seu comportamento de consumo. A popularização da *Internet das Coisas*, proporciona que objetos comuns do nosso cotidiano possam estar conectados entre si por meio da internet. Dessa forma, a disponibilização dos dados de consumo de energia pode ser feita em uma plataforma *online* com interface amigável e intuitiva para o consumidor. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo baseado em *Internet das Coisas* para a medição de consumo de energia elétrica de baixo custo, onde o usuário poderá acompanhar o seu consumo instantâneo, diário, semanal e mensal de energia elétrica.

Palavras-chave: Medidor de consumo. Internet das coisas. Eficiência energética.

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE ENERGIA INTEGRADO À INTERNET DAS COISAS PARA GESTÃO PELO LADO DA DEMANDA

Israel Marques Tonelli

ABSTRACT

With the population growth in recent years, the growing demand for energy becomes a challenge to be overcome, especially by the electricity sector. More and more equipment are connected to the grid, and it is necessary that the end user consume the electric energy in a conscious way. One way to promote this conscious consumption is monitoring consumption to assess consumer behavior. Thus, it is possible to consult and make decisions about habits of use of electrical equipment based on consumption behavior. The popularization of the Internet of Things provides that everyday objects of our daily life can be connected to each other through the internet. This way, the availability of energy consumption data can be done in an online platform with a user friendly and intuitive interface. This work presents the development of an Internet of Things based device for the measurement electricity consumption, which allows the supervision of the instantaneous, daily, weekly and monthly electricity consumption.

Keywords: Energy meter. Internet of Things. Energy Efficiency.

1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento de novas invenções e o aumento da capacidade de tecnologias já conhecidas, tornou-se possível que objetos comuns do nosso cotidiano se comuniquem entre si. Esse conceito de objetos conectados é conhecido por *Internet das Coisas*, ou *IoT* (do inglês *Internet of Things*). Segundo estatísticas, no ano de 2011, o número de usuários de internet ultrapassou os 2,2 bilhões (MUKHOPADHYAY; SURYADEVARA, 2014). Com a *Internet das Coisas*, o número de dispositivos conectados aumentará consideravelmente.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2018, o consumo nacional de eletricidade na rede foi de 467TWh em 2017, sendo que 29% deste total pertence à classe de consumo residencial, representando um aumento de 1,2% em relação ao ano de 2016. (Empresa de Pesquisa Energética, 2017).

A fatura de energia elétrica fornecida pela concessionária de energia ao final de um ciclo de tarifação (que dura em torno de um mês) mostrada na *Figura 1* é a forma convencional que o usuário tem a sua disposição para acompanhar seu consumo. Observa-se que há uma carência de informações, no documento fornecido para fins de tarifação. O único valor disponibilizado é o consumo total de energia mensal, permitindo apenas o reconhecimento de um padrão de uso ao longo de um ano, sem nenhuma informação de como a curva de carga se comporta em intervalos menores. Com um horizonte de tempo tão longo, o consumidor não consegue identificar a curto prazo quais as ações ele precisa tomar para a redução do seu consumo.

Figura 1- Exemplo de fatura de energia elétrica. Fonte: Adaptado de Celesc Distribuição S.A (2019).



Um dos avanços na tecnologia dos últimos tempos foi o desenvolvimento dos *Smart Meters*, ou medidores inteligentes, que, ao invés de apenas apresentarem leituras do consumo acumulado da energia, também podem apresentar os dados de consumo em tempo real e com precisão, além de diferentes períodos e diferentes bandeiras tarifárias. Os consumidores poderão se beneficiar decidindo o quanto de energia irão consumir e fazendo uma escolha ótima desse consumo (ZHOU, et al., 2010).

Dentre os principais benefícios dos medidores inteligentes estão: a disponibilidade de informações sobre o consumo de energia, a fim de atingir incentivos financeiros ou aprimorar a sustentabilidade e a economia de energia, e a possibilidade de avaliar e controlar os medidores remotamente, permitindo que as concessionárias de energia reduzam custos operacionais e o erro humano durante o processo de leitura dos medidores (AVANCINI, 2019).

O surgimento dos *Smart Meters* tornou possível que os consumidores tenham o poder de decisão para racionalizar o uso de energia, provocando a mudança na curva de carga, sem que isso comprometa seu nível de conforto ou que seja preciso deixar de lado as suas preferências de consumo. A implementação dessas ações de Gestão pelo Lado da Demanda traz benefícios como a redução da conta de energia elétrica, redução da carga na rede durante os períodos de pico e o uso racional da energia (SANTO et al., 2018).

A diminuição no consumo residencial de energia elétrica adiará, ou até mesmo, evitaria a necessidade de expansão no sistema elétrico de potência, cuja sobrecarga é um ponto crítico para a operação. O sistema elétrico de potência está sujeito a vulnerabilidades de agentes externos, e à demanda do próprio sistema que, combinados, podem levar à falha em cascata. A falha em cascata é um processo sequencial de desconexão de elementos do sistema de potência, como geradores, linhas de transmissão e cargas, levando a um *blackout* parcial ou até mesmo total. Essas falhas impactam significativamente nos cidadãos, negócios, economia e agências governamentais (VYAKARANAM, et al., 2017).

Iniciativas de eficiência energética que visam a redução do consumo, podem também adiar a construção de novas unidades de geração. Dessa forma, além de uma redução da necessidade de investimentos, é possível obter uma redução na emissão dos gases do efeito estufa que seriam emitidos por essas usinas, supondo a expansão ocorra por meio de usinas baseadas em insumos não renováveis. Para combater a mudança climática, o Painel Intergovernamental Para a Mudança Climática (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) calcula que a emissão de gases do efeito estufa no setor energético deve ser reduzidas em 90%, comparadas às emissões de 2010, entre os anos de 2040 e 2070 (WERFF; THOGERSEN; BRUIN, 2018).

Com base neste contexto, este trabalho possui como objetivo propor um medidor de energia de baixo custo e complexidade que possibilite a visualização dos dados de consumo em tempo real, a fim de responder a seguinte pergunta de pesquisa: medidores inteligentes de energia de baixo custo e complexidade podem auxiliar na melhor visualização e acompanhamento do consumo de energia?

A seguir é apresentado o referencial teórico que embasa a elaboração deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os temas mais relevantes para a compreensão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2.1 Eficiência Energética

Segundo Hordeski (2004), a eficiência é descrita como a efetividade de um dispositivo que opera em ciclos ou processos. Para Reis e Roméro (2012), a eficiência energética passou a ter relevância somente após o primeiro choque do petróleo, em 17 de outubro de 1973. Antes disso, a preocupação e políticas públicas desenvolvidas para disciplinar o consumo de energia eram insuficientes. Esse evento colocou a geração de energia a partir de fontes renováveis em destaque nacional. Porém, seus custos de implantação ainda eram altos e, como uma solução rápida, visualizou-se o uso racional de energia no Brasil.

Já a nota técnica DEA 14/10, que trata da Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências (Empresa de Pesquisa Energética, 2010), define o conceito como a relação entre a quantidade de energia utilizada e aquela disponível para a sua realização.

Por trás das iniciativas multibilionárias para a introdução dos *smart meters* em residências da Europa, EUA, Canadá, Nova Zelândia e Austrália está a premissa de que fornecer o *feedback* em tempo real sobre o consumo de energia irá motivar as pessoas a reduzi-lo. Basicamente, o termo *feedback* neste caso refere-se ao fornecimento de informação sobre a quantidade de energia que uma unidade consome em um dado período de tempo (BUCHANAN; RUSSO; ANDERSON, 2014).

Segundo Ehrhardt-Martinez et Al (2010), estima-se que se programas residenciais bem concebidos forem implantados por todo os EUA, o equivalente a 100 bilhões de kWh de energia seria economizado anualmente até 2030. Em média, a economia varia de 4 a 12% entre as amostras dos estudos analisados. A maneira na qual os dados de consumo são

fornecidos faz com que as pessoas entendam melhor sua conta de energia, engajando-as e motivando-as a agir em prol da redução.

Ehrhardt-Martinez et Al (2010) destaca ainda que diferentes tipos de *feedback* parecem ser mais efetivos que outros, gerando uma maior economia de energia. Os estudos analisados pelo autor sugerem que o *feedback* diário ou semanal e o *feedback* em tempo real com informações complementares, como fornecimento de informações úteis e não apenas o consumo total de energia, são os que tendem a gerar as maiores reduções de consumo por unidade.

O tipo de programa de economia também influencia diretamente na redução do consumo: enquanto programas que focam em diminuir a demanda máxima de energia e deslocá-la para outras horas do dia atingem uma economia de 3%, os programas voltados para a redução do consumo e eficiência energética, de uma maneira geral, atingem uma economia média de 10%.

Para a coleta dos dados de consumo de energia dos consumidores, dados os quais são utilizados também como base para a atuação dos programas de redução de consumo de energia, é necessário o uso dos medidores de energia.

2.2 Medidores De Energia

A rede elétrica convencional possui uma comunicação unidirecional, onde o fluxo de informações se desloca dos medidores para as companhias de distribuição, e o fluxo de energia se desloca das geradoras para as unidades consumidoras. Essa falta de flexibilidade limita a rede de reagir a eventuais falhas e de aproveitar oportunidades, como por exemplo o redirecionamento do excedente de energia para um local com uma demanda maior (LO; ANSARI, 2011).

Dentre os tipos de medidores de energia elétrica, o medidor eletromecânico é o mais comum deles. Seu princípio de funcionamento é baseado na passagem da energia medida por duas bobinas que produzem um fluxo magnético em um disco metálico. Este disco gira em uma velocidade proporcional ao fluxo de energia e o número de voltas é contabilizado por um registrador mecânico para fins de tarifação da energia (HAMBLEY, 2011).

De acordo com Avancini (2019), por ser um sistema eletromecânico, é necessário que o consumo de energia seja lido manualmente com a periodicidade com a qual deseja-se fazer a cobrança pelo consumo. Já os seus sucessores foram desenvolvidos sem partes móveis, utilizando apenas componentes eletrônicos. Na medida em que a tecnologia evoluiu,

novas funcionalidades puderam ser adicionadas, permitindo que os medidores se tornassem “inteligentes”, dando início aos medidores inteligentes, do inglês *smart meters*.

Ainda segundo Avancini (2019), dentre os benefícios providos pelos *smart meters* estão: a) a disponibilidade da informação de consumo para os usuários permite que eles adaptem seu consumo de energia a fim de atingir incentivos econômicos ou melhorar a sustentabilidade e a economia de energia; b) a possibilidade de avaliar e controlar os medidores remotamente permite que as concessionárias de energia reduzam custos operacionais e o erro humano na leitura dos medidores; e c) o sistema reduz as perdas de energia já que ele pode ser automatizado para reagir a curtos-circuitos, falhas e excessos, redirecionando o fluxo de potência para onde é mais necessário.

Portanto, a disponibilidade dos *smart meters*, pode trazer benefícios para todo o sistema elétrico, notificando as concessionárias de energia em caso de falhas e fazendo uso das circunstâncias favoráveis para um despacho econômico ótimo. A comunicação bidirecional é a principal funcionalidade que os *smart meters* trazem para as redes elétricas (LO; ANSARI, 2011).

A medição do consumo de energia e a disponibilização desses dados para análise, possibilita a aplicação de estratégias que influenciam os consumidores na redução do consumo, a chamada gestão pelo lado da demanda.

2.3 Gestão pelo Lado da Demanda

O Gerenciamento pelo Lado da Demanda, GLD (DSM, do inglês *Demand Side Management*) é constituído por estratégias de planejamento e implementação de ações das concessionárias de energia elétrica destinadas a influenciar os consumidores a fim de produzir alterações desejadas na curva de carga (GELLINGS, 1985).

Para Gellings (1996), as principais estratégias de GLD são: gerenciamento de carga, conservação estratégica, eletrificação, geração de energia pelo lado do consumidor, substituição de equipamentos ineficientes e estratégias para o crescimento da participação no mercado.

De acordo com o mesmo autor, a GLD permite um melhor aproveitamento dos recursos existentes, incluindo os ambientais, tornando possível postergar ou até mesmo evitar a necessidade de novos investimentos em infraestrutura para a geração e distribuição de energia elétrica, possibilitando assim uma significativa economia (GELLINGS, 1996).

Nesse cenário de gestão pelo lado da demanda, onde o usuário precisa ter o controle de quando e como utilizar suas cargas, ter à sua disposição todas as informações sobre o seu

uso de energia é de suma importância para que ele possa reavaliar e mudar seus hábitos de consumo a fim de atingir reduções de demanda e na fatura. Para isso, é necessária a popularização dos *smart meters*, capazes de mostrar o consumo de energia em tempo real para que o usuário tenha o poder de tomar decisões sobre o uso de eletricidade (como é o caso do GLD indireto), ou até mesmo enviar um sinal para um sistema de automação residencial capaz de interromper cargas não importantes no momento (que é o caso do GLD direto).

2.3.1 GLD direto

Os programas de GLD direto, são aqueles que possibilitam o controle direto da carga do consumidor. Em um sistema de GLD direto, o operador da rede, ou terceiros, possui controle direto sobre uma única carga, porém altamente significativa. Este controle pode ser realizado de duas formas: automatizado ou por meio da solicitação do operador do sistema ao consumidor para que seja realizada a redução de carga (IFLAND; EXNER; WESTERMANN, 2016).

2.3.2 GLD indireto

Ifland, Exner e Westermann (2011) definem programas de GLD indireto como aqueles que procuram mudar hábitos de consumo por meio de esforços de *marketing*, campanhas educacionais e sinal de preço. A ideia básica do GLD indireto é motivar os consumidores a alinhar o seu consumo de energia à fatores como preço e geração renovável. Um grande exemplo é o mercado livre de energia, onde grandes empresas compram sua energia diretamente de comercializadoras. Caso essas empresas compradoras não consigam alinhar o seu consumo à energia contratada, elas terão uma forte motivação financeira para controlar o seu uso.

Os consumidores cativos, por sua vez, também podem se beneficiar dessa volatilidade de preços do mercado de energia. Neste caso, a negociação não é realizada diretamente com as unidades geradoras, mas sim, adequando o seu consumo aos postos tarifários vigentes.

Uma forma de proporcionar aos consumidores a visualização dos dados de consumo próprio de energia é disponibilizá-los na Internet para acesso a qualquer hora e qualquer lugar. Hoje, com o uso e a popularização da *Internet das Coisas* isso se torna possível.

2.4 Internet das Coisas

Mukhopadyay (2014) descreve *Internet das Coisas* como “a comunicação entre todos os objetos físicos”, onde a comunicação que já acontece entre máquinas, e entre pessoas e computadores, se estenderá a outros objetos. Segundo o mesmo autor, termo “*Internet das coisas*” foi proposto por Kevin Ashton em 1999, mas o desenvolvimento do conceito tecnológico foi introduzido pela primeira vez pelo departamento de ciência da computação da Carnegie Mellon University, onde os alunos conectaram à internet uma máquina de venda automática de refrigerantes (CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, 2014).

A *internet das coisas* não se aplica somente aos equipamentos eletrônicos como os aparelhos celulares, tablets e notebooks que costuma-se utilizar e já possuem uma tecnologia embarcada bastante avançada. Também se aplica a coisas comuns, como comida, roupas, mobília, equipamentos industriais, obras de arte, monumentos e todo o tipo de objeto que se possa imaginar (GUANG; LOGENTHIRAN; ABIDI, 2017).

As aplicações para a *internet das coisas* atingem os mais diversos setores. Na agroindústria, é possível monitorar em tempo real o estado do solo em plantações, condições atmosféricas, localização e condições de transporte de alimentos, estado do produto e sua demanda em prateleiras de supermercados e muitas outras aplicações (TALAVERA et al., 2017).

Na área médica, a *Internet das Coisas* está presente no monitoramento de sinais vitais de pacientes, diagnóstico via amostras de sangue, e até mesmo no monitoramento de fatores de risco de doenças crônicas (KIM; KIM, 2018).

Os *wearebles* (dispositivos “vestíveis”) vem ganhando popularidade e funcionalidades como o monitoramento de índices de performance como distância percorrida em circuitos de corrida e batimentos cardíacos para praticantes de esportes (YILDIRIM; ALI-ELDIN, 2018).

No âmbito da eficiência energética, dentre as inúmeras possibilidades, a funcionalidade com enfoque neste texto é para o monitoramento do uso de energia em um circuito monofásico.

2.5 Transformador de Corrente

Um transformador de corrente é um transformador de instrumentação o qual possui como função, reproduzir em seu circuito secundário uma tensão ou corrente proporcional à corrente elétrica aplicada no circuito primário, mantendo uma proporção e uma relação de

fase preservada. Nos transformadores de corrente, o enrolamento primário é ligado em série com o circuito de alta tensão. Assim, a impedância do circuito primário deverá ser desprezível se comparada à impedância do sistema (NBR 6546).

Neste trabalho, o transformador utilizado é composto por um núcleo dividido, o qual possui um núcleo basculante com o propósito de facilitar o enlaçamento do condutor primário a ser medido.

Figura 2 - Transformador de corrente de núcleo bipartido. Fonte: YHDC



Além do transformador de corrente, neste trabalho foi utilizado um transformador de potencial para a redução da tensão da rede a um nível que pudesse ser medido pelo dispositivo.

2.6 Transformador de Potencial

Assim como o transformador de corrente, o transformador de potencial é um equipamento destinado à instrumentação. Seu enrolamento primário é ligado em paralelo com o sistema a que se deseja fazer a medição e o enrolamento secundário é conectado equipamento que fará a medição do sinal de tensão.

Figura 3 - Transformador de potencial. Fonte: Unitel



Quanto ao tipo construtivo, o transformador de potencial utilizado neste trabalho é classificado como transformador de potencial indutivo, o qual é semelhante a um transformador de força, porém conectado a pequenas cargas.

3 DISPOSITIVO MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA

Para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso foi proposta a montagem do medidor de energia *OpenSource* do projeto *Open Energy Monitor* (OpenEnergyMonitor, 2019). O dispositivo mais básico disponível utiliza um Arduino Uno R3, transformador de corrente e transformador de potencial. Porém, com os testes em bancada após realizar a primeira montagem os resultados não foram satisfatórios, Por isso, houve a necessidade de adaptar o projeto, adicionando um conversor analógico-digital para aumentar a resolução de leitura.

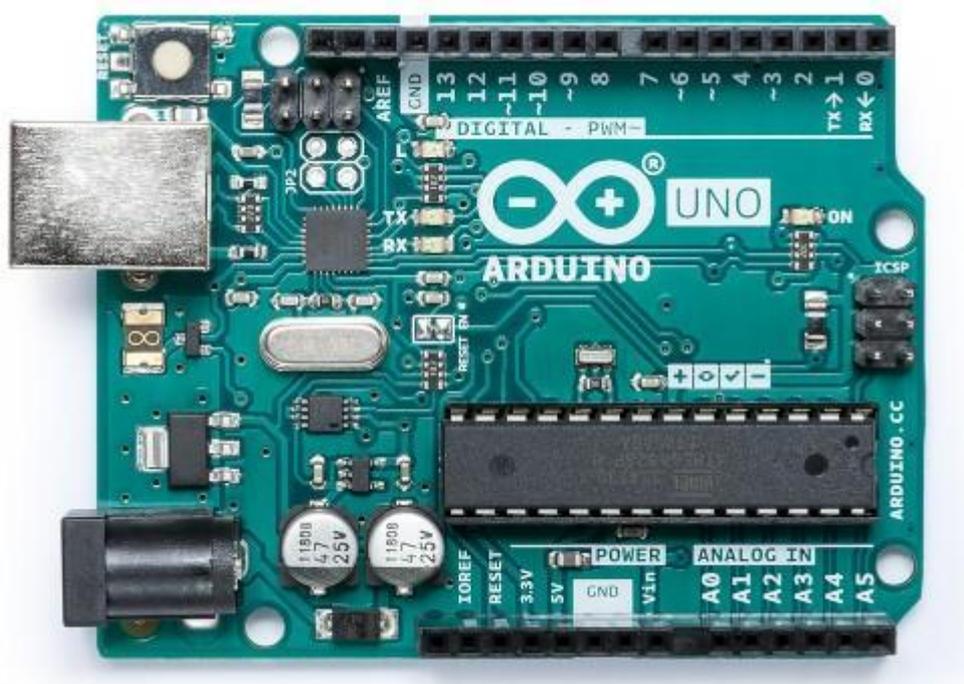
3.1 Visão Geral Do Projeto

Neste trabalho, como ferramentas para o desenvolvimento do instrumento de medição de consumo de energia, utilizou-se a plataforma de prototipagem Arduino Uno R3, o microcontrolador NodeMCU e o conversor analógico-digital ADS1115. A seguir, essas ferramentas são apresentadas detalhadamente.

3.1.1 Arduino Uno R3

De acordo com o *site* oficial, o Arduino (Figura 4) é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* baseada em *hardware* e *software* de fácil utilização. A plataforma foi concebida por Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, e David Mellis no *Interaction Design Institute of Ivrea*, no início dos anos 2000, como uma ferramenta fácil voltada para estudantes sem um conhecimento prévio em eletrônica e programação.

Figura 4 - Arduino Uno Rev 3. Fonte: Arduino Store



O Arduino Uno utilizado neste trabalho é composto por uma placa baseada no microcontrolador ATmega328P, que possui 14 pinos de entrada/saída (6 deles podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal de quartz de 16MHZ, conexão USB e entrada para alimentação externa (Arduino, 2018).

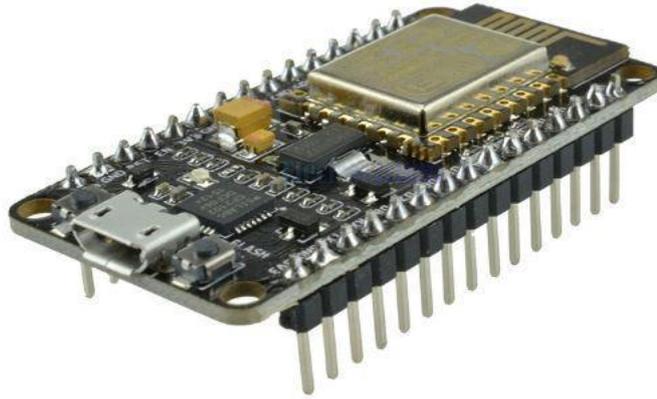
A placa foi selecionada devido ao número de entradas analógicas oferecidas, e a resolução de 10bits do seu conversor analógico-digital.

3.1.2 ESP8266

O NodeMCU (Figura 5) é um microcontrolador, baseado no chip ESP8266, que possui 11 portas de entrada/saída digital, conexão com *Wireless* padrão 802.11 b/g/n, suporta

até 5 conexões TCP/IP e apresenta um conversor analógico-digital integrado. Porém o conversor possui apenas uma entrada analógica. Esta placa foi selecionada devido à sua função de conexão a redes de internet *Wireless*.

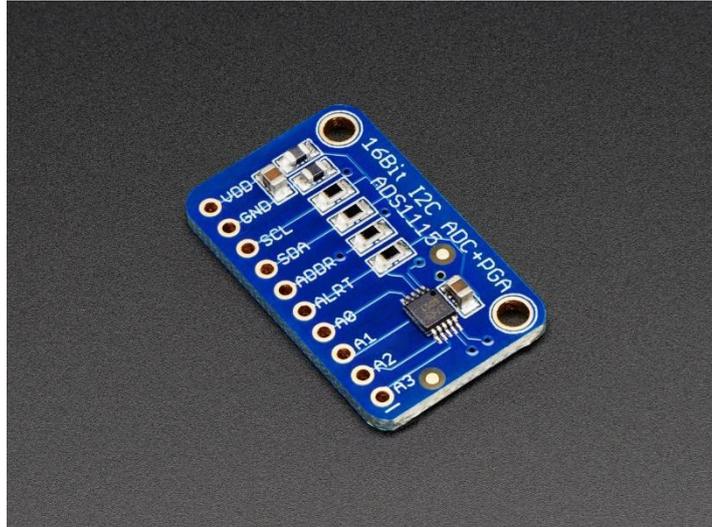
Figura 5 - ESP8266 NodeMCU. Fonte: ESPRESSIF Systems



3.1.3 Conversor Analógico-Digital ADS1115

O ADS1115 é um conversor analógico-digital (ADC – *analog to digital converter*) com resolução de leitura de 16bits e compatível com o protocolo de comunicação I²C (*inter-integrated circuit*). O componente faz conversões a uma taxa de 860 amostras por segundo com baixo consumo de energia (corrente de alimentação de 150 μ A e tensão de 2.0V a 5,5V) (Texas Instruments, 2018).

Figura 6 - Conversor analógico digital ADS1115. Fonte: Adafruit (2018)

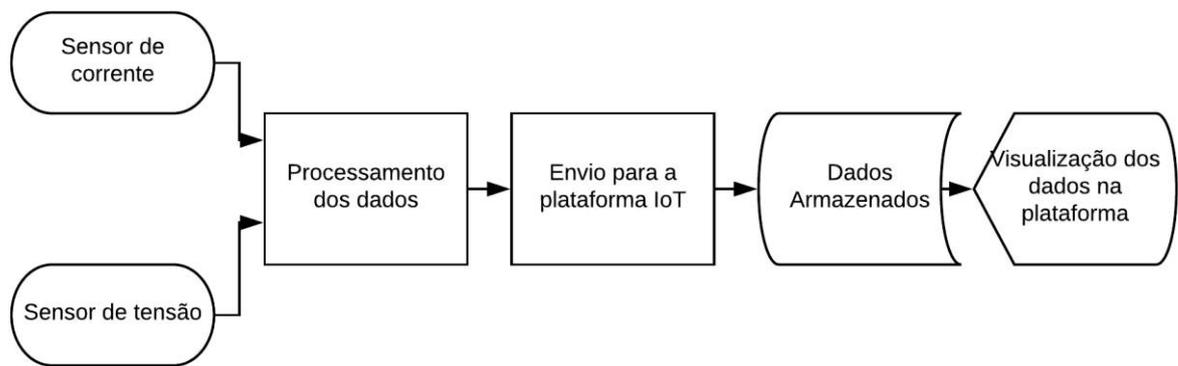


Para este trabalho, este conversor foi selecionado porque possui uma resolução de 16 bits, superior aos 10 bits do conversor integrado do Arduino.

3.2 Metodologia de Desenvolvimento do Projeto

O dispositivo a ser desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso, é composto por duas partes. A primeira parte é formada por componentes que fazem a medição dos dados de tensão e corrente. A segunda parte realiza a aquisição, executa o processamento dos dados obtidos e estabelece a comunicação com a plataforma IoT, a qual armazenará e disponibilizará os dados ao usuário. O funcionamento do dispositivo descrito está ilustrado por meio do diagrama de blocos do processo da Figura 7.

Figura 7 - Diagrama em blocos do processo. Fonte: Autor (2019).



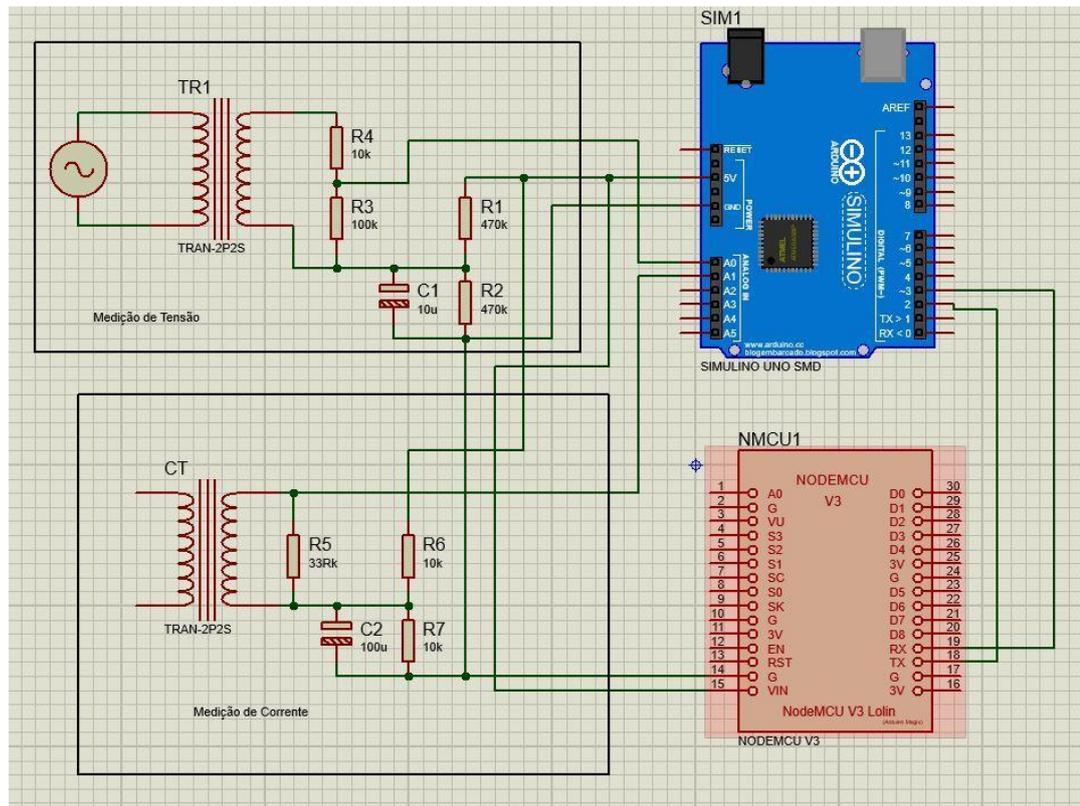
3.3 Desenvolvimento do Medidor

No processo de montagem do medidor, observou-se que a resolução do conversor analógico-digital do Arduino Uno R3 não era suficiente para realizar a medição quando a corrente elétrica que circulava pelo circuito primário do transformador de corrente era muito inferior ao valor máximo da sua faixa de operação. Por isso, uma adaptação foi feita e um segundo protótipo foi confeccionado.

3.3.1 1º Protótipo

No período de concepção do medidor, a topologia inicial (Figura 8) tinha como base dois principais componentes: um Arduino UNO R3, como unidade microcontrolada capaz de fazer a aquisição dos dados fornecidos pelo circuito de tratamento dos dados, e um NodeMCU (ESP8266), que é um microcontrolador capaz de conectar-se às redes de internet sem fio, servindo como um gateway entre a medição e a plataforma online de visualização dos dados.

Figura 8 - Esquemático do primeiro protótipo no software Proteus. Fonte: Autor (2019).



Ao executar a montagem da primeira versão do medidor em uma *protoboard*, foi observado que os valores lidos nos testes de bancada não correspondiam com os valores esperados. Quando foi realizado o teste com pequenas cargas (valores inferiores a 40W, como um ferro de solda), os valores medidos possuíam um alto nível de imprecisão, devido à baixa resolução do conversor analógico digital embarcado no Arduino, que possui apenas 10 bits. Esta resolução faz com que o valor a ser medido seja dividido em 2^{10} (1024) valores, tornando a menor divisão de leitura insuficiente quando o transformador de corrente (que possui faixa de utilização de 0 a 100A) opera em correntes baixas.

Buscando alternativas para contornar a baixa resolução do conversor ADC do Arduino, surgiu a possibilidade de utilizar um conversor analógico-digital externo com uma resolução maior. Os 16 bits (65.536 valores) do ADS1115 seriam suficientes para atender ao projeto, pois com um conversor externo estava eliminada a necessidade de utilizar o Arduino em paralelo com o NodeMCU, centralizando todo o processamento de dados e comunicação com a plataforma IoT no segundo microcontrolador, tornando o protótipo mais compacto.

3.3.2 2º Protótipo

Com a aquisição dos componentes necessários para a segunda versão do protótipo, foi iniciada a montagem em uma *protoboard*. O medidor (tabela 1) possui duas principais partes (Figura 9): o circuito para a aquisição dos dados, que é composto de um transformador de corrente de núcleo bipartido em paralelo a um resistor *shunt*, e um transformador de potencial para reduzir o nível de tensão da rede (220Vca ou 127Vca) a um valor menor (9Vca) que conectado a um divisor de tensão. Os sinais de tensão aplicados no resistor *shunt* pelo transformador de corrente e o da tensão resultante do divisor de tensão estão diretamente ligados ao conversor analógico-digital.

Tabela 1 - Componentes utilizados na segunda versão do protótipo

Item	Valor(R\$)
01 NodeMCU	26,90
01 Conversor analógico-digital ADS1115	39,90
01 Transformador de corrente	44,90
01 Transformador de potencial (127/220Vca para 9Vca)	15,00
01 Placa fenolítica perfurada universal (7x5cm)	2,90
01 Barra de pinos fêmea	2,50
01 Resistor 330Ω ±5%	0,05
01 Resistor 10kΩ ±5%	0,05
01 Resistor 22kΩ ±5%	0,05
Total	132,25

Fonte: Autor (2019)

Figura 9 - Esquemático do segundo protótipo no software Proteus. Fonte: Autor (2019).

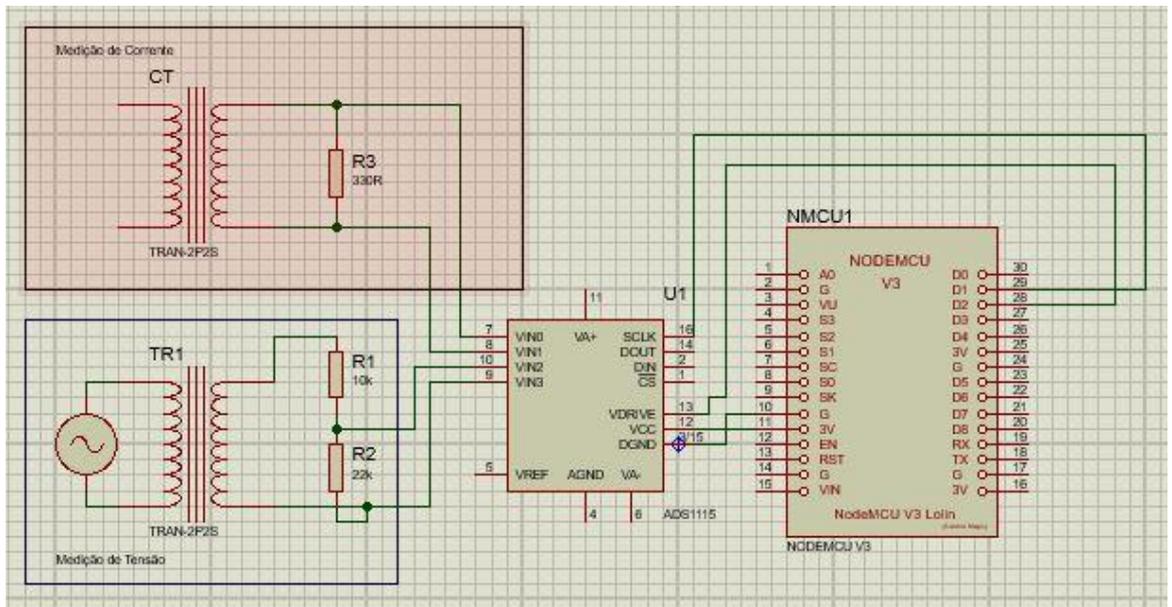
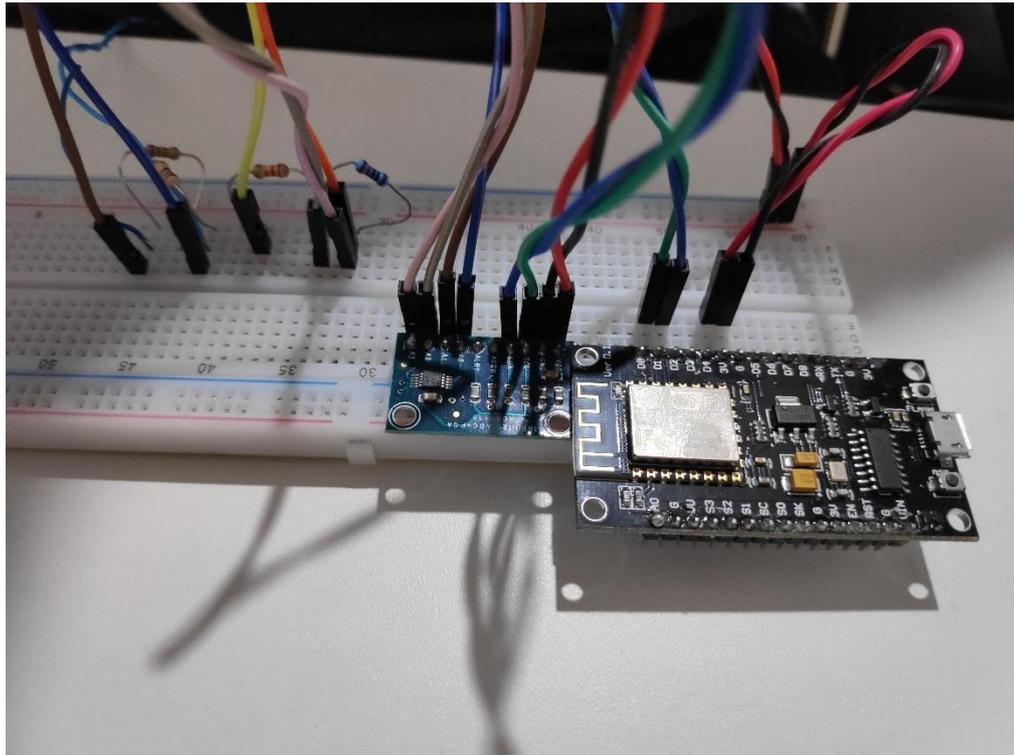


Figura 10 - Montagem do segundo protótipo em uma protoboard. Fonte: Autor (2019).



Cada medição realizada pelo protótipo está conectada a dois canais do ADS1115 operando no modo diferencial, sendo um deles para a componente negativa da senoide e outro para a componente positiva, utilizando todos os 4 canais que o conversor possui. O modo diferencial realiza a leitura dos dados de dois canais e uma medição relativa entre eles.

A escolha do modo diferencial ocorreu com a finalidade de simplificar a medição da componente negativa da senoide e otimizar a resolução de leitura, utilizando 16 bits (65.536 divisões de valores), tanto para a componente positiva quanto para a negativa, totalizando 131.072 divisões para a onda completa, fazendo com que o protótipo seja capaz de detectar pequenas mudanças nos valores de tensão e corrente.

Caso o modo diferencial não fosse utilizado, seria necessário adicionar um offset à leitura de tensão a fim de eliminar valores negativos, devido à incapacidade do microcontrolador de ler e processar diretamente os valores negativos.

3.3.2.1.1 Processamento dos dados

Segundo o Manual de Tarifação de Energia elaborado pela Eletrobras (2011), os consumidores do grupo B são tarifados com base no consumo de energia ativa. Portanto, ao implantar um medidor, ainda que para fins de informar ao consumidor sobre o seu uso de energia, é necessário que o mesmo seja capaz de medir os valores de potência ativa. Para

isso, é necessário que medidor utilize os valores RMS (raiz quadrática média ou valor eficaz, do inglês *root mean square*) de tensão e corrente para realizar o cálculo do valor de energia ativa.

O conversor analógico-digital é capaz de apenas medir o valor instantâneo de tensão e corrente. Para a obtenção do valor eficaz, é preciso que sejam utilizadas múltiplas amostras consecutivas destes valores instantâneos em um dado intervalo de tempo. Com essas amostras, chegamos no valor RMS por meio da Equação 1 e da Equação 2, onde $u(n)$ e $i(n)$ são os valores instantâneos de tensão e corrente respectivamente, e N é o número de amostras.

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} u^2(n)}{N}} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} i^2(n)}{N}} \quad (2)$$

Para a medição da potência ativa, foi utilizada a Equação 3. A potência ativa é calculada de forma simples como a média de N produtos entre a tensão e a corrente. Este método é válido tanto para ondas senoidais quanto ondas distorcidas (ATMEL Corporation, 2013).

$$P \equiv \frac{1}{N} \int_{n=0}^{N-1} u(n) \times i(n) \quad (3)$$

3.3.2.1.2 Testes em bancada

Os testes em bancada foram realizados em uma rede monofásica de 127V, utilizando alguns equipamentos resistivos de pequena e média potência, como: ferro de solda (34 Watts), pistola de cola quente (25 Watts) e um ferro de passar roupas (1000Watts). As medições em bancada com cargas conhecidas estavam de acordo com as leituras realizadas em um multímetro *True RMS* calibrado (Minipa ET-1639).

Após os testes em bancada com o protótipo montado em uma *protoboard*, o mesmo foi transferido para uma placa perfurada universal (Figura 11 e Figura 12), a fim de tornar as conexões elétricas mais confiáveis, evitando problemas como o mau contato, por exemplo. Com isso, foi possível manipular o protótipo com mais segurança, sem que houvesse desconexão de componentes e que o mesmo pudesse ser instalado em um quadro elétrico para a validação dos dados.

Figura 11 - Vista superior do segundo protótipo em uma placa perfurada. Fonte: Autor

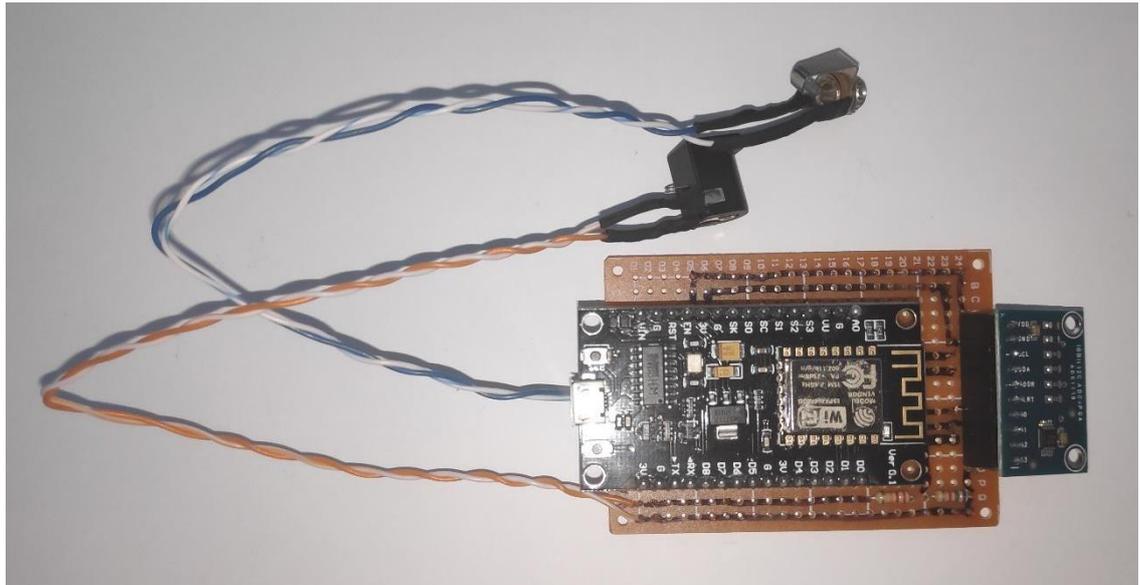
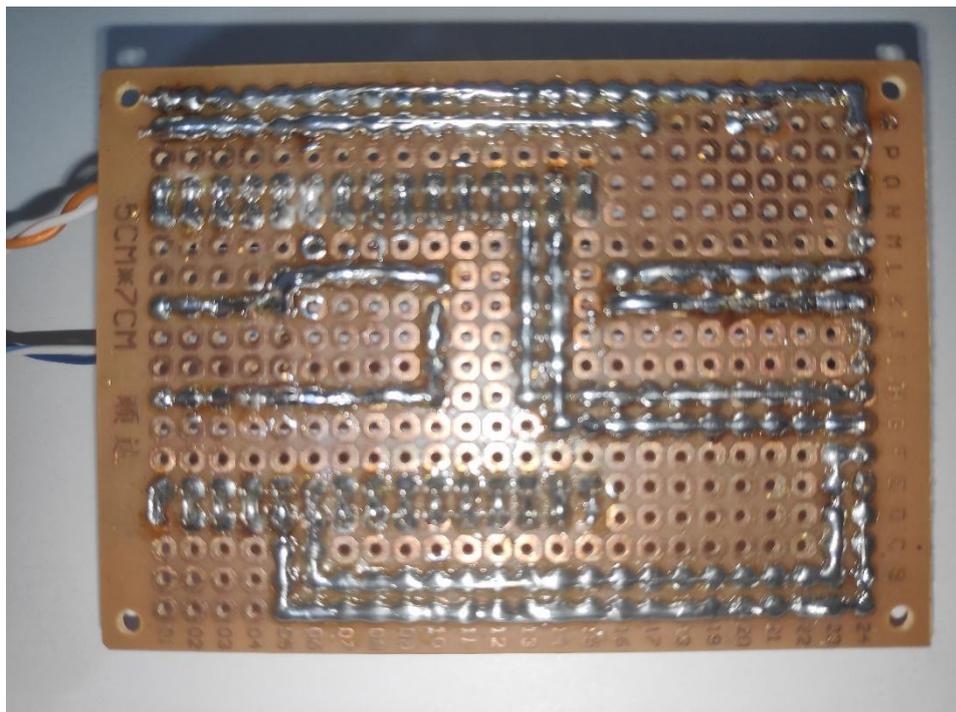


Figura 12 - Vista inferior do segundo protótipo em uma placa perfurada. Fonte: Autor



Como complemento para trabalhos futuros, foi previsto um circuito de retificação do sinal de tensão para que o mesmo pudesse ser utilizado para alimentar o equipamento, cujo funcionamento é com corrente contínua. Os testes em bancada mostraram que é possível utilizar o circuito de medição de tensão como fonte para o protótipo. Porém, o transformador disponível para tal possui uma baixa capacidade de potência, fazendo com que houvesse uma queda de tensão prejudicial à medição quando utilizado para alimentar o medidor. Optou-se

por utilizar uma fonte externa (5 Vdc/2,4 A) para dar continuidade ao projeto, deixando em aberto a utilização de um transformador com uma potência maior para trabalhos futuros que unifiquem a medição e a alimentação do protótipo.

Figura 13 - Vista superior do circuito retificador em uma placa perfurada. Fonte: Autor.

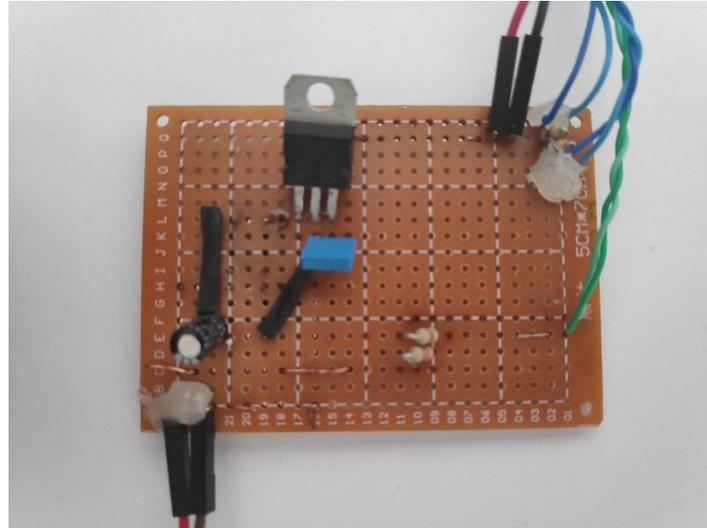
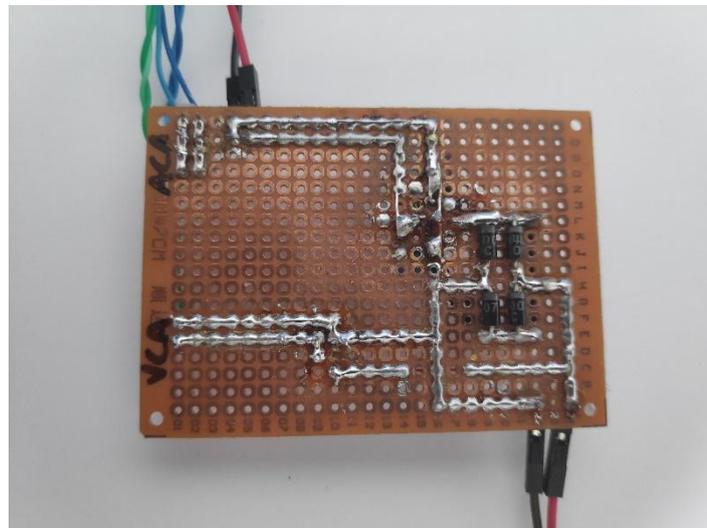


Figura 14 - Vista inferior do circuito retificador em uma placa perfurada.



A calibração do protótipo foi realizada após a montagem em placa perfurada padrão com todos os componentes já instalados, pois o valor real de componentes como resistores, diferem em até 5% (valor de tolerância fornecido por fabricantes de resistores) do valor nominal entre unidades de um mesmo lote. Portanto o processo foi efetuado já com os componentes finais soldados à placa. Esta diferença entre o valor real e o nominal não apresenta nenhuma penalidade ao projeto, desde que a calibração seja realizada com base no

sistema finalizado. Em eventuais trocas de componentes, mesmo em caso de substituição por um componente com o mesmo valor nominal, se faz necessária uma nova calibração.

Para a calibração do medidor, foi realizado um processo iterativo de ajuste via *software* do parâmetro de tensão, realizando a leitura em diferentes horas do dia em que tensão da rede elétrica oscilava em torno do valor nominal. Utilizando a leitura do multímetro, foi possível comparar e ajustar o valor de tensão medido pelo protótipo. Com a medição de tensão já calibrada, foi realizado o ajuste da medição de corrente comparando o valor medido com o valor de corrente esperado quando as cargas de teste eram submetidas à tensão da rede elétrica.

Após a calibração do dispositivo utilizando o console do ambiente de programação do microcontrolador, o mesmo estava apto a enviar os dados para uma plataforma de *Internet das coisas*.

3.3.2.1.3 Escolha da plataforma IoT

Para o armazenamento e disponibilização dos dados para o usuário, foi escolhida a plataforma *ThingSpeak* criada pela *MathWorks*, empresa desenvolvedora do software *MATLAB*.

O *ThingSpeak* é uma plataforma IoT que permite ao usuário armazenar, visualizar e analisar dados diretamente na nuvem. Para isso, primeiramente a plataforma IoT recebe os dados enviados pelo dispositivo por meio de uma mensagem via HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*). No protocolo HTTP a comunicação é realizada por meio da interação entre um cliente e um servidor, onde um deles (geralmente o cliente) faz uma requisição e servidor retorna uma resposta de confirmação de recebimento (Mozilla Foundation, 2018).

Com o recebimento dos dados enviados pelo medidor, por meio de gráficos personalizados, a plataforma *ThingSpeak* permite a visualização e análise dos dados em tempo real. O acesso à plataforma se dá por meio de qualquer navegador web com acesso à internet. A visualização dos dados pode ocorrer de duas formas: privada ou pública. No formato privado, somente um usuário com permissão pode acessar as informações, enquanto que no formato público qualquer usuário com o endereço tem acesso às visualizações pré-definidas pelo administrador do sistema.

A plataforma *ThingSpeak* possui compatibilidade com o *MATLAB*, ferramenta à qual é amplamente utilizada pela comunidade acadêmica, pois permite que o usuário escreva e execute códigos para pós-processamento de dados, visualizações e análises (*MathWorks*,

2019). Esta funcionalidade será importante para trabalhos futuros que tenham como base o presente documento.

Além do processamento dos dados executado de forma integrada pelo MATLAB diretamente na plataforma, o usuário também pode fazer o *download* em um arquivo em formato CSV (Comma Separated Value), que pode ser visualizado e manipulado no MS Excel ou processado por um script em Python, onde existem diversas funcionalidades e bibliotecas específicas para *Data Science*. A função do pós-processamento dos dados é transformar os “dados brutos” em informações úteis que auxiliem o usuário na tomada de decisões. No caso específico do protótipo do presente texto, é possível definir a curva de carga, análise de demanda de energia e até mesmo previsão de consumo se utilizados algoritmos de inteligência artificial como, por exemplo, redes neurais artificiais.

4 VALIDAÇÃO E RESULTADOS

Para a validação do medidor, o mesmo foi instalado em um quadro elétrico para realizar a medição de um circuito com alimentação monofásica de 127V. Para comparação, os valores obtidos foram comparados com um multimedidor de grandezas elétricas da KRON, modelo Mult-K Grafic (*Figura 15*). O Mult-K Grafic é um medidor versátil utilizado em diversas aplicações. Porém, para acessar os seus dados, o usuário precisa navegar por seu display de LCD acoplado, ou utilizar um *software* fornecido pelo fabricante, conectando-se a ele por meio de um cabo de rede *Ethernet* ou um sistema com interface RS-485.

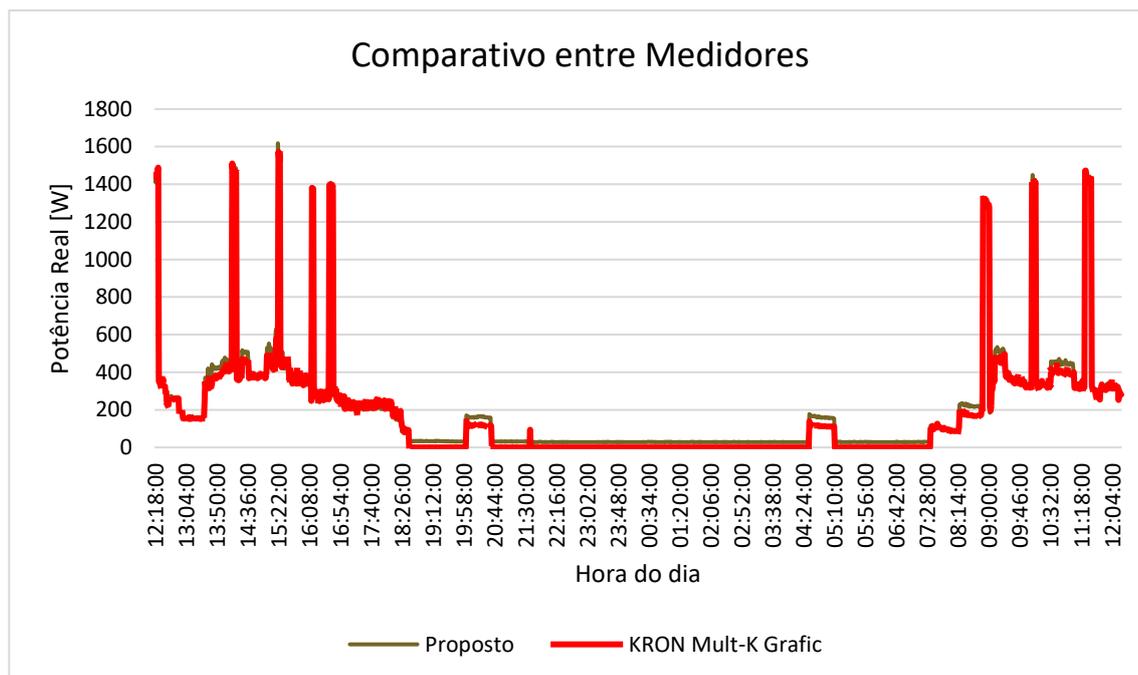
Figura 15 - Multimetro KRON Mult-K Grafic. Fonte: KRON Medidores (2019)



O quadro elétrico em que os medidores foram instalados estão localizados no escritório da empresa Petinelli Inc, sediada na cidade de Curitiba – PR. A Petinelli Inc foi escolhida como local para medição devido ao fato do autor, no momento da conclusão do presente trabalho, estar realizando o estágio curricular na empresa, e que a mesma possui um sistema de medição avançada em todos os circuitos. As cargas ligadas na instalação são as mais variadas, de luminárias dimerizáveis a um sistema de condicionamento de ar centralizado de grande capacidade. Por ser um escritório com vários dispositivos chaveados eletronicamente, as senóides estão sujeitas a distorções harmônicas que prejudicam a medição em um dispositivo com uma baixa taxa de amostragem, como é o caso do dispositivo proposto.

O comparativo entre os valores de potência medidos pelos dois dispositivos é mostrado na *Figura 16*. Os medidores foram instalados e realizaram a medição por um período de 24 horas de um dia típico de atividades no escritório. No circuito medido, estavam conectadas algumas cargas como notebooks, monitores e uma chaleira elétrica.

Figura 16 - Gráfico comparativo entre o medidor proposto e o de referência



O comparativo mostra uma semelhança entre as duas curvas apresentadas pelos medidores. Os horários em que os picos de consumo acontecem coincidem e a variação em sua magnitude é inferior a 5%. Para o funcionamento em uma faixa de menor valor, o erro percentual médio é de até 10%. Isto ocorre devido a diversos fatores, dentre eles a imprecisão do transformador de corrente utilizado em ambos os medidores, a presença de distorções harmônicas que prejudicam a leitura no medidor proposto e os diferentes intervalos de integração. Os diferentes intervalos de integração ocorrem, pois, o medidor KRON Mult-K Grafic mostra o valor instantâneo a cada 1 minuto e o medidor proposto realiza esse cálculo a cada 20 segundos. Assim, foi necessário um pós-processamento dos dados para calcular a média das amostras por minuto e manter a taxa de amostras.

Apesar da pequena diferença entre os valores lidos, a informação mostrada é mais que suficiente para que o usuário possa acompanhar o seu consumo em tempo real com uma precisão adequada para auxiliá-lo na tomada de decisão referente aos seus hábitos de consumo.

A plataforma *IoT* (Figura 17) permite que o consumidor possa verificar o seu uso de energia instantaneamente ao longo do tempo por meio de gráficos, permitindo o entendimento de forma intuitiva e o reconhecimento de padrões de consumo que se repetem no decorrer do tempo.

Figura 17 - Plataforma ThingSpeak mostrando os dados de consumo em tempo real



Além disso, a utilização do dispositivo proposto neste trabalho, pode ser ampliada para outros fins, como por exemplo:

- Levantamento de curva de carga e histórico de tensão e corrente de um circuito elétrico;
- Estimativa de consumo para rateio de uso de energia, como por exemplo em edifícios corporativos onde diferentes pavimentos são sublocados para diferentes clientes;
- Monitoramento de funcionamento de motores, a fim de identificar uma variação anormal de seus valores nominais de corrente. Um exemplo deste caso, são os ventiladores de renovação de ar de edifícios onde há um aumento da corrente elétrica quando os filtros de ar estão saturados e/ou obstruídos;
- Utilizar múltiplos dispositivos para monitorar circuitos distintos e realizar um diagnóstico de eficiência energética, entendendo melhor a representatividade de cada um dos sistemas (iluminação, tomadas ou ar condicionado) no uso da energia de uma edificação.

5 CONCLUSÃO

Gerenciar o consumo de energia em uma residência é um grande desafio, principalmente quando não há dados suficientes para embasar a tomada de decisão. O consumidor pode optar por não utilizar determinadas cargas ou até mesmo realocá-las em outra hora do dia. Mas para isso o consumidor precisa possuir informações detalhadas e quase em tempo real sobre o seu consumo. O presente trabalho propõe a utilização de um medidor de energia elaborado pelo projeto *Open Energy Monitor* como uma alternativa de baixo custo e com uma confiabilidade aceitável para a aplicação proposta.

Apesar do nível de precisão não ser adequado para fins de tarifação, o consumidor consegue ter uma boa noção do seu uso de energia acessando a plataforma *IoT* por meio de um computador ou *smartphone* conectados à internet. A frequência na qual os dados são disponibilizados na plataforma é bem menor quando comparada à tarifa mensal de energia, possibilitando uma detecção de anomalias nos hábitos de consumo, como uma lâmpada esquecida acesa, banhos de longa duração, equipamentos ligados sem necessidade e outros.

Espera-se que futuros trabalhos, utilizem o protótipo proposto para expandir os estudos sobre o tema. Por ser um projeto *opensource*, o medidor pode ser adaptado e ter novas funcionalidades adicionadas. Como sugestão estão o processamento dos dados em tempo real para previsão de demanda e estudo da curva de carga, utilização das saídas/entradas digitais do microcontrolador para participação em um programa de resposta à demanda, personalização de uma plataforma *IoT* com uma interface ainda mais amigável ao usuário e que expanda a quantidade de informações disponibilizadas, dentre outras.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.** *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 5 - Sistemas de medição.*
- Arduino.** 2018. Arduino.cc. [Online] 2018. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- ASHTON, Kevin. That 'Internet of Things' Thing. *Rfid Journal*, 2009.
- ATMEL Corporation.** 2013. *Atmel AVR465: Single-Phase Power Meter Application Note*. San Jose, CA : s.n., 2013.
- AVANCINI, Danielly B. et al. Energy meters evolution in smart grids: A review. **Journal Of Cleaner Production**, v. 217, p.702-715, abr. 2019.
- BRAGA, Nina Bordini. *Gerenciamento pelo lado da demanda em áreas residenciais*. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- BUCHANAN, Kathryn; RUSSO, Riccardo; ANDERSON, Ben. Feeding back about eco-feedback: How do consumers use and respond to energy monitors?. **Energy Policy**, v. 73, p.138-146, out. 2014. Elsevier BV.
- Carnegie Mellon University.** 2014. The "Only" Coke Machine on the Internet. Acesso em: https://www.cs.cmu.edu/~coke/history_long.txt.
- EHRHARDT-MARTINEZ, Karen, et al. 2010. Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities. **American Council for an Energy-Efficient Economy**. Washington, D.C : s.n., 2010. pp. 1-128.
- Eletrobras.** 2011. *Manual de Tarificação da Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, 2011.
- Empresa de Pesquisa Energética.** 2018. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018: Ano base 2017*. Ministério de Minas e Energia. Brasília:Ministério de Minas e Energia, 2018
- Empresa de Pesquisa Energética.** 2010. *Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências*. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2010.
- Empresa de Pesquisa Energética.** 2017. *Caderno de Demanda de Eletricidade*. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2017.
- Empresa de Pesquisa Energética.** 2018. *Balanço Energético Nacional*. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2018. p. 1-294.
- GELLINGS, C. W.. The concept of demand-side management for electric utilities. **Proceedings Of The Ieee**, v. 73, n. 10, p.1468-1470, 1985. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- GELLINGS, Clark W. Then and now. **Energy Policy**, v. 24, n. 4, p.285-288, abr. 1996. Elsevier BV.

GONÇALVES, Renato Masago. *Guia de projeto para subestações de alta tensão*. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

GONZÁLEZ, Gustavo A. Jiménez; ROSILLO, Víctor M. Larios. Study and deployment of sensor networks and the internet of things in the GLD smart city. **2015**. Guadalajara, 2015, **IEEE-GLD CCD Smart Cities White Paper**, p. 1-4.

GUANG, Nicholas Liew Long; LOGENTHIRAN, Thillainathan; ABIDI, Khalid. Application of Internet of Things (IoT) for home energy management. **2017 Ieee Pes Asia-pacific Power And Energy Engineering Conference (appec)**, [s.l.], p.1-8, nov. 2017. IEEE.

HAMBLEY, Allan R. *Electrical Engineering: Principles and Applications*. s.l.: Apprentice Hall, 2011. Vol. II.

HORDESKI, Michael F. *Dictionary of Energy Efficiency Technologies*. 1ª. Lilburn : The Fairmont Press, Inc, 2004.

HURTADO, Jhonier Lopez; MURILLO, Juan Camilo Arias; SALAZAR, Edwin Andrés Quintero. *Medidor electrónico interactivo de consumo de energía eléctrica para uso residencial*. Prospect, Vol. 14, 2016, p. 61-72.

IFLAND, Mike; EXNER, Nadine; WESTERMANN, Dirk. Appliance of Direct and Indirect Demand Side Management. **IEEE 2011 EnergyTech**. Maio de 2011, p. 1-6.

KIM, Suwon; KIM, Seongcheol. User preference for an IoT healthcare application for lifestyle disease management. **Telecommunications Policy**, v. 42, n. 4, p.304-314, maio 2018. Elsevier BV.

LO, Chun-hao; ANSARI, Nirwan. The Progressive Smart Grid System from Both Power and Communications Aspects. **Ieee Communications Surveys & Tutorials**, p.799-821, 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

MathWorks. MathWorks Documentation Home. *MathWorks*. Acesso em: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/mqtt-basics.html>.

Mozilla Foundation. An Overview of HTTP. *Mozilla.Org*. Acesso em: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Overview>.

MQTT.org. Frequently Asked Questions. *MQTT*. Acesso em: <http://mqtt.org/faq>.

MUKHOPADHYAY, Subhas Chandra; SURYADEVARA, Nagender K. Internet of things: Challenges and opportunities. In: **Internet of Things**. Springer, Cham, 2014. p. 1-17.

POCERO, Lidia *et al*. Open source IoT meter devices for smart and energy-efficient school buildings. **HardwareX**, v. 1, p.54-67, abr. 2017. Elsevier BV.

SANTO, Katia Gregio di et al. Active demand side management for households in smart grids using optimization and artificial intelligence. **Measurement**, v. 115, p.152-161, fev. 2018. Elsevier BV.

TALAVERA, Jesús Martín et al. Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. **Computers And Electronics In Agriculture**, v. 142, p.283-297, nov. 2017. Elsevier BV.

Texas Instruments. 2018. Datasheet: ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860-SPS, 16-bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator. Acesso em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

VYAKARANAM, Bharat *et al.* A study of the impact of peak demand on increasing vulnerability of cascading failures to extreme contingency events. **IEEE Power & Energy Society General Meeting**, p.1-5, jul. 2017. IEEE.

WERFF, Ellen van Der; THOGERSEN, John; BRUIN, Wandi Bruine de. Changing Household Energy Usage: The Downsides of Incentives and How to Overcome Them. **Ieee Power And Energy Magazine**, v. 16, n. 1, p.42-48, jan. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

YILDIRIM, Huseyin; ALI-ELDIN, Amr M.t. A model for predicting user intention to use wearable IoT devices at the workplace. **Journal Of King Saud University - Computer And Information Sciences**, p.1319-1578, mar. 2018. Elsevier BV.

ZHOU, Long; XU, Fang; MA, Ying-nan. Impact of smart metering on energy efficiency. **2010 International Conference On Machine Learning And Cybernetics**, p.3123-3128, jul. 2010.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Elyseu e Jucélia, e minha irmã Bruna, que sempre me apoiaram e me incentivaram a seguir em frente.

À minha namorada Karen por todo o carinho, compreensão e apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador Giuliano Arns Rampinelli e coorientador Leonardo Elizeire Bremermann que foram fundamentais para a elaboração do presente trabalho.

Aos meus amigos de infância pela compreensão nos momentos de ausência, e aos amigos que a universidade me proporcionou: Rodolfo, Breno, Hanna, Alex, Jaqueline, Simone, Tatiana e Kamille, cujo companheirismo foi um dos principais motivadores durante a graduação. Obrigado pelos convites aceitos e pelos recusados.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pelo ensino e todo o conhecimento proporcionado.

E por fim, agradeço à Petinelli, que proporcionou meu início de carreira no mercado de trabalho e também disponibilizou o espaço físico e equipamentos para a validação dos resultados.