



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE DO CAMPUS ARARANGUÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Eliel Marcos Rocha Romancini

**Desenvolvimento de Smart Meter integrado com IoT para monitoramento da
energia elétrica em residências**

Araranguá
2020

Eliel Marcos Rocha Romancini

Desenvolvimento de Smart Meter integrado com IoT para monitoramento da energia elétrica em residências

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.
Orientador: Prof. Fabrício De Oliveira Ourique, Dr.

Araranguá
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Romancini, Eliel Marcos Rocha

Desenvolvimento de Smart Meter integrado com IoT para monitoramento da energia elétrica em residências / Eliel Marcos Rocha Romancini ; orientador, Fabrício de Oliveira Ourique, 2020.

38 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Computação, Araranguá, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Smart Meter. 3. IoT. 4. sistemas embarcados. 5. redes sem fio. I. Ourique, Fabrício de Oliveira. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Computação. III. Título.

Eliel Marcos Rocha Romancini

Desenvolvimento de Smart Meter integrado com IoT para monitoramento da energia elétrica em residências

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Computação e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Computação.

Araranguá, 21 de agosto de 2020.

Prof. Fabrício De Oliveira Ourique, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Fabrício De Oliveira Ourique, Dr.
Orientador

Profa. Analúcia Schiaffino Morales, Dra.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo A. Reinaldo de Moraes, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fábio Rodrigues De La Rocha, Dr.
Avaliador Suplente
Universidade Federal de Santa Catarina

Desenvolvimento de Smart Meter integrado com IoT para monitoramento da energia elétrica em residências

Eliel Marcos Rocha Romancini* Fabrício de Oliveira Ourique†

2020, Agosto

Resumo

A eficiência energética é um dos dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável definida pela ONU na agenda de 2030. Logo, para alcançar essa meta a quantidade de informações acessíveis aos consumidores é um importante fator para a gestão dos recursos energéticos. Obrigatoriamente, as residências são dotadas de medidores de energia, porém, no Brasil, quase todos os usuários têm somente disponível a informação do consumo energético total - muitas vezes estimado ao final de cada mês. O presente trabalho propõe um protótipo para monitoramento de energia elétrica do tipo Smart Meter, com o conceito *IoT*. Na versão atual, o sistema implementa as seguintes funcionalidades: medidas de tensão, corrente, frequência, cálculo das potências ativa, reativa, aparente, fator de potência, consumo de energia, custo total em tempo real e o registro desses dados em memória. O sistema desenvolvido utiliza a tecnologia de comunicação *WiFi*, assim os dados podem ser transmitidos e interpretados por dispositivos que trabalhem com este padrão, através de uma aplicação *WEB*. Os requisitos do sistema foram alcançados ao projetar o protótipo do medidor fornecendo medidas de corrente e tensão precisas, restando apenas aprimoramentos em trabalhos futuros.

Palavras-chaves: Smart Meter, energia elétrica, redes sem fio, IoT, sistemas embarcados.

*eliel.romancini@grad.ufsc.br

†fabricio.ourique@ufsc.br

Development of Smart Meter integrated to IoT for monitoring electric energy in homes

Eliel Marcos Rocha Romancini* Fabrício de Oliveira Ourique†

2020, Agosto

Abstract

Energy efficiency is one of the seventeen sustainable development goals defined by the UN in the 2030 agenda. Therefore, to achieve this goal, the amount of information accessible to consumers is an important factor for the management of energy resources. It is mandatory that homes are equipped with energy meters, however, in Brazil, almost all users have only information on total energy consumption available - often estimated at the end of each month. The present work proposes a prototype for monitoring electrical energy of the Smart Meter type, with the IoT concept. In the current version, the system implements the following characteristics: measurement of voltage, current, frequency, calculation of active, reactive, apparent powers, power factor, energy consumption, total cost in real time and recording these data in memory. The developed system uses WiFi communication technology, so data can be transmitted and interpreted by devices that work with this standard, through a WEB application. The system requirements were met when designing the prototype for providing accurate current and voltage measurements, with only improvements to be made in future work.

Key-words: Smart Meter, electric energy, wireless networks, IoT, embedded systems.

1 Introdução

A energia elétrica está inserida no cotidiano das pessoas, das tarefas mais simples até as mais sofisticadas. No contexto de residências, comércio e indústria, o consumo elétrico também se faz presente, o que resulta na necessidade de produção de energia e redução de desperdício.

Da geração de energia até o consumo final, o conceito de eficiência energética deve ser pensado, em busca da melhor utilização para os insumos energéticos. Logo, é oportuno reduzir o uso da energia sempre que possível. Para isso é necessário a prática do consumo

*eliel.romancini@grad.ufsc.br

†fabricio.ourique@ufsc.br

consciente, evitando gastos desnecessários que exijam mais energia e podem, combinados com outros fatores, desencadear o aumento do custo de geração e crises energéticas.

Adotar comportamentos que reduzam o consumo e amenizam os impactos da energia utilizada contribuem na redução de desperdício e favorecem para a eficiência energética. Ou seja, é possível muitas vezes executar uma mesma tarefa diária consumindo menos energia para alcançar os mesmos resultados.

Através das pesquisas e levantamento de dados oficiais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Ministério de Minas e Energia (MME), entre 2003 a 2020, o consumo de energia elétrica nas residências corresponde ao montante de 38% do total gerado neste período, sendo o setor de maior consumo (ANEEL, 2020). Outros dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostram que em 2019 do total produzido, 45% foram consumidos pelas residências, além de um acréscimo médio próximo de 3,9% a.a. e alta de 1,4% no último ano (EPE, 2019), mesmo com várias perdas econômicas e períodos de decréscimo.

Apesar da demanda crescente do consumo de energia, o aumento de geração mesmo sendo estratégico e necessário não é a única solução. O desperdício é um agravante que necessita ser tratado com mais atenção pelos órgãos responsáveis, fornecedores e consumidores, pois somente nos últimos três anos o desperdício de energia atingiu R\$52,17 bilhões (ABESCO, 2018a), o equivalente a metade da produção de energia elétrica de Itaipu no mesmo período.

A ABESCO (Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia) ainda afirma que, somente o potencial de economia de energia de 2017 (60.069 *GWh*) poderia ser utilizado para abastecer uma cidade de aproximadamente 30 mil habitantes durante um ano inteiro, além de ter sido o maior número de desperdício desde 2008, início do monitoramento. Por fim, a associação salienta: “*O desperdício cresce porque o consumidor não adota o que há de equipamento mais moderno e econômico*” (ABESCO, 2018b)

O governo incentiva e desenvolve programas nacionais que contribuem com economia e redução de desperdício, a destacar o Programa de Eficiência Energética (PEE), o Programa Brasileiro de Etiquetagem e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), onde alguns equipamentos recebem o Selo de Eficiência Energética, que pode ser usado como comparativo entre vários eletrodomésticos (GUADAGNIN, 2016).

Também enfatizam a substituição de equipamentos elétricos antigos por mais novos, troca de lâmpadas incandescentes por fluorescentes ou LED e a redução no tempo de uso de alguns eletrodomésticos, como aparelhos de ar-condicionado (CUNHA, 2015). Porém, os consumidores não possuem um meio transparente de monitorar o quanto estão utilizando de maneira clara e instantânea, para modificarem seus comportamentos. Evitando assim, hábitos dispendiosos no consumo de energia, utilizando-a com mais eficiência e levando em consideração os gastos parciais, tanto energético quanto monetário.

É evidente que ações junto aos pequenos consumidores, poderão vir a oferecer significativas contribuições na economia como no crescimento dos serviços de fornecimento de energia elétrica. Mesmo com os programas nacionais, ainda existe carência de ações políticas, mudanças nos hábitos de consumo e de instrumentação e tecnologias acessíveis que permitiriam auxiliar nessa redução do desperdício (SENA, 2018).

A respeito de instrumentação e tecnologias, uma opção seria os medidores inteligentes, *Smart Meters*, onde já existem algumas iniciativas, inclusive por parte das

distribuidoras e concessionárias nacionais de energia elétrica. Mas pelo que se nota em alguns artigos, o principal e mais importante de todos os benefícios é apenas a eliminação da “perda de receita” por parte das distribuidoras (HAYASHI, 2018) e não pela transparência dos dados em tempo real aos usuários.

Um relatório emitido sobre o programa de implementação de medidores inteligentes no Reino Unido, mostra que em uma das companhias envolvidas, *Bristh Gas*, seus consumidores afirmaram ter tomado medidas para reduzir o consumo de energia desde a instalação de um medidor inteligente. Dentre os entrevistados, 62% afirmaram que os medidores inteligentes fez diferença na forma como eles usam a energia em casa, além de realizarem melhorias em suas casas em termos de eficiência energética e 73% alteraram suas atividades de forma mais eficiente e consciente (BUSINESS, 2019).

Juntamente com este tema, há ainda o surgimento crescente na última década de novas tecnologias e ferramentas voltadas ao desenvolvimento de baixo custo para sistemas embarcados, agregando “inteligência” e comunicação sem fio em aparelhos e “coisas” do cotidiano das pessoas, denominado Internet das Coisas (ou mais popularmente *IoT*, do inglês *Internet of Things*). Este é um termo que vem integrando uma quantidade enorme de equipamentos à internet, não mais se limitando aos computadores e telefones celulares (SENA, 2018).

O termo *IoT* é definido pelo governo brasileiro como: “a infraestrutura que integra a prestação de serviços de valor adicionado com capacidades de conexão física ou virtual de coisas com dispositivos baseados em tecnologias da informação e comunicação”. Recentemente foi criado o Plano Nacional de Internet das Coisas (Decreto nº 9.854, de 25 de Junho 2019) com a finalidade de implementar e desenvolver esta tecnologia no país, sendo uma ação muito proveitosa, tanto para os usuários como para os desenvolvedores de dispositivos. Este plano tem como principais objetivos melhorar a qualidade de vida das pessoas e promover ganhos de eficiência nos serviços, além de impulsionar a capacitação profissional relacionada ao desenvolvimento de aplicações de *IoT* e a geração de empregos na economia digital (BRASIL, 2019).

Agregando essas tecnologias, baixo custo e o incentivo do governo brasileiro, é possível desenvolver equipamentos de medições que forneçam aos consumidores dados relevantes, informativos e transparentes para um maior controle sobre a utilização da energia elétrica em seus estabelecimentos e, com iniciativas próprias, administrar o uso de maneira econômica. Assim, os usuários terão informações imediatas dos gastos que poderão servir de auxílio para evitar um conseqüente desperdício, uso excessivo e desnecessário da energia, incentivando o consumo consciente e contribuindo na redução da produção de energia para o setor.

Com objetivo de auxiliar na tomada de decisão, quanto ao uso do recurso energético, este trabalho propõe o projeto e desenvolvimento de um sistema de monitoramento do consumo de energia elétrica residencial, monofásica de baixa tensão, do tipo *Smart Meter*. Tendo como entradas os sinais da tensão e corrente elétrica, sendo processados em microcontrolador ESP32 (integrado com módulo *WiFi*), fornecendo, deste modo, vários fatores da rede, históricos de consumo, consumo real, custo monetário, qualidade da energia, entre outras variáveis, de forma remota e fácil, levando em consideração o conceito *IoT*.

Além de adquirir e armazenar os dados, o dispositivo permitirá a visualização dos valores de tensão, corrente, frequência, potência ativa, reativa, aparente, fator de potência, consumo e custo da energia elétrica, através de uma *interface* intuitiva, disponível para plataformas *mobiles*, *laptops* e *desktops*.

O projeto ainda conta com o critério de acuracidade, onde o medidor oferece precisão equiparada a instrumentos comerciais existentes e uma fácil instalação e conexão ao padrão de medição residencial pelo critério de “*plug-and-play*”.

O presente artigo está organizado em 5 seções. A fundamentação teórica aborda os aspectos de um *Smart Meter*, para o conhecimento mínimo do dispositivo, as definições de potência e consumo elétrico, como principais medidas do estudo em questão. Também são apresentados os conceitos dos sensores de corrente e tensão, para a leitura dos dados da rede elétrica, o amplificador operacional e filtros digitais necessários para aquisição e condicionamento dos sinais. Em seguida são abordados alguns trabalhos correlatos, modelagem e desenvolvimento do protótipo. Por fim, os resultados alcançados e a conclusão.

2 Fundamentação teórica

Os principais pontos abordados nesta seção são indispensáveis e base para projetos de dispositivos de medições elétricas inteligentes.

2.1 Aspectos de um *Smart Meter*

A medição eletrônica é a porta de entrada para criação de um canal de comunicação em tempo real com o consumidor de energia elétrica. Um medidor inteligente, também conhecido como *Smart Meter*, pode ser usado para identificar e medir o consumo de energia e pode também se comunicar com outros dispositivos eletrônicos (Owen; Ward, 2006).

Existem algumas definições de *Smart Meter*, do ponto de vista dos distribuidores de energia, é um medidor avançado que pode fornecer informações adicionais à companhia de energia elétrica e, se necessário, em tempo real. Tais como o consumo para gerir os custos dos clientes sem a necessidade de ir até o local para aferição e realizar a análise de qualidade de energia, também pode ser empregado para detecção de fraudes e roubos, entre outros. Além disso, pode ser usado para monitorar os eletrodomésticos e controlar dispositivos nas instalações elétricas de um consumidor (Depuru et al., 2011).

Outra abordagem do ponto de vista dos usuários, os *Smart Meters* são dispositivos de medição com capacidade muito superior em relação à quantidade de dados coletados e disponibilizados aos usuários, permitindo aos consumidores manterem-se bem informados em relação ao seu consumo de energia e transparência nos dados, oferecendo arcabouço para decisões mais eficientes referentes ao uso da energia elétrica (Arif et al., 2013).

Contudo, a base da definição desse tipo de medidor utilizada nesse trabalho é inclinada para o ponto de vista do usuário final, com a finalidade de disponibilizar dados para uma melhor gestão de seus gastos. Assim, os consumidores serão capazes de saber de forma transparente o valor de suas tarifas de energia a qualquer momento e poderão ajustar os seus hábitos de consumo para contribuir com a redução de desperdício.

2.2 Definição de potência

O conceito de carga elétrica é a base para descrever todos os fenômenos elétricos. Os conceitos de tensão e corrente são úteis porque podem ser expressos quantitativamente, assim sendo, a definição da *tensão* é a energia (w) por unidade de carga (q) criada pela separação entre cargas (Nilsson; Reidel, 2009) e é expressa em *volt* [V].

$$v = \frac{dw}{dq} \quad (1)$$

A taxa de fluxo dessas cargas, em função do tempo (t), é a definição de *corrente* e sua unidade é o *ampere* [A].

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

Embora a tensão e corrente sejam úteis na análise e projeto de sistemas que utilizam eletricidade, muitas vezes o resultado que realmente interessa não é expresso em termos elétricos, mas em potência (Nilsson; Reidel, 2009).

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

$$p = \frac{dw}{dt} = vi \quad (3)$$

Para circuitos de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA) puramente resistivos, comumente é utilizado a unidade *watt*, enquanto para circuitos de corrente alternada indutivos ou capacitivos é adotada a unidade *volt.ampere* [VA].

Potências em CA possuem suas características, pois impedâncias distintas geram resultados diferentes em função do tempo. Assim, é definido *potência instantânea* como o produto entre os valores instantâneos de tensão e corrente.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (4)$$

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

$$v(t) = V_p \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

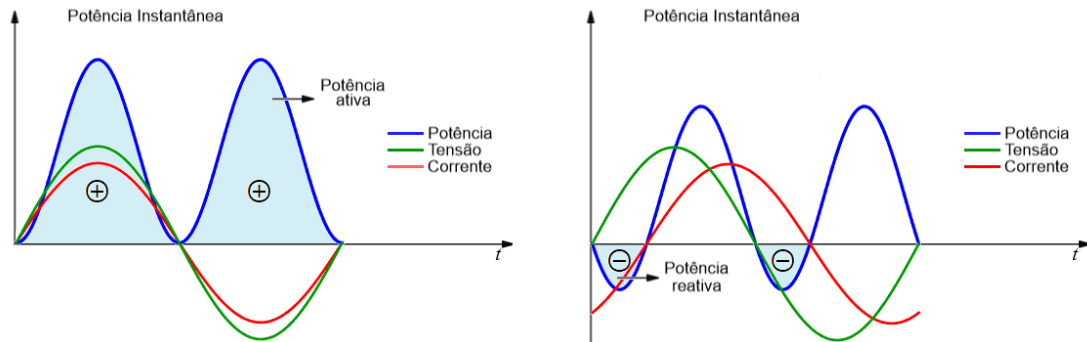
$$i(t) = I_p \cdot \cos(\omega t) \quad (6)$$

Impedâncias resistivas em circuitos CA, não alteram a fase (φ) entre tensão e corrente, logo o produto da corrente que corresponde com a parcela da tensão que está em fase com ela é dito *potência ativa* ou *potência real* (figura 1 (a)), que efetivamente realiza trabalho (MARKUS, 2011), ou ainda a média da integral da potência instantânea ao longo de um período, sendo simbolizada por P e unidade *watt* [W].

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (7)$$

Impedâncias indutivas e capacitivas em circuitos CA, alteram a fase (φ) entre os sinais de tensão e corrente, além de modificar o valor da potência ativa, contribuem para outros dois tipos de potência, *potência reativa*, usada apenas para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas e capacitivas, e *potência aparente*.

Figura 1 – Potência ativa e potência reativa.



(a) Potência ativa, gerada por impedâncias resistivas.

(b) Potência reativa, gerada por impedâncias indutivas ou capacitivas.

Fonte: Próprio Autor.

Potência reativa, representada na figura 1 (b), é o negativo do produto da corrente com a parcela da tensão que está em quadratura com ela, dessa forma a energia acumulada pelas reatâncias são devolvidas ao gerador sem realizar trabalho útil (MARKUS, 2011), simbolizada por Q sua unidade é *volt.ampere reativo [VAR]*.

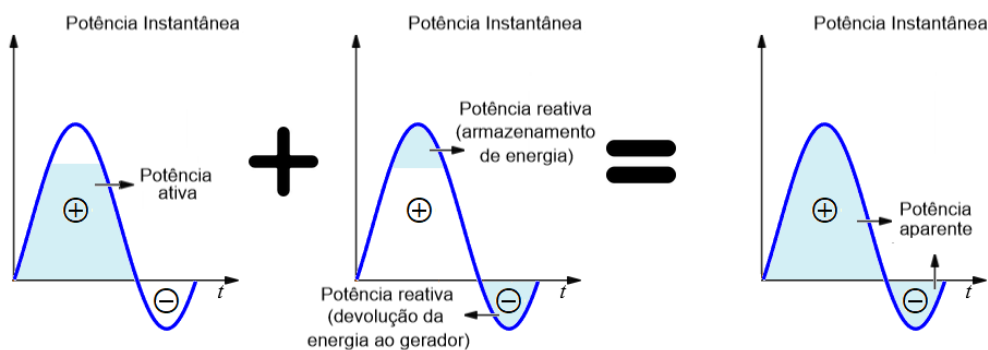
$$Q = -V \cdot I \cdot \text{sen}\varphi \quad (8)$$

Potência aparente é a potência total fornecida pelo gerador à impedância, ou seja, *potência ativa + potência reativa*, simbolizada por S sua unidade é *volt.ampere [VA]*.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

Em uma impedância formada pelas componentes resistiva e reativa (figura 2), a porção positiva da potência é sempre maior que a negativa, pois a parcela positiva é a soma das potências ativa com a de armazenamento de energia na componente reativa. Enquanto a parcela negativa é a potência usada pela impedância reativa para devolver a energia armazenada ao gerador (MARKUS, 2011).

Figura 2 – Potência aparente, a soma das potências ativa e a reativa.



Fonte: Próprio Autor.

Ainda, se realizado uma relação entre potência ativa e aparente, é obtido um valor entre 0 e 1 que reflete o quanto da potência fornecida pelo gerador é efetivamente consumida pelo circuito ou impedância. Essa relação é denominada como *fator de potência* FP e pode ser dado por:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (10)$$

ou

$$FP = \cos\varphi \quad (11)$$

2.3 Conceito do consumo elétrico

A energia elétrica é definida como a potência ativa consumida ao longo do tempo, sua unidade é *watt.segundo* $[Ws]$.

$$E = \int_{t_0}^t P \cdot dt \quad (12)$$

Mas a ordem de grandeza do consumo de energia elétrica em residências e indústrias é muito elevada, então a unidade de medida mais comumente usada é o *quilowatt.hora* $[kWh]$ (MARKUS, 2011).

A energia consumida num intervalo de tempo é o produto da potência (kW) da carga pelo número de horas (h) que a mesma permaneceu ligada.

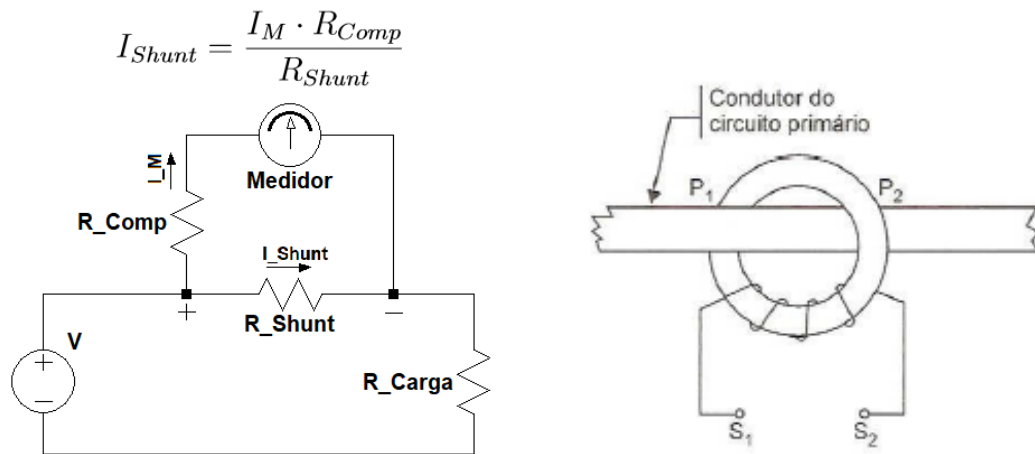
As concessionárias ou distribuidoras de energia cobram do consumidor pela energia utilizada através de um valor monetário sobre o *quilowatt.hora*, podendo este valor variar de acordo com a região, horário ou bandeira. Logo, o custo total do consumo elétrico é dado pelo produto da energia consumida, durante o tempo total do período, com o custo da tarifa em reais ($R\$$) por kWh , definido na equação 13 como C_{Tarifa} .

$$C_{Total} = E \cdot C_{Tarifa} \quad (13)$$

2.4 Sensores de corrente

Para realizar a medição do sinal da corrente elétrica, é necessário disponibilizar os níveis da corrente que circulam no circuito através de sensores adequados, dentre eles o resistor *Shunt*, que consiste em uma resistência de baixo valor colocada em série com o circuito do qual se pretende medir a corrente, conforme figura 3 (a). Mede-se a queda de tensão no componente e pela lei de *Ohm* é obtida a leitura da corrente (Thomazini; Albuquerque, 2011).

Figura 3 – Sensores de corrente.



(a) Esquema de ligação de uma resistência *Shunt* para sensor de corrente.

(b) Transformador de corrente com condutor do circuito primário de uma espira.

Fonte: (a) Próprio Autor, (b) Thomazini e Albuquerque (2011).

Uma forma mais adequada para medir a corrente elétrica alternada (CA) é por um transformador de corrente (TC), ele transforma a corrente que circula em um enrolamento primário, através de um acoplamento magnético, em uma corrente induzida no secundário, geralmente linear e de menor grandeza, podendo este não possuir primário próprio, sendo então o condutor do circuito, com uma ou mais espiras (figura 3 (b)). São utilizados em aplicações de alta corrente e têm a função de fornecer correntes proporcionais às medidas no circuito primário de potência, mas suficientemente reduzidas e isoladas galvanicamente de forma a possibilitar a medição por equipamentos de proteção e medição (FILHO, 1997).

2.5 Sensores de tensão

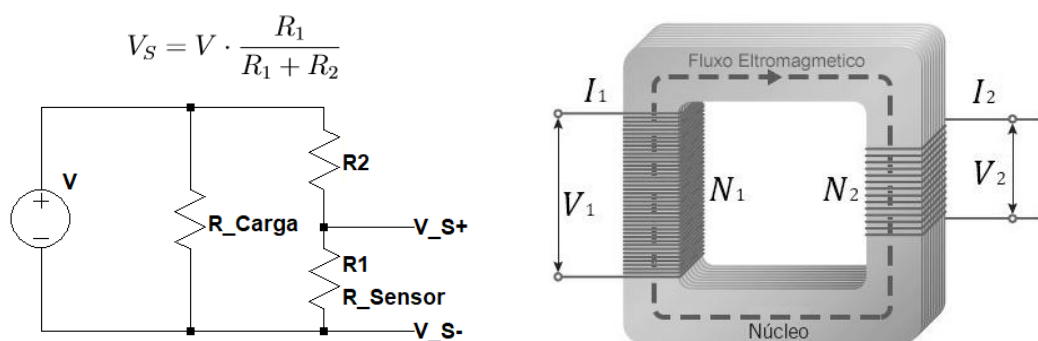
Para obter os níveis de medida da tensão elétrica se faz necessária a utilização de dispositivos ou métodos para adequar os níveis de tensão que estão sendo medidos, aos que a instrumentação condiciona, pois, muitas vezes não é possível ser aplicada diretamente aos circuitos que realizam o processamento desta grandeza.

O método de um divisor de tensão resistivo é o mais utilizado para medição de tensões de corrente contínua (CC). A tensão a ser medida é aplicada nos terminais de dois resistores ligados em série e a amostragem é tomada nos terminais de um dos resistores, a proporcionalidade dessa amostragem é função da razão entre os resistores (Thomazini; Albuquerque, 2011). Assim é possível adequar os níveis do circuito a ser medido com o circuito de condicionamento, como apresentado na figura 4 (a).

Além dos divisores resistivos, para medição da tensão de corrente alternada (CA) o método mais utilizado é o transformador de potencial (TP), figura 4 (b). Trata-se de um dispositivo para instrumentação cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e o enrolamento secundário fornece uma baixa tensão proporcional à tensão a ser medida ou controlada (FILHO, 1997).

Na prática o TP é considerado um redutor de tensão, pois a tensão no seu circuito secundário é normalmente menor que a encontrada no seu enrolamento primário.

Figura 4 – Sensores de tensão.



(a) Esquema de ligação de um divisor resistivo como sensor de tensão.

(b) Transformador de potencial com tensão de entrada V_1 maior que tensão de saída V_2 .

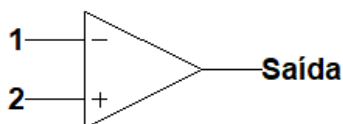
Fonte: (a) Próprio Autor, (b) [Transformadores \(2019\)](#).

2.6 Amplificador operacional como *buffer*

De acordo com [Sedra e Smith \(2007\)](#), os amplificadores operacionais (Amp Op) têm sido usados há muito tempo, sendo suas aplicações inicialmente nas áreas de computação analógica e instrumentação sofisticada. Uma das razões da popularidade do Amp Op é a sua versatilidade.

Em um Amp Op ideal, nenhuma corrente é drenada por suas entradas, a impedância de entrada é considerada infinita, enquanto o terminal de saída é suposto como uma fonte de tensão ideal, ou seja, a impedância de saída ideal é supostamente igual a zero. Outra característica do Amp Op é que a tensão de saída está em fase com o terminal positivo e defasada (sinal oposto) com o terminal negativo. Por isso, o terminal 1 (figura 5), identificado por um sinal “-”, é denominado *terminal da entrada inversora*, enquanto o terminal 2, identificado por um sinal “+”, é chamado *terminal da entrada não inversora* ([Sedra; Smith, 2007](#)).

Figura 5 – Amplificador operacional.



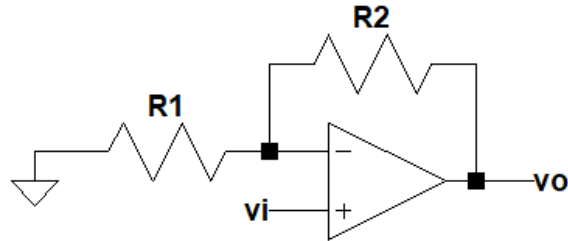
Fonte: Próprio Autor.

O Amp Op é projetado para operar como um sensor de diferença entre os sinais de tensão aplicados nos seus terminais de entrada, multiplicando-se esse valor por um número A (ganho), que resulta em uma tensão, $A \cdot (v_2 - v_1)$, no terminal de saída.

Uma configuração típica dos amplificadores é dita configuração não inversora em malha fechada, figura 6, pois o sinal de entrada é aplicado diretamente no terminal positivo,

enquanto o terminal negativo é realimentado pela saída através do resistor R_2 e ligado ao terra pelo resistor R_1 .

Figura 6 – Configuração não inversora.



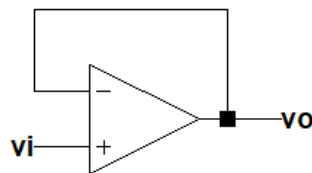
Fonte: Próprio Autor.

Nesta configuração o Amp Op tem como função de transferência:

$$A = \frac{v_O}{v_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

A propriedade de alta impedância de entrada na configuração não inversora é uma característica muito desejável, pois permite a utilização desse circuito como um amplificador *buffer* (isolador) para conectar um estágio com alta impedância de saída a uma carga de baixa impedância (Sedra; Smith, 2007). Nesse caso, basta que $R_2 = 0$ e $R_1 = \infty$ para obter o *amplificador de ganho unitário* ($v_O = v_I$), também conhecido como *seguidor de tensão*, já que a saída segue a entrada. Esta topologia é mostrada na figura 7.

Figura 7 – Amplificador operacional como *buffer*.



Fonte: Próprio Autor.

Outras vantagens do Amp Op como *buffer* são: isolamento de dois estágios (sem alterar o sinal entre eles), ganho unitário de tensão sem inversão, elevada impedância de entrada e baixa impedância de saída.

2.7 Filtro digital passa-altas

Através dos computadores e de processadores digitais de uso específico, tornou-se possível implementar funções de transferência equivalentes às realizadas pelos sistemas analógicos, efetivando a elaboração de sistemas discretos no tempo, a qual tem a vantagem de evitar alguns problemas decorrentes sobre os sistemas analógicos, tais como confiabilidade,

reprodutividade, repetibilidade, entre outras, tornando praticável o desenvolvimento de filtros em sistemas digitais. Um filtro digital é um sistema que atua sobre uma sequência de amostras do sinal de entrada, gerando uma sequência de amostras de saída (SIMMER, 1994).

Oppenheim e Schafer (2013) dizem que, um *filtro seletivo de frequência* é um sistema que passa certos componentes de frequência de um sinal de entrada e rejeita todos os outros. Na prática, o filtro desejado é geralmente implementado em hardware digital e é usado para filtrar um sinal originado de tempo contínuo, por meio de amostragem periódica, seguida pela conversão A/D (analogico para digital), por esse motivo, tornou-se comum chamar os filtros de tempo discreto de *filtros digitais*.

No projeto de filtro digital é necessário determinar os parâmetros de uma função de transferência, ou equação de diferenças, que aproxima uma resposta ao impulso ou uma resposta em frequência dentro de tolerâncias específicas. Ainda, os sistemas de tempo discreto implementados com equações de diferenças se subdividem em dois grandes grupos: sistemas com resposta ao impulso infinita (*IIR*, do inglês *infinite impulse response*) e sistemas com resposta ao impulso finita (*FIR*, *finite impulse response*) (Oppenheim; Schafer, 2013).

Para a realização, os filtros do tipo *IIR* tem como pré-condição a convergência para garantir estabilidade, o que equivale restringir seus pólos a se localizarem dentro do círculo de raio unitário, no plano complexo \mathbb{Z} , sempre que se tratar de filtros causais, enquanto os filtros *FIR*, não há necessidade de nenhuma restrição adicional, pois eles são sempre estáveis, visto que seus pólos estão todos na origem do círculo unitário (SIMMER, 1994).

Assim, os filtros digitais *IIR*, apesar de exigirem a condição de convergência, são mais comumente praticados devido a sua simplicidade de implementação e menor tempo de processamento em sistemas digitais. Por outro lado, os filtros digitais *FIR*, apesar do maior tempo de processamento, modificam a fase do sinal de entrada de forma linear, isso remove a fase do sinal do processo de projeto (Oppenheim; Schafer, 2013).

Na equação 15 está a representação matemática da função de transferência dos filtros tipo *IIR* de ordem M , no plano complexo \mathbb{Z} :

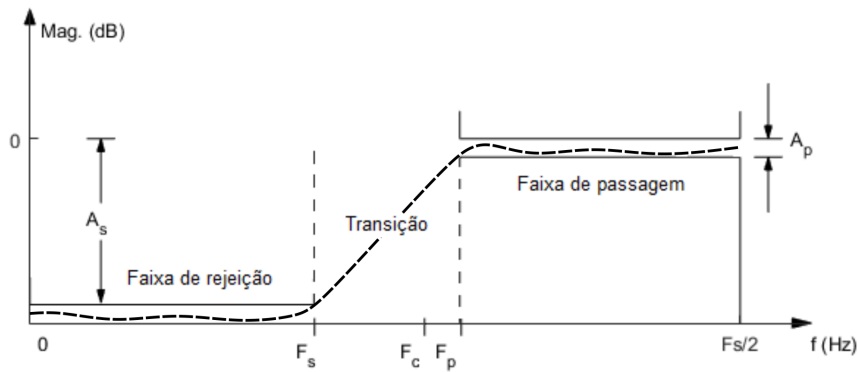
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{j=0}^M a_j z^{-j}}{\sum_{k=0}^N b_k z^{-k}} \quad (15)$$

Na equação 16 está a representação matemática da função de transferência dos filtros tipo *FIR* de ordem M , no plano complexo \mathbb{Z} :

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{j=0}^M a_j z^{-j}}{1} \quad (16)$$

Independente da categoria do filtro projetado, o filtro digital passa-altas, figura 8, tem como principais características a atenuação das componentes de baixa frequência do sinal de entrada no sistema, denominada *faixa de rejeição*, e a manutenção das componentes de alta frequência, denominada *faixa de passagem*. Como não é possível uma transição abrupta da faixa de rejeição para a faixa de passagem, uma região, dita *transição*, da frequência da extremidade da faixa de rejeição F_s até o início da faixa de passagem em F_p é permitida, onde se encontra a frequência de corte (F_c) do filtro projetado.

Figura 8 – Projeto de filtro digital passa-altas.



Fonte: Próprio Autor.

A máxima frequência analisada nos projetos de filtros digitais é baseada no teorema da amostragem de *Nyquist*¹, onde o sinal a ser condicionado deve ter uma frequência de amostragem (F_s) no mínimo duas vezes a máxima frequência do próprio sinal que se deseja filtrar, logo é analisado até a metade da frequência de amostragem $F_s/2$. Também é possível determinar o ganho na faixa de passagem (A_p), variando em torno do ganho unitário e o ganho (ou atenuação) na faixa de rejeição (A_s), onde ambas especificações técnicas do projeto são conhecidas como limites de tolerância (Oppenheim; Schafer, 2013).

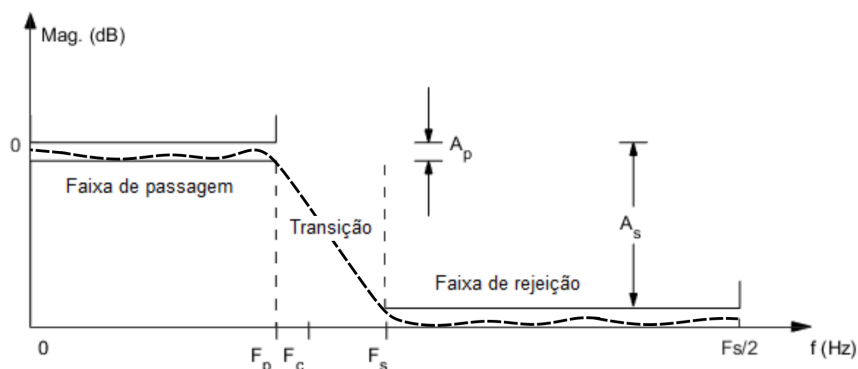
2.8 Filtro digital passa-baixas

Assim como os filtros digitais passa-altas, as condições de convergência e os tempos de processamento também são válidas para os filtros digitais passa-baixas, bem como o tipo de alteração (linear ou não-linear) da fase do sinal na saída do sistema, são dependentes do grupo que se esteja projetando, *FIR* ou *IIR*.

Realizando novamente uma análise no projeto de filtros e independente do grupo, o filtro digital passa-baixas, figura 9, tem como principais características a seleção das componentes de baixa frequência e atenuação das componentes de alta frequência do sinal de entrada, denominadas *faixa de passagem* e *faixa de rejeição*, respectivamente. Conforme o filtro passa-altas, o passa-baixas também possui a região compreendida entre a extremidade da faixa de passagem (F_p) até o início da faixa de rejeição (F_s), chamada de *transição*. Para ambos os filtros, esta região de transição é mais larga ou estreita de acordo com a ordem na qual o sistema é projetado, quanto maior a ordem, menor é a região e mais próximo do ideal é o filtro, tornando o sistema complexo e lento. Ademais, os limites de tolerância A_p e A_s para os ganhos nas faixas de passagem e rejeição, também são especificações técnicas no projeto do filtro digital passa-baixas, bem como a frequência de amostragem F_s , que deve respeitar o teorema da amostragem de *Nyquist* (Oppenheim; Schafer, 2013).

¹ O teorema de *Nyquist*, ou teorema da amostragem, diz que se amostrarmos um sinal contínuo com largura de banda F_{max} a uma frequência maior ou igual a duas vezes F_{max} , então o sinal amostrado contém toda a informação do sinal contínuo e consegue-se recuperar o sinal original a partir das amostras.

Figura 9 – Projeto de filtro digital passa-baixas.



Fonte: Próprio Autor.

3 Estado da arte

Nos últimos três anos, através de uma pesquisa na base de dados do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*IEEE Xplore Digital Library*), foram publicados mais de 2300 artigos relacionados com *Smart Meter*. Isso revela a importância do tema, juntamente com a expansão da comunicação sem fio e automação residencial, gerando avanços e descobertas nestas áreas.

Hlaing et al. (2017) sugerem a implementação de um sistema de monitoramento para o uso diário da energia elétrica, sendo uma solução barata e fácil de instalar, trazendo a proposta de eliminar o trabalho manual, evitar erros humanos na leitura de medidores antigos e a redução de custos no consumo de energia, pois os usuários estarão cientes do uso de eletricidade em suas casas para reduzir o desperdício de energia. O trabalho é focado, principalmente, em monitoramento de energia com o conceito *IoT*, implementação de uma rede e protocolo de sensores sem fio de custo muito baixo para aplicativo de energia e *WEB* capaz de ler e enviar automaticamente os dados para que os usuários vejam a leitura atual do medidor de energia.

Os autores de “*An IoT-Based Smart Utility Meter*” (Al-Ali et al., 2018), propõem o design, desenvolvimento e testes de um sistema *Smart Meter* de utilidade que reúne em um único dispositivo o monitoramento do consumo de eletricidade, água e gás, baseado em *IoT*. O medidor possui uma rede única e pode ser programado remotamente para ler os três tipos de consumo pelos prestadores de serviços públicos. Os consumidores finais podem acessar através de um computador pessoal ou um telefone móvel. Também foi utilizado o serviço do *Google Map* para exibir o status do medidor mostrando o consumo de cada concessionária e se está conectado ou desconectado.

Saha et al. (2018) relatam os ataques cibernéticos as redes já integradas com dispositivos medidores de energia e controle que utilizam infra-estrutura *AMI* (*Advanced Metering Infrastructure*). Com o intuito de mitigar os ataques, o artigo relata o design, fabricação e operação de um sistema de rede inteligente baseado em módulo *Arduino UNO* para o processamento do sinal, integrado com um módulo *ESP8266* para conexão *WiFi*, além de transformador de corrente e transformador de potencial para realizar as leituras de tensão, corrente, potência ativa, aparente, fator de potência e energia consumida através de uma aplicação *Web Browser*.

Carratù et al. (2018), em particular, descrevem uma solução inovadora para medição de energia elétrica, gás e água integradas na mesma infraestrutura. Também descrevem as métricas e detalhes de *hardware* de um medidor inteligente de energia e sugere o módulo *WM-BUS*, que utiliza um canal de rádio de curto alcance na frequência de 169 MHz, para a comunicação entre medidores e uma espécie de *gateways* chamados “Concentradores”, espalhados com precisão na área urbana para transmitir os dados dos medidores inteligentes até a unidade central através do *GSM-GPRS*, utilizando protocolo *CAN-BUS*.

Vangelista, Dell’Anna e Palazzoli (2019), por sua vez, não desenvolvem nenhum dispositivo, mas realizam testes com os *Smart Meters* existentes levando em consideração a tecnologia *LoRaWAN* e *WM-BUS*, para fins de medição e transmissão dos dados, tomando como principal indicador de desempenho a duração da bateria. Os resultados das medições mostram que os medidores *LoRaWAN* superam significativamente os medidores *WM-BUS*, segundo os testes e estimativas a vida útil das baterias seriam 208 e 33 anos, respectivamente.

4 Modelagem e desenvolvimento do protótipo

O presente artigo, apresenta uma proposta de arquitetura com tecnologia aplicada, bem como, o desenvolvimento simulado e experimental de caráter exploratório. Contíguo à essa natureza, foi realizada a prototipação do dispositivo *Smart Meter*, além de efetivar os testes e validar os resultados esperados.

O medidor inteligente foi modelado partindo das premissas dos requisitos funcionais e não funcionais, através de diagramas de blocos, diagrama de comunicação, diagrama de caso de uso, fluxograma e circuito elétrico.

4.1 Requisitos do sistema

Foram definidos os Requisitos Funcionais (RF) para modelagem do sistema, os quais referem-se à requisição das funções mínimas que o medidor deve atender/realizar. Sendo eles listados por RFx:

- RF1: O sistema deve operar em redes de tensões monofásicas 110 V_{AC} ou 220 V_{AC} .
- RF2: O sistema deve operar em redes de tensões de 50 Hz ou 60 Hz.
- RF3: O sistema deve adquirir os sinais da corrente elétrica de forma não invasiva.
- RF4: O sistema deve informar de maneira remota a tensão e a frequência atual da rede elétrica.
- RF5: O sistema deve informar de maneira remota a corrente atual consumida da rede elétrica.
- RF6: O sistema deve informar de maneira remota as potencias ativa, reativa, aparente atuais e o fator de potência.
- RF7: O sistema deve informar de maneira remota o consumo de energia e valor monetário, além de arquivar em histórico esses valores.
- RF8: O sistema deve oferecer o acesso remoto por comunicação *WiFi*.
- RF9: O sistema deve possuir uma interface para interpretação dos dados de forma intuitiva e multiplataforma (*desktops* e *mobiles*).

Através dos requisitos funcionais são explorados os Requisitos Não Funcionais (RNF). Enquanto os RF definem o que o sistema fará, os RNF definem como o sistema fará, ou seja, os requisitos não funcionais estão diretamente ligados com os requisitos funcionais. Dessa forma, são listados por RNFx:

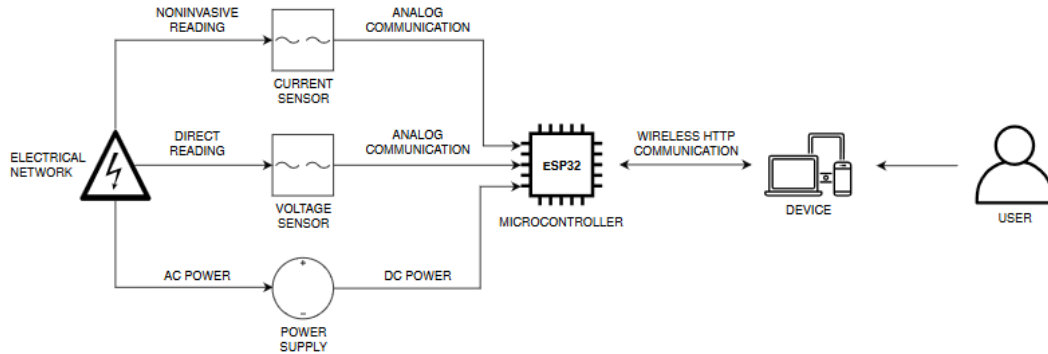
- RNF1: O sistema deve ter uma mínima proteção contra surtos de tensões na rede elétrica que estiver operando, através de fusíveis e varistores.
- RNF2: O sistema deve obter sua alimentação da própria rede elétrica que estiver instalado.
- RNF3: O sistema deve ser modelado de forma que possa ser instalado em caixas de distribuições de energia das residências.
- RNF4: O sistema deve medir e informar tensões de $90.0 V_{AC}$ até $240.0 V_{AC}$, com erro máximo de $\pm 0.1 V_{AC}$.
- RNF5: O sistema deve medir e informar correntes de $0.1 A$ até $30.0 A$, com erro máximo de $\pm 0.1 A$.
- RNF6: O sistema deve medir e informar frequências de $45.0 Hz$ até $65.0 Hz$, com uma casa de precisão.
- RNF7: O sistema deve medir e informar as potências e consumo de energia, ao que compreende entre os limites de tensão e corrente especificados.
- RNF8: O sistema deve manter um histórico dos últimos 30 dias do consumo de energia e valor monetário, além de armazenar em histórico (por no máximo 3 anos) os valores datados a cada hora em memória não volátil.
- RNF9: O sistema deve oferecer comunicação sem fio (*WiFi*) de curto alcance, operando em frequência $2.4 GHz$, utilizando protocolo de comunicação *IEEE 802.11b/g/n*, para acesso remoto em dispositivos *Smartphones* e *Laptops*.
- RNF10: O sistema deve oferecer uma interface de visualização dos dados utilizando linguagem *HyperText Markup Language (HTML)* para operar em dispositivos com Sistemas Operacionais distintos, necessitando apenas de um aplicativo de navegação, *Browser*.
- RNF11: Utilizar como microcontrolador, para processamento dos sinais e comunicação sem fio, o dispositivo ESP32.
- RNF12: Utilizar como sensor para aquisição do sinal de corrente elétrica o sensor não invasivo SCT-013 de $30 A$.
- RNF13: Utilizar como sensor para aquisição do sinal de tensão um transformador de potencial ZMPT101B ($2 mA : 2 mA$), isolado galvanicamente.
- RNF14: Utilizar amplificadores operacionais *Rail-to-Rail* para operações como *buffer* e condicionamento dos sinais analógicos.

4.2 Diagramas do sistema

A partir da definição das funcionalidades que o dispositivo deve realizar, foi planejado a comunicação entre as partes existentes que interagem na estrutura, assim como mostrado na figura 10. Através de um diagrama de comunicação são representados de que forma cada parte do sistema vai passar ou trocar informações. De maneira analógica, os sensores repassam os dados capturados de forma direta ou não invasiva da rede elétrica, para unidade de processamento, enquanto o sistema de alimentação transforma a tensão CA em CC para suprir o fornecimento de energia ao medidor inteligente. Na interação

com o usuário, o sistema realiza a troca de mensagens pelo protocolo *HTTP* (*HyperText Transfer Protocol*) através da comunicação sem fio com o dispositivo de acesso do mesmo.

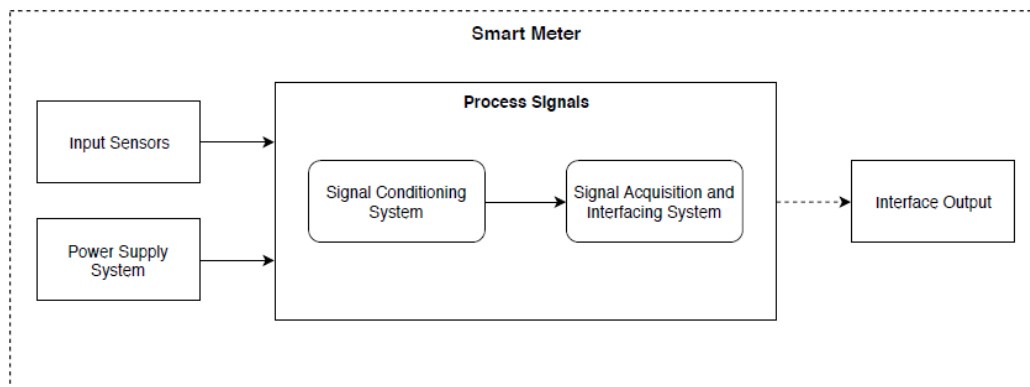
Figura 10 – Diagrama de comunicação do *Smart Meter*.



Fonte: Próprio Autor.

Em uma visão macro, são modelados os diagramas de blocos funcionais necessários que representam o *Smart Meter*. A figura 11, mostra o diagrama de blocos geral com as entradas e saídas do sistema.

Figura 11 – Diagrama de blocos geral do *Smart Meter*.

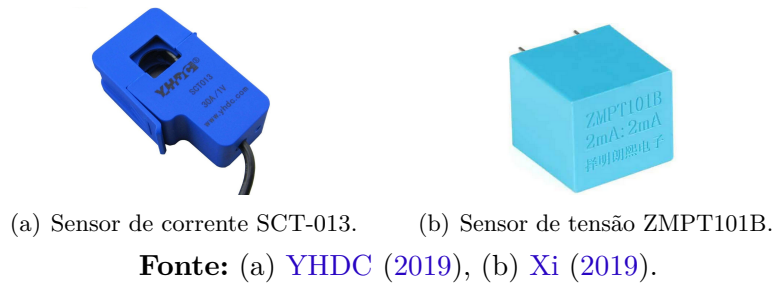


Fonte: Próprio Autor.

Os procedimentos para obtenção dos dados reais e estatísticos da rede elétrica se concentram nas entradas dos sensores de tensão e corrente não invasivo, sendo eles, TP e TC, respectivamente. Enquanto o sistema de alimentação elétrica do dispositivo é projetado no próprio circuito utilizando módulo CA-CC.

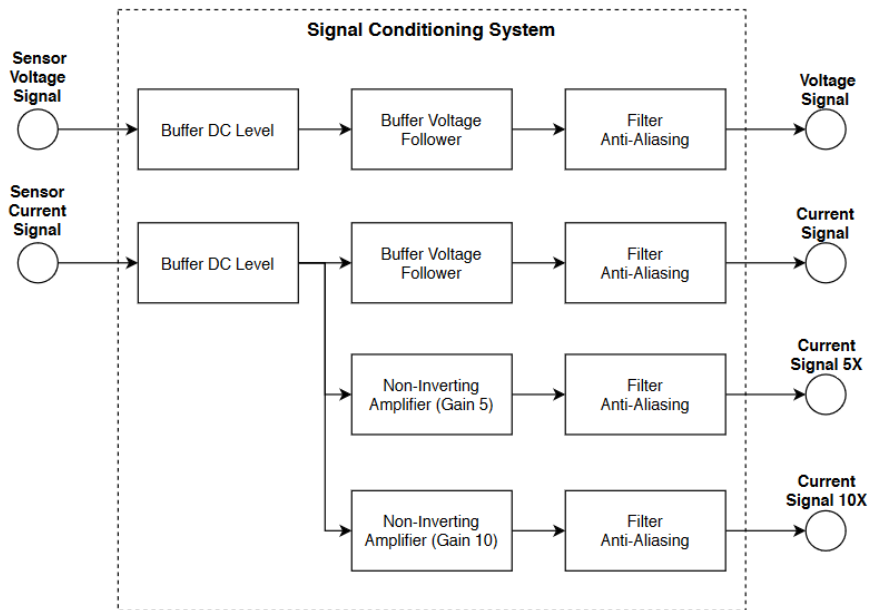
Para a leitura e geração dos sinais de corrente foi utilizado o sensor TC, não invasivo, modelo SCT-013 de 30 A com saída de 1 V, figura 12 (a), e para os sinais de tensão o sensor micro TP modelo ZMPT101B com 2 mA de entrada por 2 mA de saída, figura 12 (b).

Figura 12 – Sensores TP e TC.



Dentro do diagrama geral, figura 11, existe um bloco que realiza o processamento dos sinais fornecidos pelos sensores, condicionando e elevando os níveis de tensão, através de *buffer's* de nível DC, seguidores de tensão e amplificadores não inversor. Também existe a adição de filtros *Anti-Aliasing* analógicos, com frequência de corte em 1600 Hz, para restringir a largura de banda dos sinais que são amostrados. Este subsistema é representado pelo diagrama da figura 13.

Figura 13 – Diagrama de blocos do sistema de condicionamento.



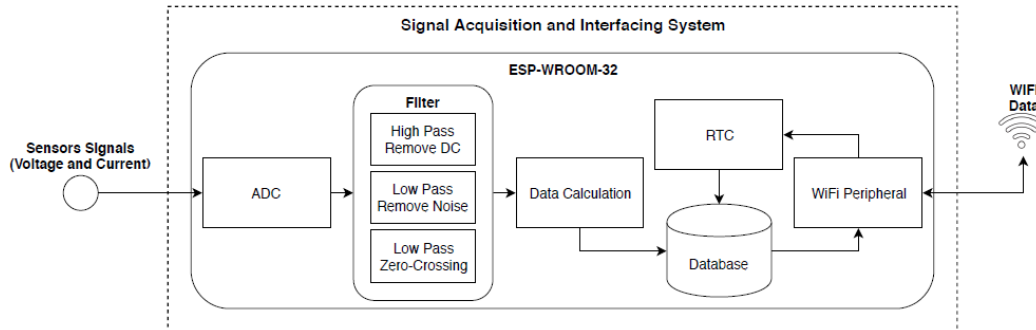
Fonte: Próprio Autor.

Os sinais de tensão e corrente são condicionados analogicamente antes de serem amostrados pelo microcontrolador. No sinal oriundo do sensor de tensão não há inferência de nenhum ganho, porém no sinal originado pelo sensor de corrente, o mesmo é amplificado com o objetivo de agregar precisão nas leituras.

Ainda dentro do bloco de processamento, os sinais tratados entram no estágio que realiza a aquisição e *interface* dos dados. Nesta etapa, as amostras são capturas pelo conversor ADC (*Analog-to-Digital Converter*) do microcontrolador com uma frequência de amostragem de 4000 Hz. Os sinais analógicos agora estão digitalizados e podem ser

processados por filtros digitais para manutenção das variáveis. O sinal segue a estrutura de processamento conforme o diagrama da figura 14.

Figura 14 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição e *interface* dos dados.



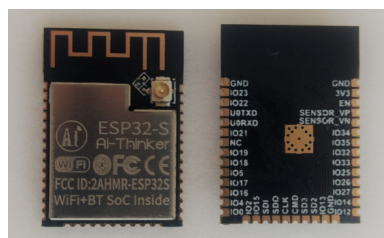
Fonte: Próprio Autor.

No microcontrolador, os dados da saída do ADC passam pelo filtro digital passa-altas, com o intuito de remover o nível DC acrescido na fase de condicionamento. Ambos os sinais de tensão e corrente são corrigidos por este sistema. Em seguida, os sinais entram no filtro passa-baixas, afim de remover frequências indesejáveis. O último filtro digital é utilizado apenas no sinal de tensão para atuar como um detector de *Zero-Crossing* (cruzamento de zero), esta função é necessária para obter a frequência da rede elétrica e manter o sistema em sincronismo, para isso o filtro deve ser um passa-baixas com o objetivo de extrair a frequência fundamental das demais harmônicas.

O primeiro filtro digital foi modelado para uma frequência de corte de 1 *Hz*, do tipo *IIR - Butterworth* de primeira ordem. O segundo filtro foi projetado para uma frequência de corte de 1300 *Hz*, do tipo *FIR - Window Gaussian* de vigésima ordem, proporcionando um atraso de fase linear na banda passante. E no terceiro filtro digital implementado, a sua frequência de corte foi definida para 60 *Hz*, com sistema do tipo *FIR - Window Gaussian* também de vigésima ordem.

O componente responsável por gerenciar os dados e processá-los digitalmente é o ESP32-WROOM-32, ele é um pequeno microcontrolador 32 *bits* de baixo consumo e custo, com rádio integrado (*WiFi* e *Bluetooth*), tendo versões com antena embutida ou externa. Possui periférico ADC de 12 *bits*, trabalha com alimentação de 3.3 *V* e conta com sistema *OTA (Over-The-Air)* que permite o envio de atualizações de *software/firmware* de forma remota. A figura 15 mostra a face superior e inferior do componente:

Figura 15 – ESP32-WROOM-32.



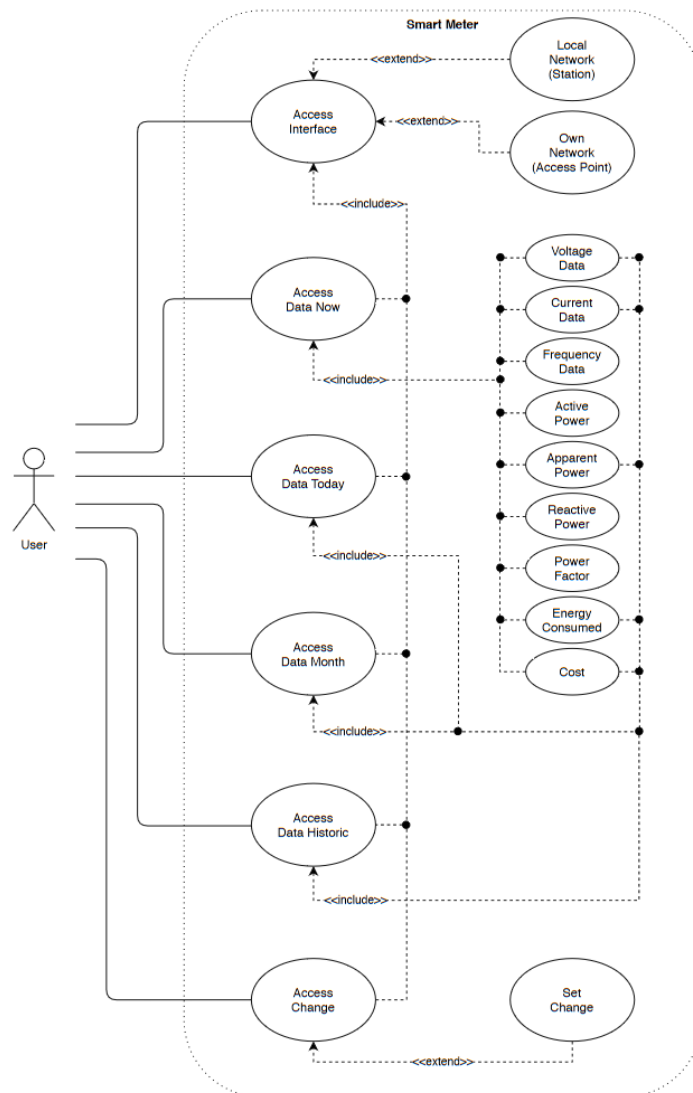
Fonte: Próprio Autor.

Após o processamento dos dados de tensão e corrente, esses são utilizados para calcular todas as grandezas das informações propostas e posteriormente armazená-las no sistema de arquivos da memória do microcontrolador, juntamente com o horário de registro do *Real-Time Clock (RTC)* do ESP32.

Ao final, os dados armazenados podem ser transmitidos pela *interface* de saída, onde através do periférico e comunicação *WiFi*, as informações são repassadas aos usuários por aplicação *Web Browser* que fica salva no próprio microcontrolador.

As informações que os usuários podem acessar no *Smart Meter* são modeladas por um diagrama de caso de uso, apresentado na figura 16. Por meio de dispositivos com capacidade de comunicação sem fio (*smartphone* ou computador), é possível obter acesso ao servidor *WEB* interno do medidor inteligente, pela rede *wireless* própria (*station*), através da funcionalidade de roteador, ou por uma rede local (*access point*), aonde o mesmo está instalado.

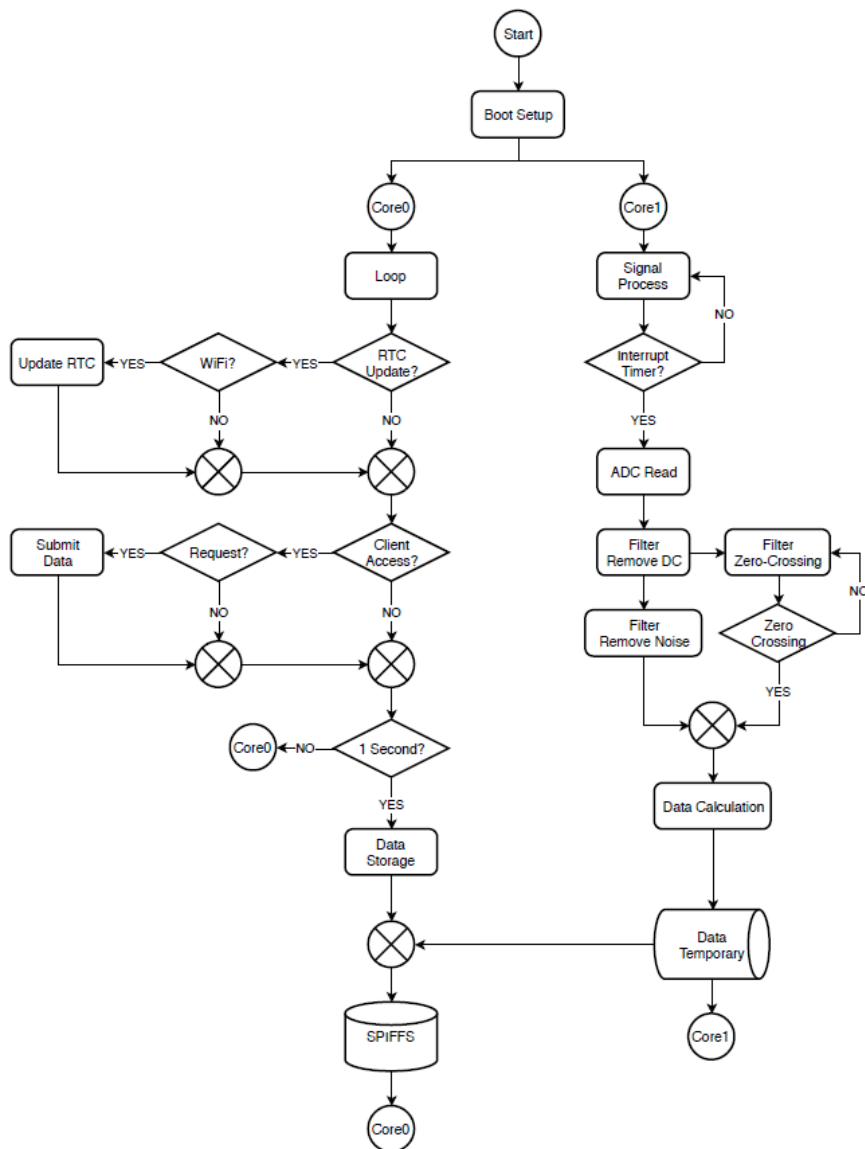
Figura 16 – Diagrama de caso de uso do sistema.



Fonte: Próprio Autor.

A modelagem macro do *firmware* embarcado no microcontrolador, encarregado pela maioria das funcionalidades, é mostrada como fluxograma na figura 17. Sendo o ESP32 dotado de um processador de 32 *bits* e 2 núcleos, a tarefa responsável pelo processamento digital dos sinais foi alocada em um dos núcleos, para ser executada de maneira exclusiva e dedicada, enquanto as demais tarefas ficaram a cargo de serem executadas pelo núcleo remanescente. A linguagem de programação adotada para desenvolver o algoritmo embarcado foi *C/C++*, com a utilização de algumas bibliotecas disponíveis de categoria *Open Source*.

Figura 17 – Fluxograma do *firmware*.



Fonte: Próprio Autor.

Após inicializar as configurações do sistema, a rotina responsável pelo processamento digital de sinais aguarda a interrupção do *timer*, que rege a frequência de amostragem, o qual invoca as leituras das entradas analógicas dos sinais de tensão e corrente. Os sinais

convertidos pelo ADC são tratados pelos filtros digitais e calculadas as variáveis necessárias para o monitoramento da energia. Esses dados são mantidos de forma temporária para serem apresentados pela *interface* de saída, quando necessário, e posterior armazenamento.

O restante das rotinas operam de maneira paralela e independentes, em outro núcleo, da rotina de processamento de sinais. O processo segue um fluxo ininterrupto, verificando a necessidade de atualização do *RTC* e executando, quando este estiver desatualizado, por meio de protocolo *NTP* (*Network Time Protocol*) através da comunicação *WiFi*.

Em seguida, são atendidas as requisições dos usuários conectados pela *interface* de saída e a cada 1 segundo os dados temporários, gerados pela rotina de processamento digital dos sinais, são de fato armazenados na memória para posterior consulta do histórico.

Como o ESP32 possui um sistema de arquivos interno, denominado *SPIFFS* (*Serial Peripheral Interface Fast File System*), nele é possível armazenar os dados registrados das grandezas elétricas de forma não volátil e assim possibilitar a criação de um histórico, bem como o armazenamento da aplicação *HTML* para visualização desses dados de acesso aos usuários. Este espaço de memória pode variar de acordo com o modelo do fabricante, para este projeto o ESP32 é integrado com 1 *MB* de memória de arquivos.

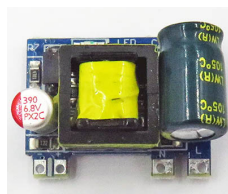
4.3 Projeto do circuito elétrico e protótipo

No projeto do circuito elétrico, bem como a lista de materiais necessária para o seu desenvolvimento e produção experimental, foi levado em consideração o baixo custo sem deixar de lado a durabilidade, qualidade e acuracidade das medições.

A proteção do sistema contra surtos de tensão é garantida por fusíveis, diodos de referência e varistores de efeito rápido. Em casos de sobrecarga na rede elétrica, podem ocorrer a queima destes componentes evitando que o surto se propague para os demais componentes do medidor. Assim, apenas a troca dos componentes de proteção danificados é realizada, sem a necessidade de substituir por completo a unidade de monitoramento, reduzindo os custos de manutenção.

A alimentação do circuito é fornecida pelo módulo conversor automático de tensão CA para CC, também conhecido como conversor AC-DC. O modelo utilizado é o WX-DC12003 ilustrado na figura 18, sua entrada pode variar de 50 V_{AC} até 270 V_{AC} , fornecendo +5 V_{DC} e 3.5 *W* de potência em sua saída. Este módulo possui o sistema de saída isolado opto e galvanicamente do sistema de entrada.

Figura 18 – Módulo AC-DC WX-DC12003.

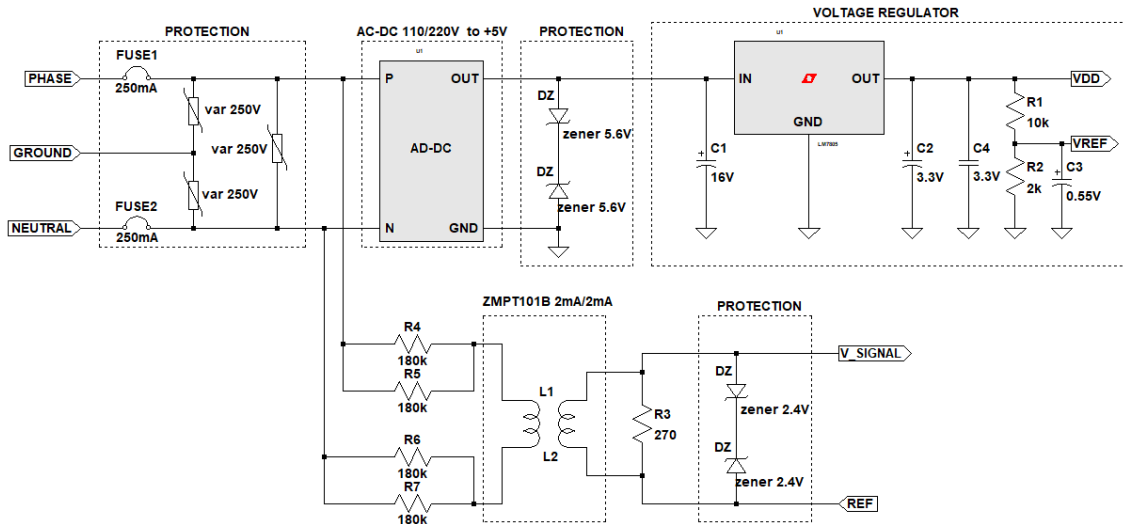


Fonte: Próprio Autor.

Após a passagem pelo circuito de proteção, a fase e o neutro da rede elétrica são inseridos do conversor AC-DC e um ramo é utilizado como amostra para obter o sinal senoidal da rede, através do sensor de tensão TP (ZMPT101B). Também foi adicionado

um regulador de tensão para alimentar os demais componentes e o fornecimento de uma tensão de referência. O circuito de proteção, alimentação e captura do sinal de tensão podem ser vistos na figura 19.

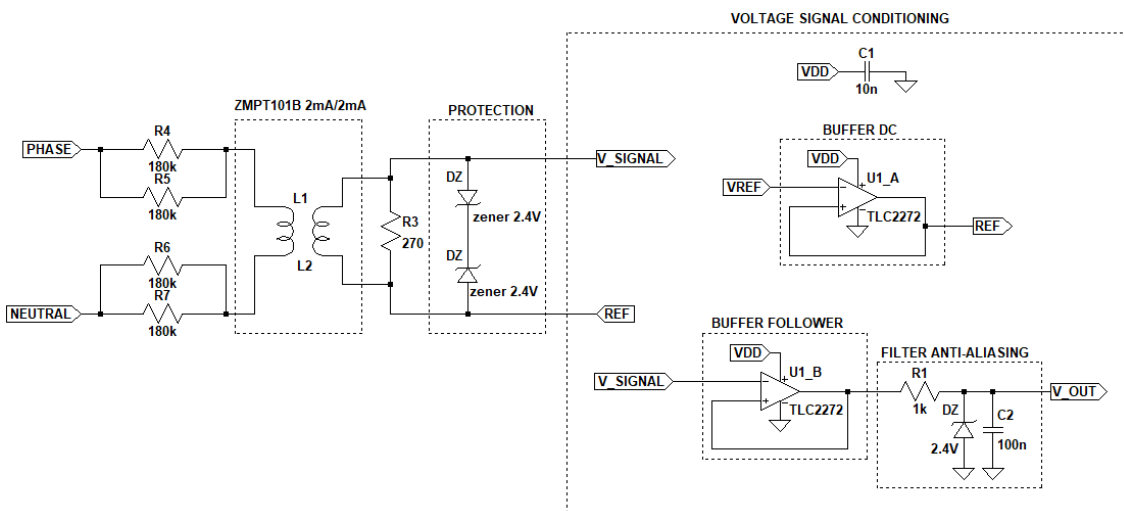
Figura 19 – Circuito de proteção, alimentação e sinal de tensão.



Fonte: Próprio Autor.

A etapa do circuito que realiza o condicionamento do sinal de tensão da rede elétrica, figura 20, possui como entrada a amostra do sinal senoidal reduzida pelo TP e uma referência de 550 mV , fornecida por um Amp Op na configuração *buffer*, para elevar o seu nível DC. Logo após, o sinal é isolado com um *buffer* seguidor de tensão e limitada sua banda de frequência por um filtro *Anti-Aliasing* analógico. Os amplificadores operacionais definidos para o circuito são do tipo *Rail-to-Rail*, modelo TLC2272, pois são capazes de operar com uma baixa tensão de alimentação, sendo 2.2 V simétrica ou $\pm 2.2\text{ V}$ assimétrica.

Figura 20 – Circuito de condicionamento do sinal de tensão.

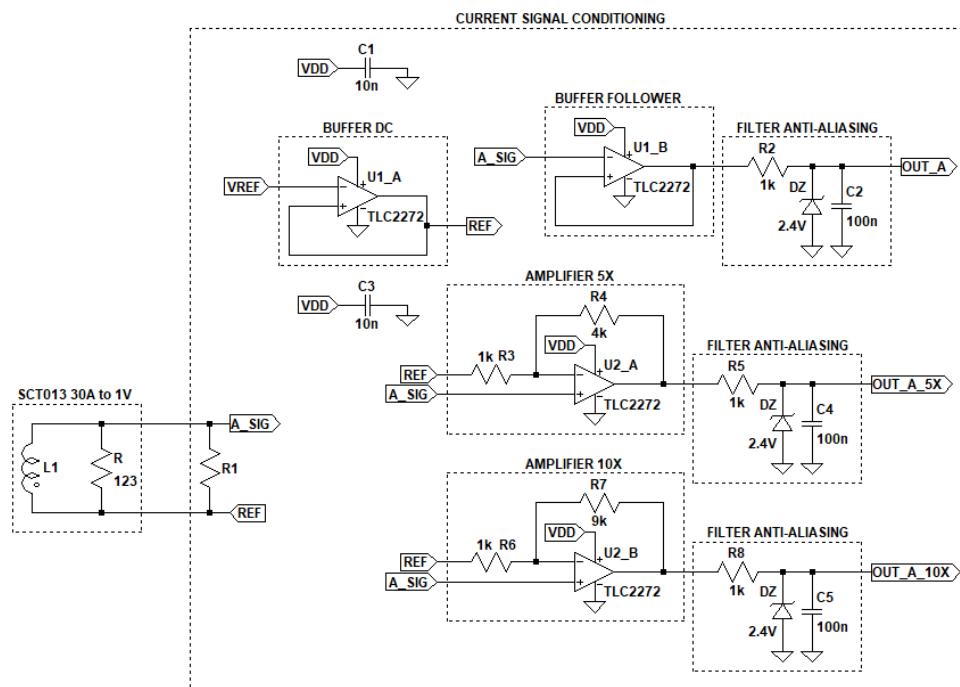


Fonte: Próprio Autor.

O circuito de condicionamento do sinal de corrente elétrica, figura 21, foi projetado de forma a obter maior precisão nas leituras. Possui como entrada a amostra do sinal da corrente (proveniente do sensor TC) e a referência de 550 mV , fornecida por um *buffer*, para elevar o nível DC. O sinal é então distribuído para três amplificadores, um na configuração seguidor de tensão e os outros dois na configuração amplificador não inversor com ganhos de 5 e 10 vezes, garantindo acuracidade nas leituras. Todas as três saídas passam por filtros *Anti-Aliasing* e os amplificadores operacionais definidos nesta etapa são todos modelo TLC2272.

Os níveis DC adicionados nos circuitos condicionadores foram necessários para a correta leitura no ADC do microcontrolador ESP32, pois os sinais senoidais de tensão e corrente são naturalmente centrados em 0 V , o que ocasionam valores positivos e negativos. Uma vez tratados, passaram a fornecer somente valores positivos centrados em 550 mV , com 1 V_{pp} de amplitude máxima.

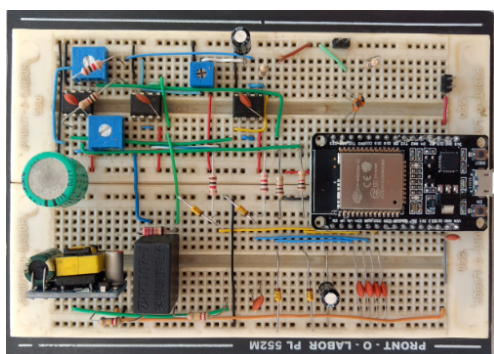
Figura 21 – Circuito de condicionamento do sinal de corrente.



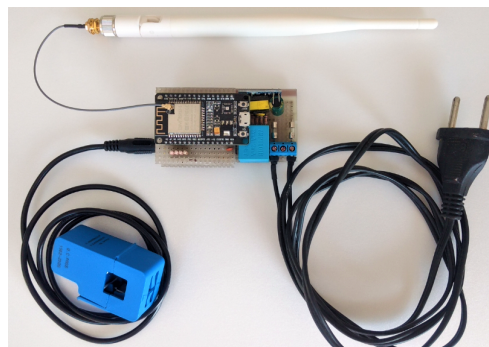
Fonte: Próprio Autor.

Após a modelagem e simulação, o circuito foi montado em *pront-o-board* para constatar o funcionamento com valores reais da rede elétrica afim de ajustar e aferir o modelo proposto, conforme figura 22 (a). Posterior a validação, também foi fabricado de forma manual a *PCB (Printed Circuit Board)* referente ao projeto, figura 22 (b).

Figura 22 – Circuito para testes e *PCB*.



(a) Circuito em *pront-o-board* para testes.

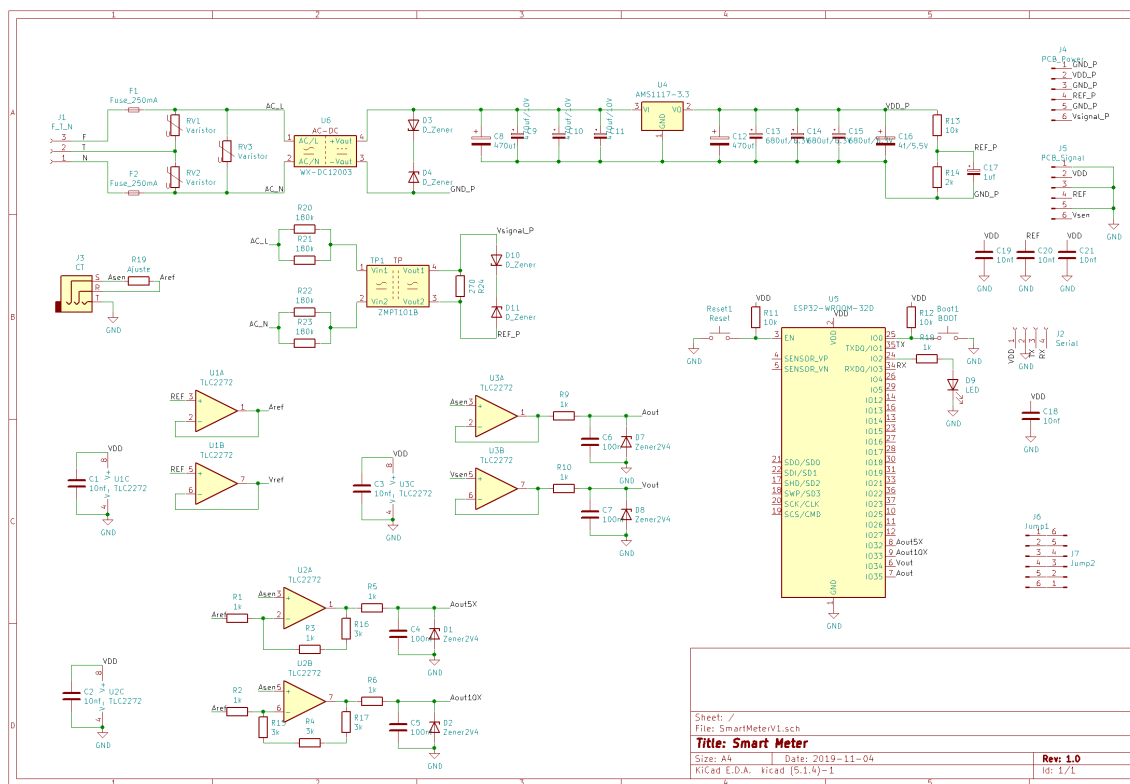


(b) Circuito em *PCB* pronto para uso.

Fonte: Próprio Autor.

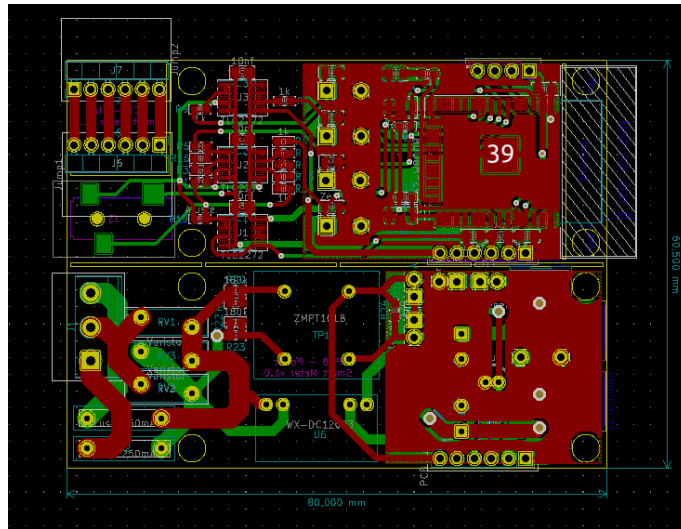
Utilizando uma ferramenta *CAD* para modelagem de circuitos, desenvolveu-se o esquema elétrico e a placa *PCB* levando em consideração uma possível produção industrial do *Smart Meter*. O projeto do circuito em *KiCad*, a *PCB* e uma visão em 3D podem ser vistos nas figuras 23, 24 (a) e 24 (b).

Figura 23 – Esquema elétrico completo do *Smart Meter* desenvolvido na ferramenta *KiCad*.

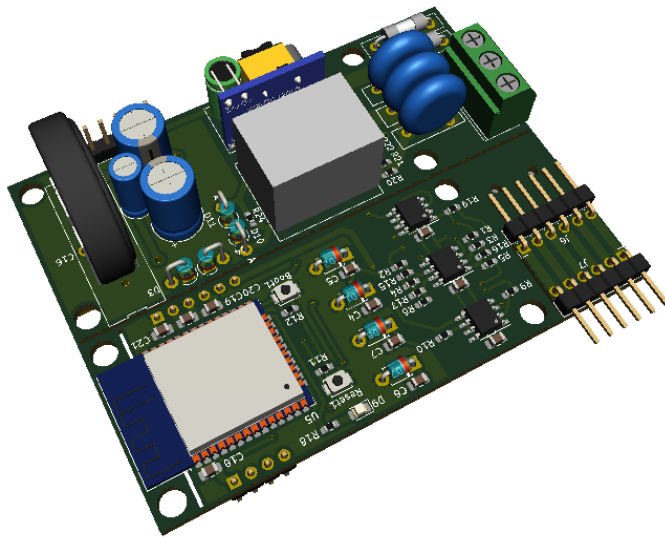


Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Projeto da *PCB* na ferramenta *KiCad*.



(a) *PCB* face superior.



(b) Vista 3D da *PCB* representando o circuito com os componentes.

Fonte: Próprio Autor.

Por fim, a aplicação *WEB* foi desenvolvida, em linguagem *HTML* com *JS* (*JavaScript*), e armazenada no servidor interno do medidor. Tal aplicação, tem como propósito facilitar o uso e interpretação dos dados pelos usuários finais do *Smart Meter*, através da comunicação sem fio, além de guardar o relatório das informações referentes aos últimos meses, levando em consideração o conceito *IoT* ao protótipo final.

Após estabelecida a comunicação com dispositivo via *wireless*, o usuário será direcionado à aplicação *Web Browser* e poderá visualizar todas as informações dos dados instantâneos, diário, mensal e histórico, além de ter a opção de modificar algumas configurações, como por exemplo: o valor do *quilowatt.hora* de acordo com sua região ou tarifação.

A aplicação recebeu o nome de *Smart Meter Energy v1.0* e possui um menu de opções na parte superior da tela, onde ficam disponíveis para acessar a qualquer instante enquanto a *interface* estiver em execução. Através do diagrama de caso de uso da figura 16, foram criadas as opções do menu com botões titulados por *NOW*, *TODAY*, *MONTH*, *HISTORIC* e *CHANGE*, sendo respectivamente os dados em tempo real, dados do dia atual, do mês atual, histórico dos meses anteriores que foram registrados e a opção de configuração do dispositivo.

Na aba *NOW* da aplicação, figura 25, o identificador [A] mostra a localização do menu, em [B] é informado a tensão eficaz instantânea, [C] a frequência da rede elétrica, em [D] um gráfico da tensão dos últimos 60 segundos, [E] a corrente eficaz, [F] o consumo total em *kWh*, [G] o custo total do mês vigente, [H] o gráfico da corrente dos últimos 60 segundos, [I] a potência ativa em *W*, [J] potência aparente *VA*, [K] potência reativa *VAR*, [L] fator de potência instantâneo e, em [M], o gráfico dos últimos 60 segundos. Os dados nesta aba são atualizados periodicamente a cada 1 segundo.

Figura 25 – Tela referente aos dados instantâneos.



Fonte: Próprio Autor.

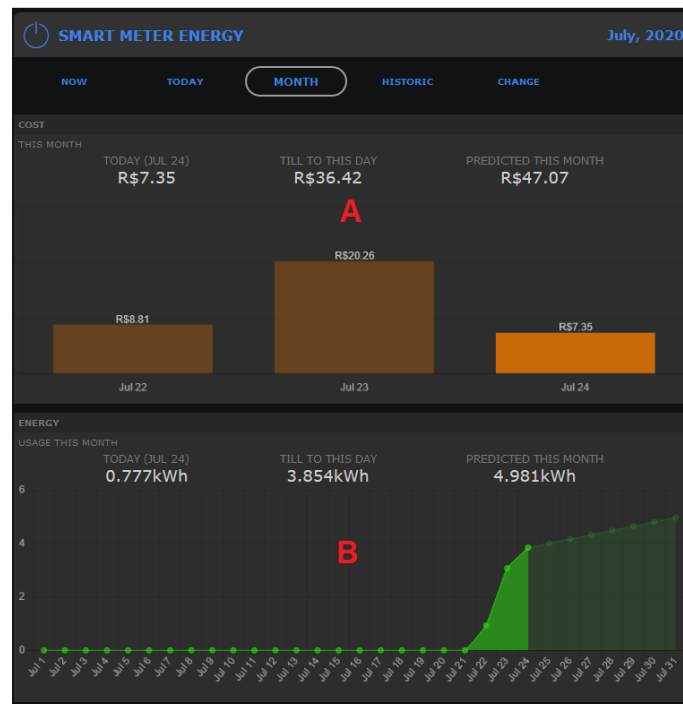
O registro dos valores diários podem ser visualizados pela aba *TODAY*, nela é possível verificar as medidas de tensão e corrente das últimas 24 horas por um gráfico na figura 26 (a), identificado com [A]. As medidas de potência ativa, em [B], também são registrados no mesmo intervalo, além da potência instantânea por [C].

Para uma análise comparativa, em [D] são mostrados os custos do dia anterior e atual, contemplado com uma porcentagem de acréscimo ou decréscimo entre os dois dias de forma dinâmica. Já em [E] é realizada uma análise estatística do consumo diário, informando os gastos das últimas horas e apresentando uma perspectiva do consumo total para o final do dia.

Figura 26 – *Smart Meter Energy v1.0* nas abas *TODAY* e *MONTH*.



(a) Tela da aplicação que apresenta os dados diários.



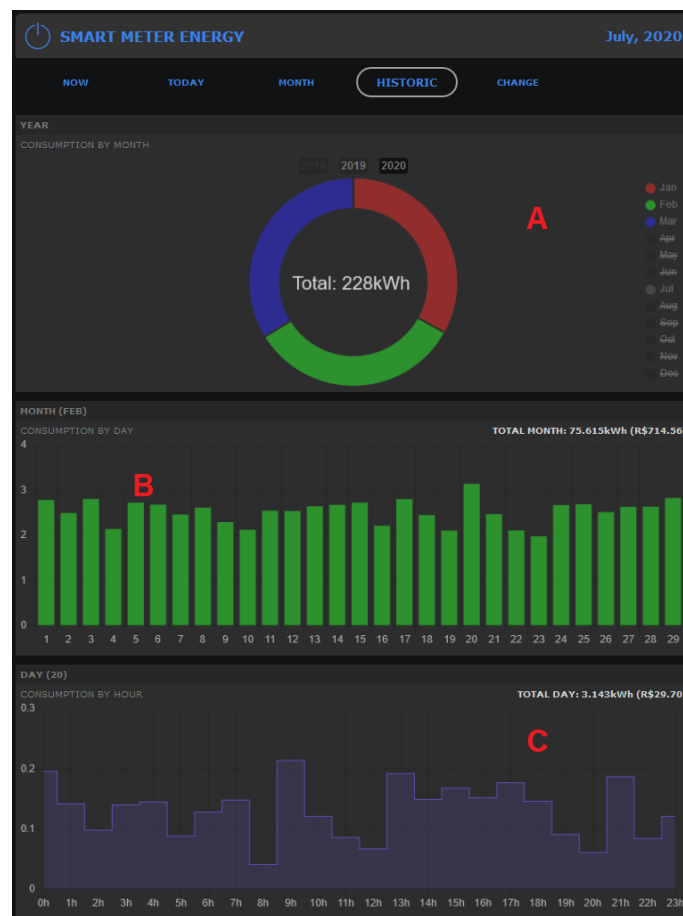
(b) Tela de apresentação dos dados mensais.

Fonte: Próprio Autor.

Os dados de consumo e custos de cada dia do mês atual estão acessíveis pela aba *MONTH*, nela os usuários podem verificar o custo total mensal até o momento, o custo diário e uma perspectiva até o final do mês corrente, também o consumo de energia de forma parcial e estatística, em [A] e [B] na figura 26 (b).

O *Smart Meter* tem capacidade de armazenar os dados históricos de consumo dos últimos 3 anos, estes relatórios são acessados pela aba *HISTORIC* do menu. Em [A], da figura 27, é possível selecionar o ano e filtrar os meses que se deseja analisar, além de apresentar o custo total dos meses escolhidos. Após selecionado um dos meses, um gráfico com os gastos e consumos de cada dia é renderizado em [B], o mesmo ocorre para o dia do mês selecionado, informando o consumo por hora em [C].

Figura 27 – Tela referente aos dados históricos.



Fonte: Próprio Autor.

A configuração do dispositivo é realizada através da aba *CHANGE*, por ela são informados a versão e data de compilação do *firmware* instalado no *Smart Meter*, destacados por [A] na figura 28, além da quantidade de memória ocupada e livre em [B].

O usuário ainda pode alterar a senha e *login* da rede de comunicação *WiFi* própria do dispositivo através dos campos marcados com [C], seguido do nome e senha da rede local no qual o protótipo pode se conectar (campos em [D]). Como a tarifa do custo da

energia elétrica pode variar de uma região para outra, foi implementado um campo onde é preenchido o valor por kWh , localizado em [E]. Ao final, em [F], é possível atualizar o *firmware/software* via *OTA*, salvar as alterações e reiniciar o medidor.

Figura 28 – Tela de configurações do *Smart Meter*.



Fonte: Próprio Autor.

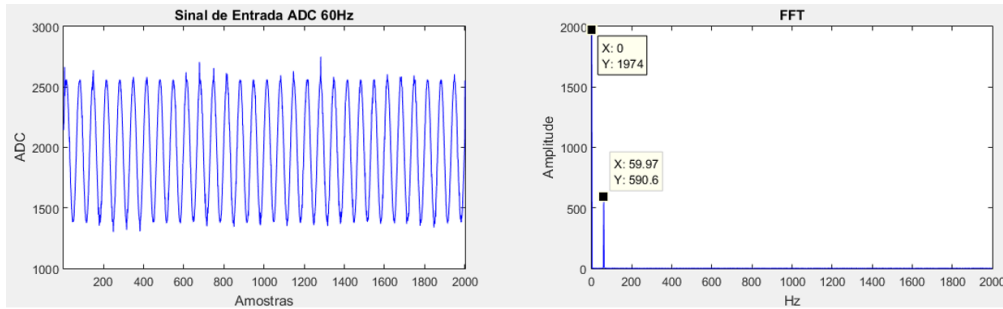
5 Resultados e Discussões

Antes de realizar o processo de calibração do *Smart Meter* se fez necessário validar os sinais de tensão e corrente que são tratados pelos filtros digitais implementados no microcontrolador. Para efeito de aprovação utilizou-se um gerador de sinais (modelo *Tektronix AFG3021B*) para introduzir ondas senoidais com frequências distintas na entrada do circuito, após o tratamento destes sinais as entradas e saídas dos filtros digitais foram enviados via porta serial para serem analisadas com auxílio da ferramenta *MATLAB*.

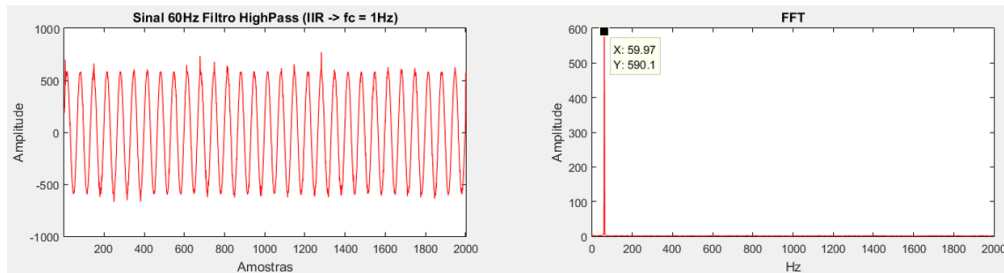
O primeiro teste serviu para verificar o funcionamento do filtro passa-altas, tipo *IIR*, de primeira ordem com frequência de corte em 1 Hz , para remover o nível DC do sinal. Utilizando o gerador foi aplicada uma onda senoidal de 60 Hz com amplitude de 100 mV_{pp} e 200 mV de *offset*. A entrada do sinal e sua *FFT* (*Fast Fourier Transform*) foram plotadas conforme figura 29 (a), enquanto a saída do filtro e sua *FFT* na figura 29 (b). Pode-se notar através das transformadas que a frequência em 0 Hz foi atenuada na saída, validando-se esta parte do sistema.

O segundo teste foi executado para constatar o funcionamento do filtro passa-baixas, tipo *FIR*, de vigésima ordem com frequência de corte em 1300 Hz , para remover possíveis ruídos indesejáveis. Foi aplicada uma onda senoidal de 1800 Hz com amplitude de 100 mV_{pp} e 200 mV de *offset*. A entrada e saída do sinal, com suas respectivas *FFT*, foram plotadas conforme figura 30 (a) e figura 30 (b). Pode-se notar através das transformadas que a frequência em 1800 Hz e o nível DC foram atenuados na saída, validando-se o passo seguinte deste sistema.

Figura 29 – Filtro *IIR* 1 Hz - Remover nível DC.



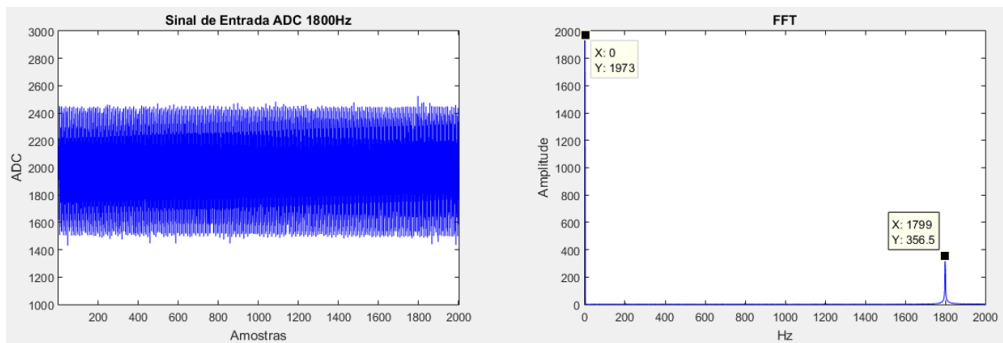
(a) Entrada do sinal e presença do nível DC na *FFT*.



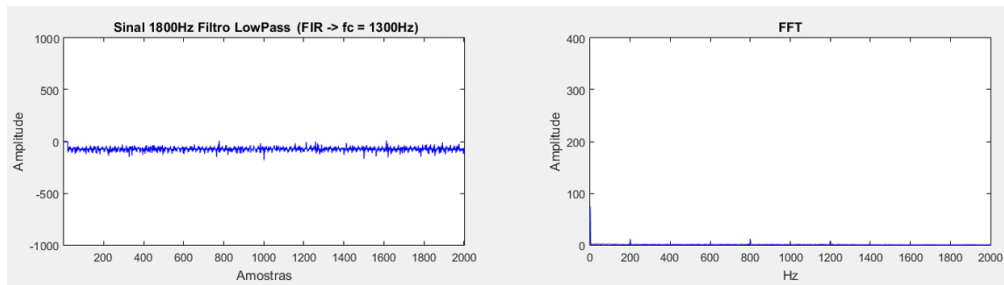
(b) Saída do sinal e atenuação do nível DC na *FFT*.

Fonte: Próprio Autor.

Figura 30 – Filtro *FIR* 1300 Hz - Remover ruídos.



(a) Entrada do sinal, presença do nível DC e frequência de 1800 Hz na *FFT*.

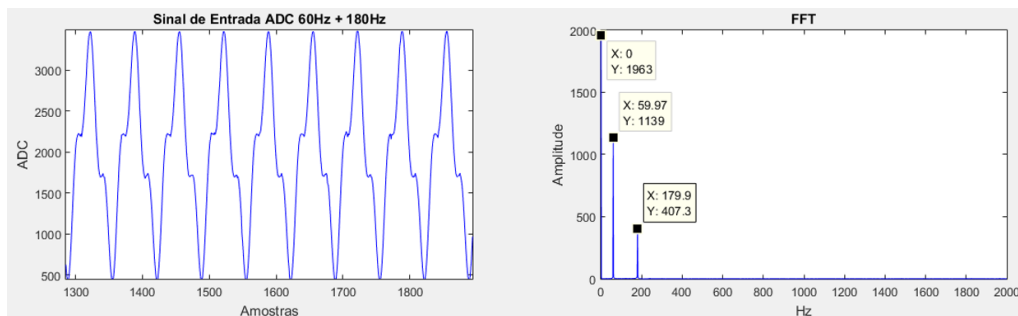


(b) Saída do sinal e atenuação do nível DC e da frequência de 1800 Hz na *FFT*.

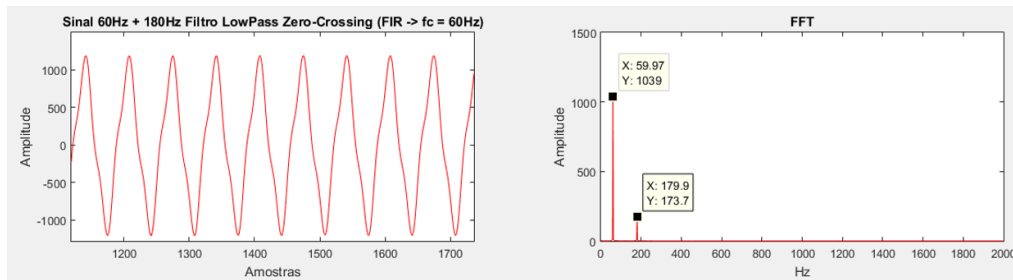
Fonte: Próprio Autor.

O último teste foi prosseguido com o filtro passa-baixas, tipo *FIR*, de vigésima ordem com frequência de corte em 60 *Hz*, para separar a harmônica fundamental da rede elétrica e detectar o *Zero-Crossing*. O sinal senoidal inserido continha a frequência de 60 *Hz* (fundamental) e a terceira harmônica (180 *Hz*) com amplitude de 100 mV_{pp} e 200 *mV* de *offset*. Pode-se notar, através das Transformadas Rápidas de *Fourier*, que a frequência em 180 *Hz* e o nível DC foram atenuados, permanecendo a frequência fundamental na saída. Desta maneira validou-se todo sistema de filtros digitais proposto ao dispositivo de monitoramento. A entrada e saída do sinal, com suas respectivas *FFT*, foram plotadas conforme figura 31 (a) e figura 31 (b).

Figura 31 – Filtro *FIR* 60 *Hz* - Extrair a frequência fundamental.



(a) Entrada do sinal, presença do nível DC e das frequências de 60 *Hz* e 180 *Hz* na *FFT*.



(b) Saída do sinal e atenuação do nível DC e da terceira harmônica na *FFT*.

Fonte: Próprio Autor.

Com a garantia de funcionamento no processamento digital dos sinais, o principal objetivo na próxima etapa seria determinar os valores numéricos das grandezas medidas, mas não basta somente registrar os resultados, a confiabilidade das medições precisa ser aferida. No tratamento de dados experimentais são empregados métodos estatísticos a fim de estimá-los, porém as medidas sofrem influências de um grande número de fatores devido à natureza de qualquer fenômeno em estudo, assim como aos próprios processos que acompanham as medidas, sendo impossível analisar todos os fatores que atuam sobre eles, resultando destas apenas valores aproximados (Piacentini et al., 2013).

O desenvolvimento do *Smart Meter* foca em medições e resultados com precisão, para isso a calibração e aferição das medidas diretas de tensão e corrente, e medidas indiretas das potências e consumo, foram validadas por método comparativo utilizando voltímetro e amperímetro, como equipamento calibrado, com erros menores que 1%. Além disso, na média dos resultados finais foi considerado o erro total (inclusão do erro aleatório provável e erro de escala), através das seguintes equações:

$$E_t = \pm \sqrt{E_a^2 + E_{esc}^2} \quad (17)$$

$$E_a = \pm t \cdot \frac{\delta}{\sqrt{n}} \quad (18)$$

$$E_{esc} = \pm MDE \quad (19)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n - 1}} \quad (20)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (21)$$

Sendo E_t o erro total, E_a o erro aleatório provável, E_{esc} o erro de escala, MDE a menor divisão de escala, t o coeficiente de *Student*, δ desvio padrão, \bar{M} a média das medições, M_i as medidas e n o número de medições para cada ponto de referência.

No ajuste das leituras de tensão *RMS* (do inglês *Root Mean Square*), foram comparados os valores nominais medidos da rede elétrica, 120 V e 220 V, por um multímetro *Agilent*, modelo *U1242B*, e os valores do *Smart Meter*, como segue na tabela 1.

Tabela 1 – Medidas de tensão *RMS* do multímetro *U1242B* e *Smart Meter*.

Tensão Nominal	Multímetro	<i>Smart Meter</i>
120V	119.7V	119.8V
120V	119.8V	120.0V
120V	120.0V	120.0V
Média (Erro)	119.8V ($\pm 1\%$)	119.9V ($\pm 0.1V$)
220V	222.2V	222.2V
220V	222.1V	222.2V
220V	222.2V	222.2V
Média (Erro)	222.2V ($\pm 1\%$)	222.2V ($\pm 0.1V$)

Fonte: Próprio Autor.

Utilizando-se dos mesmos métodos, foram ajustados os valores de corrente *RMS* da rede elétrica, através do consumo de uma, duas e três lâmpadas incandescentes de valores nominais 220 V / 60 W, uma resistência (aquecedor) de 220 V / 300 W e outra resistência (torradeira elétrica) de 220 V / 800 W com o objetivo de aferir as leituras do *Smart Meter* com os valores medidos pelo multímetro.

A utilização de lâmpadas incandescentes e as resistências são uma ótima escolha para verificar o consumo de corrente, pois estes dispositivos elétricos podem ser considerados resistores, sendo classificados como puramente resistivos. As medições da corrente elétrica consumida pelos equipamentos são apresentadas na tabela 2.

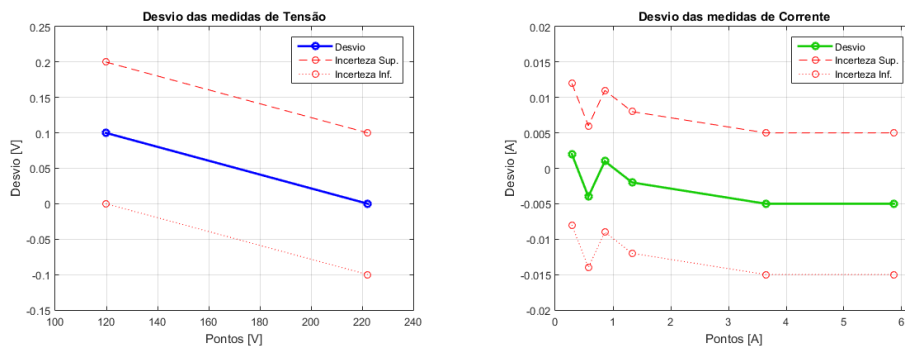
Tabela 2 – Medidas de corrente *RMS* do multímetro *U1242B* e *Smart Meter*.

Equipamento	Multímetro	<i>Smart Meter</i>
1 - Lâmpada	0.288A	0.29A
1 - Lâmpada	0.288A	0.29A
1 - Lâmpada	0.287A	0.29A
Média (Erro)	0.288A ($\pm 1\%$)	0.29A ($\pm 0.01A$)
2 - Lâmpadas	0.574A	0.57A
2 - Lâmpadas	0.574A	0.57A
2 - Lâmpadas	0.574A	0.57A
Média (Erro)	0.574A ($\pm 1\%$)	0.57A ($\pm 0.01A$)
3 - Lâmpadas	0.859A	0.86A
3 - Lâmpadas	0.860A	0.86A
3 - Lâmpadas	0.859A	0.86A
Média (Erro)	0.859A ($\pm 1\%$)	0.86A ($\pm 0.01A$)
1 - Aquecedor	1.332A	1.33A
1 - Aquecedor	1.329A	1.33A
1 - Aquecedor	1.335A	1.33A
Média (Erro)	1.332A ($\pm 1\%$)	1.33A ($\pm 0.01A$)
1 - Torradeira	3.653A	3.65A
1 - Torradeira	3.648A	3.63A
1 - Torradeira	3.635A	3.63A
Média (Erro)	3.645A ($\pm 1\%$)	3.64A ($\pm 0.01A$)
Todos	5.879A	5.86A
Todos	5.865A	5.86A
Todos	5.851A	5.86A
Média (Erro)	5.865A ($\pm 1\%$)	5.86A ($\pm 0.01A$)

Fonte: Próprio Autor.

Os gráficos de desvios das medidas nos pontos aferidos de tensão e corrente utilizados nos testes, juntamente com os limites de incertezas, podem ser vistos abaixo.

Figura 32 – Gráficos de calibração da tensão e corrente do *Smart Meter*.



(a) Desvios e incertezas da tensão *RMS*. (b) Desvios e incertezas da corrente *RMS*.

Fonte: Próprio Autor.

Como as demais grandezas apresentadas pelo sistema (potências e consumo) são medidas indiretas com base nas medidas de tensão e corrente, o erro de tais variáveis pode ser assumido como a propagação dos erros das medidas diretas aferidas.

Por fim, o dispositivo proposto apresentou valores muito precisos, com no máximo uma divisão de escala no desvio de medição e uma divisão de escala para mais ou para menos no erro de medição (incerteza), tanto para os valores de tensão e corrente aferidos, permanecendo dentro do erro máximo permissivo do requisito de medição.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

Ao decorrer do projeto e processo de desenvolvimento, percebeu-se a necessidade de tratar com muito cuidado fatores que direcionassem o dispositivo de medição a atender os requisitos, bem como, a construção de um equipamento interativo, de fácil manuseio pelo usuário final, além de conferir ao medidor certa precisão quanto aos dados apresentados.

O sistema de monitoramento de energia atingiu todos os requisitos aqui estabelecidos, mas como todo bom projeto sempre existem alterações, inovações e incrementos que agregam mais características e evoluem o produto. Também, os usuários finais poderiam contribuir através de *feedbacks*, além de explorar o *design* da interface e inferirem se os dados mostrados são de fato relevantes.

Uma inovação a ser aplicada ao sistema é a comunicação entre eles, assim os dados poderiam ser transmitidos através de uma rede própria (rede *mesh*, por exemplo), até um certo destino. O periférico *WiFi*, com rádio *802.11g SoC (System-On-Chip)*, é possível ser utilizado para este tipo de infraestrutura, porém é limitado pela capacidade de transmissão de dados, logo o indicado seria o padrão *802.11s*, sendo necessário instalar um módulo externo.

Em um contexto geral, esta tecnologia serviria para repassar os dados de cada *Smart Meter* instalado nas residências, até as concessionárias de energia, eliminando atrasos, erros nas leituras, agilizando a fatura do serviço e contribuindo para a qualidade de vida dos envolvidos.

Um dos possíveis incrementos que podem ser adicionados, é a utilização de redes neurais artificiais para identificar quais equipamentos estão consumindo recursos no momento. Dessa forma, os equipamentos e a respectiva utilização da energia poderiam ser classificados por grupos, contribuindo na quantidade de informações disponíveis aos usuários, facilitando e auxiliando na sua tomada de decisão com vistas à eficiência energética.

Para tornar um produto mínimo viável, resta acomodar o sistema elétrico (*hardware*) em uma *case* no formato padrão para instalação em quadros de distribuição de energia residencial. O desenvolvimento do projeto da *PCB* foi construído levando em consideração essa característica, logo, o *hardware* já possui dimensões que favorecem esta evolução do projeto.

Outro teste a ser realizado seria a instalação do equipamento em campo, pois os dados coletados para este artigo são apenas medidas experimentais. A implementação em uma residência por alguns meses poderia fornecer estatísticas reais do benefício que o *Smart Meter* traria na contribuição para a economia de energia.

De forma geral, o *Smart Meter* atingiu os resultados esperados, apresentando informações importantes sobre a utilização da energia elétrica, com dados instantâneos,

transparentes e históricos de consumo. Projetado com componentes de baixo custo, sem deixar de lado a qualidade e precisão, foi incorporado o conceito *IoT*, tornando o equipamento acessível pelo seu preço final (menos de \$ 25,00), o que faz viável economicamente a instalação nas residências. Sem mais, é um dispositivo indispensável nos dias atuais no que diz respeito ao monitoramento e economia de energia elétrica.

Referências

ABESCO. *Brasil desperdiça meia Itaipu por ano*. 2018. Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/novidade/brasil-desperdica-meia-itaipu-por-ano/>. Acesso em: 15 Jul. 2020. Citado na página 3.

ABESCO. *Mais energia, menos economia*. 2018. Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/novidade/mais-energia-menos-economia/>. Acesso em: 15 Jul. 2020. Citado na página 3.

Al-Ali, A. R. et al. An iot-based smart utility meter. *2018 2nd International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, p. 80–83, Aug 2018. Citado na página 14.

ANEEL. *Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição*. 2020. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acesso em: 15 Jul. 2020. Citado na página 3.

Arif, A. et al. Experimental study and design of smart energy meter for the smart grid. *2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, p. 515–520, March 2013. Citado na página 5.

BRASIL. *Decreto nº 9.854, de 25 de junho de 2019*. 2019. Institui o Plano Nacional de Internet das Coisas e dispõe sobre a Câmara de Gestão e Acompanhamento de Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D9854.htm. Acesso em: 23 Set. 2019. Citado na página 4.

BUSINESS, E. . I. S. Department for. *Smart Metering Implementation Programme - A report on progress of the realisation of smart meter consumer benefits*. 2019. GOV.UK. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/830668/smart-meters-benefits-realisation.pdf. Acesso em: 25 Ago. 2020. Citado na página 4.

Carratù, M. et al. Smart power meter for the iot. *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, p. 514–519, July 2018. Citado na página 15.

CUNHA, J. *Desperdiço consome 10% da energia elétrica no país, diz associação*. 2015. Folha de São Paulo. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/02/1586778-desperdicio-consome-10-da-energia-eletrica-no-pais-diz-associao.shtml>. Acesso em: 08 Set. 2019. Citado na página 3.

Depuru, S. S. S. R. et al. Smart meters for power grid — challenges, issues, advantages and status. *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, p. 1–7, March 2011. Citado na página 5.

EPE. *Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional) - 1995-2019*. 2019. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>. Acesso em: 15 Jul. 2020. Citado na página 3.

FILHO, S. M. *Medição de energia elétrica*. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1997. Citado na página 9.

GUADAGNIN, C. *De 2011 a 2015, Brasil desperdiçou energia suficiente para um ano de consumo*. 2016. Gazeta do Povo. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/de-2011-a-2015-brasil-desperdicou-energia-suficiente-para-um-ano-de-consumo-8bnk42j8ibd25of8e9yiw5h1/>. Acesso em: 08 Set. 2019. Citado na página 3.

HAYASHI, R. *Artigo: Automação por meio de medidores inteligentes de energia elétrica permite adequação das distribuidoras à Tarifa Branca*. 2018. Editora Brasil Energia. Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/artigo-automacao-por-meio-de-medidores-inteligentes-de-energia-eletrica-permite-adequacao-das-distribuidoras-a-tarifa-branca/>. Acesso em: 08 Set. 2019. Citado na página 4.

Hlaing, W. et al. Implementation of wifi-based single phase smart meter for internet of things (iot). *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, p. 1–4, March 2017. Citado na página 14.

MARKUS, O. *Circuitos Elétricos: Corrente Contínua e Corrente Alternada*. 9. ed. São Paulo: Editora Érica, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 6, 7 e 8.

Nilsson, J. W.; Reidel, S. A. *Circuitos Elétricos*. 8. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

Oppenheim, A. V.; Schaffer, R. W. *Processamento em Tempo Discreto de Sinais*. 3. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

Owen, G.; Ward, J. *Smart Meters : Commercial, Policy and Regulatory Drivers*. 2006. Sustainability First. Disponível em: <https://www.sustainabilityfirst.org.uk/images/publications/other/smart%20meters%20pdf%20version.pdf>. Acesso em: 23 Set. 2019. Citado na página 5.

Piacentini, J. J. et al. *Introdução ao Laboratório de Física*. 5. ed. Santa Catarina: Editora UFSC, 2013. Citado na página 32.

Saha, S. et al. Design and implementation of iot based smart energy meter. *2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*, p. 19–23, Dec 2018. Citado na página 14.

Sedra, A. S.; Smith, K. C. *Microeletrônica*. 5. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

SENA, G. *Medidor de consumo de energia elétrica com acesso local e remoto usando plataforma ESP8266*. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pampa, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.

SIMMER, A. C. S. *Análise comparativa de algumas estruturas de filtros digitais de segunda ordem imunes a ciclos limite*. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Espírito Santo, 1994. Citado na página 12.

Thomazini, D.; Albuquerque, P. U. B. *Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações*. 8. ed. São Paulo: Editora Érica, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.

TRANSFORMADORES, U. *O que é um transformador elétrico?* 2019. União Transformadores. Disponível em: <https://www.transformadoresuniao.com.br/post/o-que-e-um-transformador>. Acesso em 20 Jul. 2020. Citado na página 10.

Vangelista, L.; Dell'Anna, L.; Palazzoli, P. A battery lifetime comparison between lorawan and wireless mbus smart meters. *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, p. 1–3, June 2019. Citado na página 15.

XI, Z. M. L. *ZMPT101B Current-Type Voltage Transformer*. 2019. ZE MING LANG XI. Disponível em: <https://www.micro-transformer.com/2ma-2ma-voltage-transformer-ZMPT101B.html>. Acesso em: 20 Jul. 2020. Citado na página 18.

YHDC. *Split Core Current Transformer*. 2019. YHDC 1992. Disponível em: <http://en.yhdc.com/product/SCT013-401.html>. Acesso em: 20 Jul. 2020. Citado na página 18.