

Monitoramento Inteligente do Consumo de Energia Elétrica em Residências Utilizando Recursos de IoT

Anais do Computer on the Beach

Eliel Marcos Rocha Romancini*
PPG em Energia e Sustentabilidade
Engenharia de Computação
Universidade Federal de Santa
Catarina
Araranguá, SC, Brasil
eliel.romancini@posgrad.ufsc.br

Vinicius Rodrigues Zanon
PPG em Engenharia Biomédica
Engenharia de Computação
Universidade Federal de Santa
Catarina
Araranguá, SC, Brasil
vinicius.zanon@posgrad.ufsc.br

Analúcia Schiaffino Morales
PPG em Energia e Sustentabilidade
Engenharia de Computação
Universidade Federal de Santa
Catarina
Araranguá, SC, Brasil
analucia.morales@ufsc.br

Fabrizio de Oliveira Ourique
PPG em Energia e Sustentabilidade
Engenharia de Computação
Universidade Federal de Santa
Catarina
Araranguá, SC, Brasil
fabricio.ourique@ufsc.br

Ricardo Moraes
PPG em Energia e Sustentabilidade
Engenharia de Computação
Universidade Federal de Santa
Catarina
Araranguá, SC, Brasil
ricardo.moraes@ufsc.br

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 in the management of energy resources. It is mandatory that homes are equipped with energy meters, however, in Brazil, almost all users only have information on the total energy consumption available - often estimated at the end of each month. This article proposes a prototype for electric energy monitoring of the Smart Meter type, with the IoT concept. In the current version, the system implements the following features: measurement of voltage, current, frequency, calculation of active, reactive, apparent power, power factor, energy consumption, real-time total cost and recording of this data in memory and in the cloud. The developed system uses WiFi communication technology, so that data can be transmitted and interpreted by devices that work with this standard, through a remote WEB application hosted on an AWS service. The system requirements were met when designing the prototype to provide accurate current and voltage measurements as well as providing instantaneous, transparent and historical consumption data on electrical energy usage.

KEYWORDS

Smart Meter, Energia Elétrica, IoT, Sistemas Embarcados, Serviços AWS

1 INTRODUÇÃO

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 correspondeu a 38% do total gerado neste período, sendo considerado o setor de maior consumo [1]. 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 [2], 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 [3], o equivalente a metade da produção de energia elétrica de Itaipu no mesmo período.

O governo incentiva e desenvolve programas nacionais que contribuem com a economia e a 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 [4]. 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 [5].

No entanto, os consumidores não possuem um mecanismo transparente para monitorar o quanto estão utilizando de maneira clara e instantânea, para modificarem seus comportamentos. O uso de medidores inteligentes, ou *Smart Meters*, podem auxiliar no processo de conscientização e redução do desperdício, contribuindo para a sustentabilidade econômica de muitas famílias. 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 [6].

Além disso, na última década surgiram novas tecnologias e ferramentas para o desenvolvimento de baixo custo de sistemas embarcados, agregando “inteligência” e comunicação sem fio em dispositivos e “coisas”, trata-se da Internet das Coisas (em inglês *Internet of Things* - IoT). Este é um termo que vem integrando uma quantidade enorme de equipamentos à Internet, não mais se limitando aos computadores e telefones celulares [7]. Trata-se de uma infraestrutura de rede global dinâmica composta de milhares de sensores, mecanismos e protocolos de comunicação interoperáveis, estruturas para análise e processamento de dados, e sincronização através de um sistema distribuído em nuvem [8].

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 [9].

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 consequente desperdício, uso excessivo e desnecessário da energia, incentivando o consumo consciente e contribuindo na redução da produção de energia para o setor.

A maioria dos dados de consumo monitorados em zonas residenciais são realizadas por medidores eletromecânicos onde a cada mês, a concessionária realiza a inspeção física (manual) para o cálculo do consumo total. Esta medição tradicional apresenta uma série de problemas, um deles é o trabalho intensivo que decorre do fato de cada medidor deve ser inspecionado individualmente pelos funcionários da concessionária, sujeito a erros, visto que essas leituras têm de ser feitas e comunicadas à central de faturação manualmente. Além disso, os sistemas de medição atuais não permitem que os proprietários vejam sua fatura e como ela se correlaciona com seu consumo até o final do ciclo de faturamento.

Com objetivo de fornecer uma alternativa aos consumidores, quanto ao uso de energia elétrica residencial e gestão de leituras das concessionárias, o presente artigo apresenta o 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 locais e na nuvem, o dispositivo permite a visualização dos valores de tensão (V), corrente (I), frequência (F), potência ativa (P), reativa (S), aparente (Q), fator de potência (FP), consumo (kWh) 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 seis seções. A segunda seção apresenta alguns trabalhos relacionados da literatura científica. Na seção 3, são apresentadas as questões relacionadas a modelagem do *Smart Meter*, enfatizando as funcionalidades que foram priorizadas no projeto em termos de *hardware*, *software* e aplicação. Na quarta seção, apresenta-se o protótipo e as funções da aplicação “*Smart Meter Energy v1.0*” acessada de forma remota. Os resultados e discussões, contemplando a validação dos filtros digitais e a conformidade instrumental do medidor, são apresentados na quinta seção. E por fim, na última seção as considerações finais seguidas das referências bibliográficas.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

A seguir são apresentados alguns trabalhos similares encontrados na literatura científica. Ressalta-se que alguns trabalhos monitoram outros parâmetros além da energia elétrica residencial.

No artigo apresentado pelos autores Saha et al. [10] foi projetado e implementado um *Smart Meter* baseado em IoT para monitorar o consumo de energia. Sensores transformador de potencial (TP) e transformador de corrente (TC) são utilizados para aquisição dos sinais elétricos, além de um Arduino para o processamento dos dados e um módulo WiFi ESP8266 para conexão ao roteador de acesso à Internet. A plataforma *ThingSpeak* foi usada para o serviço na nuvem, apresentando as medidas de V, I, P, S, FP e kWh sem registro histórico de dias anteriores.

Hlaing et al. [11] sugerem a implementação de um sistema de monitoramento para o uso diário da energia elétrica. O trabalho é focado, principalmente, em monitoramento do consumo com o conceito IoT, utilizando um módulo Arduino como medidor e um módulo ESP8266 para realizar a comunicação com aplicativo WEB capaz de ler e enviar automaticamente os dados para que os usuários consultem a leitura atual do medidor de energia fornecendo apenas o consumo em kW e kVar.

Os autores de “*An IoT-Based Smart Utility Meter*” [12], propõem o desenvolvimento e testes de um sistema que reúne em um único dispositivo o monitoramento de medidores já existentes para o consumo de eletricidade, de água e de gás, empregando IoT. O sistema utiliza um Raspberry Pi 3 como unidade de processamento e possui uma rede única para ser programada remotamente e disponibilizar o consumo para os prestadores de serviços públicos. Os consumidores finais podem acessar através de um computador pessoal ou um telefone móvel e verificar o consumo atual total em kW para a leitura de energia.

Carratù et al. [13] descrevem uma solução para medição de energia elétrica, integrada na mesma infraestrutura de comunicação de gás e água, similar ao trabalho anterior, porém o foco não é o usuário final, e sim as concessionárias. Descrevem métricas e detalhes de *hardware* e utilizam um módulo de medição de tensão e corrente (ADE7913), uma unidade de processamento (STM32) e o uso do protocolo WM-BUS para a comunicação de curto alcance

entre medidores e uma espécie de *gateways* chamados “Concentradores”. Essa abordagem foi utilizada para aproveitar infraestruturas de medições avançadas (AMI) em cidades inteligentes.

No presente artigo, enfatiza-se o desenvolvimento e uso de um medidor inteligente de eletricidade que utiliza apenas um módulo de processamento (ESP32) para realizar as medições, fornecer aplicação local, armazenar e enviar os dados (por MQTT) para aplicação WEB através de comunicação sem fio com serviços AWS (AWS IoT Core, DynamoDB e Virtual Machine EC2), para acesso de usuários e serviços públicos.

Além do registro de dados na nuvem, o medidor possibilita armazenar um histórico de até 3 anos no próprio dispositivo, configurando o modo de registro (instantâneo, diário e mensal) podendo ser consultado de forma fácil a qualquer momento. Ainda apresenta menor custos com quantidade reduzida de módulos para desenvolvimento do *hardware*, fornecendo uma gama extensa de dados (V, I, F, P, S, Q, FP, kWh, custos, alerta de limite diário e mensal atingidos), que podem servir na análise de qualidade de energia para as distribuidoras e órgãos fiscalizadores e, também, *feedback* de consumo para os usuários residenciais. Por fim, a integração de *hardware* e *software*, possibilitam boa precisão das medidas por utilizarem métodos robustos de filtragens digitais e amplificação do sinal de corrente com administração por máquina de estados implementada no próprio dispositivo.

3 MODELAGEM DO MEDIDOR INTELIGENTE

O medidor inteligente, ou *Smart Meter*, foi modelado a partir de premissas baseadas em requisitos funcionais e não funcionais do sistema, mapeados em diagramas de blocos, de comunicação, máquina de estados e circuitos elétricos. Foram definidos nove requisitos funcionais, dos quais destacam-se a capacidade do dispositivo de operar em tensão monofásica bivolt, a forma não-invasiva de como será adquirido os dados da rede elétrica, informar remotamente o consumo de energia e valor monetário, além de arquivar o histórico desses valores. Além disso, ainda foram definidos as formas de interação por rede sem fio e a *interface* de acesso às informações do dispositivo.

Foram definidos quatorze requisitos não funcionais, dos quais é possível destacar: a proteção contra surtos de tensões na rede elétrica (através de fusíveis e varistores), a capacidade do *Smart Meter* de obter a alimentação da própria rede elétrica que estiver instalado, além do acoplamento em painéis de distribuição. O dispositivo deve operar na faixa de frequência de 2.4 GHz, utilizando protocolo de comunicação IEEE 802.11b/g/n (WiFi), para acesso remoto em dispositivos *Smartphones* e *Laptops*. Também, o sistema deve oferecer uma *interface* de visualização dos dados para operar em dispositivos com sistemas operacionais distintos, necessitando apenas de um aplicativo de navegação *Browser* para seu acesso.

Os requisitos de *hardware* também foram modelados nesta etapa, apontando a necessidade de utilizar o microcontrolador ESP32, se destacando, principalmente, pelo processamento *dual-core*, memória *flash* e periféricos de comunicação sem fio WiFi *on-board*. O sensor SCT-013 é usado para a aquisição do sinal de corrente elétrica de forma não-invasiva, suportando até 30 A. E o sensor transformador de potencial ZMPT101B, para obter o sinal de tensão com capacidade máxima de 2mA:2mA, isolado galvanicamente.

Amplificadores Operacionais *Rail-to-Rail* são configurados como *buffer* para isolar as grandezas elétricas entre os estágios de condicionamento do sinal analógico e também como amplificadores em configuração não-inversora.

O diagrama de comunicação é apresentado na Figura 1. São representados de que forma cada parte do sistema vai trocar informações no *Smart Meter*. De maneira analógica, os sensores repassam os dados de tensão e corrente de forma direta e não-invasiva da rede elétrica (através do sistema de condicionamento) para unidade de processamento. Enquanto o sistema de alimentação transforma a tensão AC em DC para suprir o fornecimento de energia ao medidor inteligente contando com o sistema de proteção de efeito rápido contra surtos.

Na interação com o usuário, o sistema pode realizar a troca de mensagens pelo protocolo HTTP diretamente através da comunicação sem fio com o dispositivo de acesso, bem como, a troca de dados com a nuvem AWS pelo protocolo MQTT.

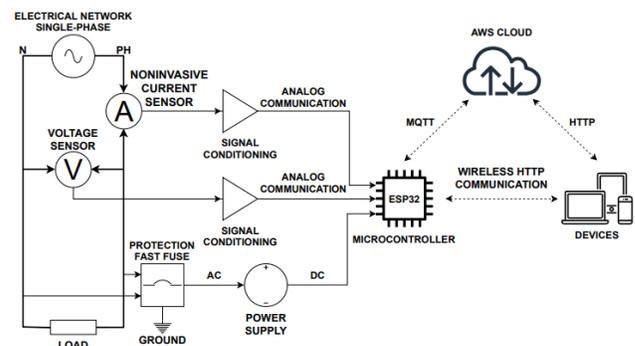


Figura 1: Diagrama de comunicação do Smart Meter.

O dispositivo de medição foi modelado em diagrama de blocos dividido em duas etapas: sistema de condicionamento de sinal para etapa analógica (bloco esquerdo da Figura 2), e sistema de aquisição e *interface* de saída para etapa digital (bloco direito). Os sinais fornecidos pelos sensores de entrada são condicionados no domínio de tempo contínuo elevando seu nível de tensão, através de *buffer's* de nível DC, seguidores de tensão e amplificadores na primeira etapa do modelo. No sistema de condicionamento foram adicionados filtros passivos *Anti-Aliasing* analógicos, com frequência de corte em 2 kHz, para restringir a largura de banda dos sinais que são amostrados.

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 possuem referência em 0 V, o que ocasiona valores positivos e negativos.

Para garantir acuracidade nas leituras do sinal da corrente elétrica, o mesmo é distribuído para três amplificadores na configuração não inversora com ganhos de x1, x5 e x10 vezes. Com essa estratégia foi possível obter uma grande precisão no registro da corrente em toda sua escala mesmo utilizando um conversor analógico para digital de 12 bits.

Na segunda etapa os sinais tratados entram no estágio que realiza a aquisição e *interface* de saída dos dados. As amostras dos

sinais são capturadas por quatro entradas do conversor ADC do microcontrolador com uma frequência de amostragem de 4 kHz, respeitando o teorema de Nyquist. Os sinais analógicos, uma vez digitalizados no domínio de tempo discreto, podem ser processados por filtros digitais para manutenção das variáveis.

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

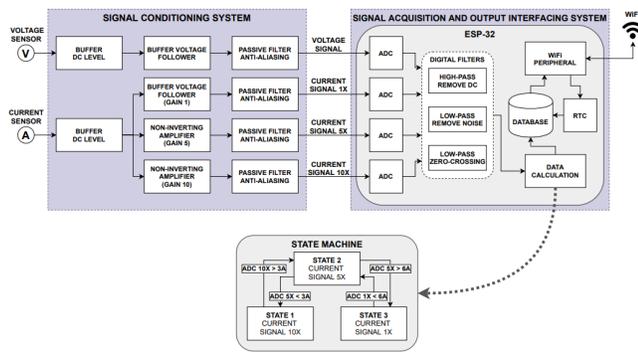


Figura 2: Diagrama de blocos e máquina de estado do Smart Meter.

Após o processamento dos sinais, esses são utilizados para calcular as grandezas propostas e, posteriormente, armazená-las em um banco de dados local não-volátil (com capacidade de armazenamento de 1 MB). A estratégia adotada para o cálculo da corrente elétrica, com três sinais amplificados de ganhos distintos, é administrada por uma máquina de estados que decide o nível do sinal para ser processado.

Como pode ser visto na máquina de estado apresentada na Figura 2, o algoritmo verifica o pico máximo da corrente medida a cada ciclo e realiza os cálculos com o sinal amplificado dez vezes se o valor for menor que 3A (*State 1*). Com o sinal amplificado cinco vezes se o valor for menor que 6A (*State 2*) e ganho unitário se o valor for maior que os anteriores (*State 3*).

Os valores da potência ativa $P(n)$ é calculada através dos sinais instantâneos de tensão $U(i)$ e corrente $I(i)$ para cada ciclo de tensão. O cálculo da potência aparente $S(n)$ é definido em função da tensão $U_{rms}(n)$ e corrente $I_{rms}(n)$ eficaz. Por fim, a potência reativa $Q(n)$ e o fator de potência $FP(n)$ são obtidos conforme segue as Equações (1) - (6):

$$U_{rms}(n) = \sqrt{\frac{1}{f_s/f_i} \cdot \sum_{i=n \cdot f_i}^{(n+1) \cdot f_i - 1} U^2(i)}, \quad (n = 0, \dots, L/f_i) \quad (1)$$

$$I_{rms}(n) = \sqrt{\frac{1}{f_s/f_i} \cdot \sum_{i=n \cdot f_i}^{(n+1) \cdot f_i - 1} I^2(i)}, \quad (n = 0, \dots, L/f_i) \quad (2)$$

$$P(n) = \frac{1}{f_s/f_i} \cdot \sum_{i=n \cdot f_i}^{(n+1) \cdot f_i - 1} U(i) \cdot I(i), \quad (n = 0, \dots, L/f_i) \quad (3)$$

$$S(n) = U_{rms}(n) \cdot I_{rms}(n) \quad (4)$$

$$Q(n) = \sqrt{S^2(n) - P^2(n)} \quad (5)$$

$$FP(n) = \frac{P(n)}{S(n)} \quad (6)$$

Os parâmetros f_s , f_i e L são respectivamente, a frequência de amostragem (4000 Hz), a frequência de linha (60 Hz) e o número de amostras dos sinais de tensão e corrente. Com todas as grandezas elétricas calculadas, através do periférico de comunicação WiFi, são disponibilizadas para a interação com a nuvem e outros dispositivos móveis.

Na Figura 3 é ilustrada a comunicação entre o conjunto dos serviços de computação em nuvem da *Amazon Web Services* (AWS), do dispositivo *Smart Meter* e da interface com o usuário. O dispositivo enviará as variáveis processadas, via protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) para um *broker* (*Amazon IoT Core*) que interpretará os dados e armazenará em um banco de dados on-line (*Amazon DynamoDB*). As informações requisitadas ao banco são realizadas via aplicação web desenvolvida em Javascript (JS) e *HyperText Markup Language* (HTML), hospedada em uma máquina virtual (*Amazon EC2*) e gerenciada por um servidor *Node.js*.

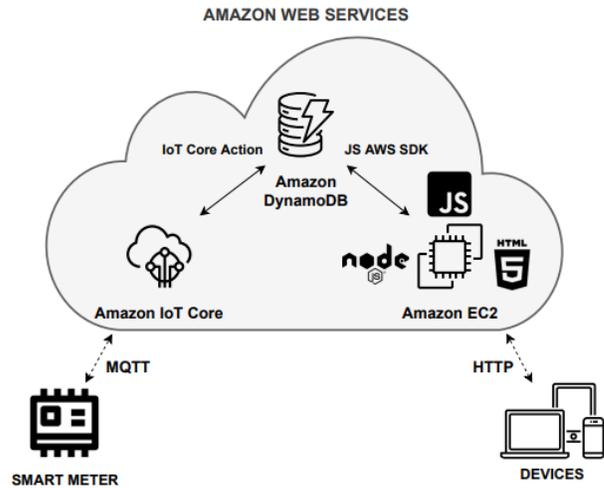


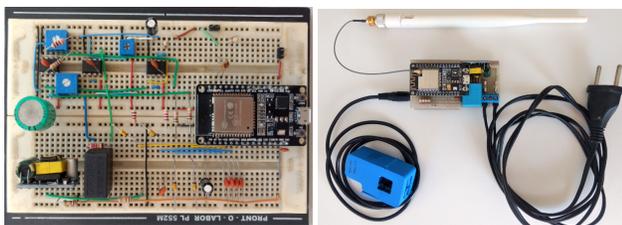
Figura 3: Comunicação do Smart Meter e dispositivos dos usuários utilizando os serviços de computação na nuvem.

De forma geral, o serviço AWS IoT Core se caracteriza como um *broker* MQTT disponibilizando um canal de comunicação entre o dispositivo e a nuvem AWS, ou seja, as mensagens publicadas são repassadas a todos os clientes que assinam o canal de comunicação. Já

o serviço DynamoDB tem como função armazenar as informações coletadas pelo *Smart Meter*, via serviço IoT Core, após a publicação de um dado realizado pelo protocolo MQTT. O serviço Amazon EC2, permite que instâncias de serviços configuradas em uma máquina virtual sejam acessadas remotamente, geralmente, é utilizada para hospedar aplicações desenvolvidas que são gerenciadas por servidores.

4 PROTÓTIPO DO MEDIDOR INTELIGENTE

Após a modelagem do *Smart Meter*, o circuito foi montado em *protoboard* para constatar o funcionamento com valores reais da rede elétrica a fim de ajustar e aferir o modelo proposto, conforme Figura 4 (a). Posterior a validação, também foi fabricado de forma manual a PCB (*Printed Circuit Board*) do dispositivo (Figura 4 (b)). Este protótipo foi utilizado para a coleta dos dados de testes do sistema.



(a) Protoboard de teste.

(b) Circuito em PCB.

Figura 4: Protótipo Experimental.

Além disso, foi desenvolvida uma aplicação que recebeu o nome de *Smart Meter Energy v1.0*, implementada em linguagem HTML e JS. A aplicação pode ser acessada remotamente via dispositivo *mobile*. Ela apresenta um menu de opções na parte superior da tela, onde ficam disponíveis para acessar os registros a qualquer instante enquanto a *interface* estiver em execução. 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 5), são apresentados os dados de tensão eficaz instantânea, a frequência da rede elétrica, corrente eficaz, consumo total em kWh, custo total do mês, potência ativa, potência aparente, potência reativa e o fator de potência instantâneo. Os dados nesta aba são atualizados periodicamente a cada 1 segundo.

Já os registros dos valores diários podem ser visualizados pela aba *TODAY* (Figura 6). Nela é possível verificar as medidas de tensão e corrente das últimas 24 horas, assim como, o gráfico das potências ativa e instantânea. Para uma eventual análise comparativa, são mostrados também os custos do dia anterior e atual, contemplado com uma porcentagem de acréscimo ou decréscimo de forma dinâmica. Para manter o usuário informado é realizada uma análise estatística do consumo, apresentando os gastos das últimas horas e uma perspectiva do consumo total para o final do dia. Além disso, é possível configurar o limite de consumo diário, sendo notificado caso exceda o estabelecido.



Figura 5: Aplicativo Smart Meter Energy tela NOW.



Figura 6: Aplicativo Smart Meter Energy tela TODAY, com previsão e alerta de consumo diário.

Assim como nas abas anteriores, os dados de consumo e custos de cada dia do mês 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 é possível visualizar o consumo de energia de forma parcial e estatística. Como diferencial, o *Smart Meter* tem capacidade de armazenar histórico de consumo dos últimos 3 anos de forma local, isto é, no próprio dispositivo. Para o armazenamento em nuvem, a capacidade é limitada à disponibilidade de espaço oferecido pelo serviço.

Estes relatórios são acessados pela aba *HISTORIC* do menu, conforme a Figura 7. Na aplicação 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. O mesmo ocorre para o dia do mês selecionado, informando o consumo por hora.

A configuração do dispositivo é realizada através da aba *CHANGE* (Figura 8), por ela são informados a versão e data de compilação do

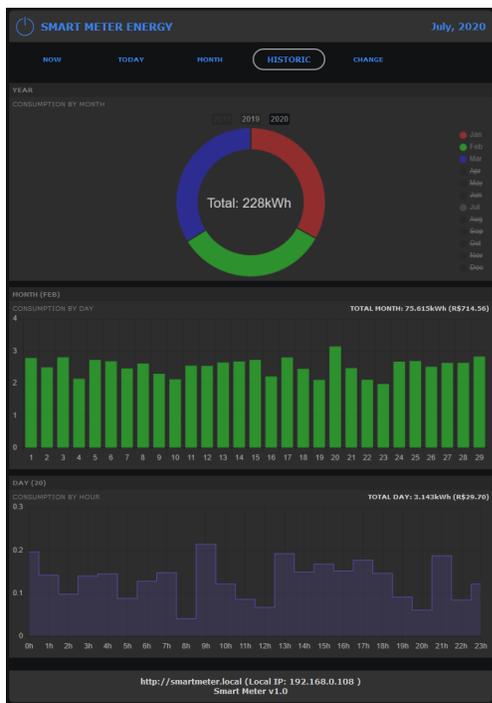


Figura 7: Aplicativo Smart Meter Energy tela HISTORIC.

firmware instalado no Smart Meter, além da quantidade de memória local ocupada e disponível.

O usuário pode alterar a senha e login da rede de comunicação WiFi própria (operando em modo Access Point), bem como, alterar as credenciais da rede de acesso à Internet no qual o medidor poderá se conectar com o serviço da AWS (operando no modo Station).

Como a tarifa do custo da energia elétrica pode variar de uma região para outra, foi implementada a possibilidade de configurar o valor por kWh, sendo possível também atualizar o firmware/software de forma remota (Over-the-Air - OTA).

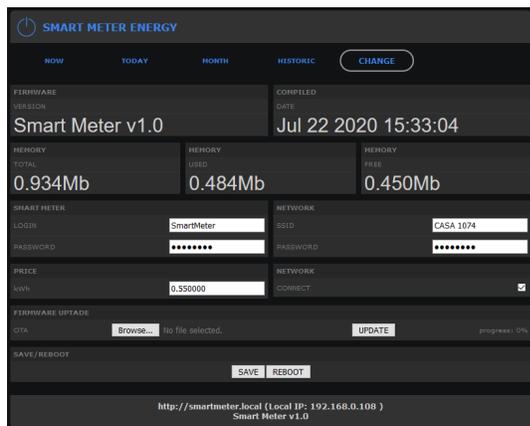


Figura 8: Aplicativo Smart Meter Energy tela CHANGE.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresenta-se a validação dos filtros digitais implementados no medidor inteligente, bem como, a conformidade instrumental no que diz respeito as leituras do dispositivo e acuracidade entre as medidas de tensão e corrente.

Antes de realizar o processo de calibração do Smart Meter se fez necessário validar os sinais que são tratados pelos filtros digitais implementados no microcontrolador. Para efeito de comprovação 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 enviadas via porta serial para serem analisadas com auxílio da ferramenta MATLAB.

O primeiro teste serviu para verificar o funcionamento do filtro passa-altas, tipo *Infinite Impulse Response* (IIR), de primeira ordem com frequência de corte em 1 Hz, para remover o nível DC do sinal. O segundo teste foi executado para constatar o funcionamento do filtro passa-baixas, tipo *Finite Impulse Response* (FIR), de vigésima ordem com frequência de corte em 1300 Hz, para remover possíveis ruídos indesejáveis. 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*, assegurando o sincronismo do sistema.

Utilizando o gerador de sinais foi aplicado uma onda senoidal composta por três sinais de frequências distintas, a primeira de 60 Hz com amplitude de 100 mV_{pp}, a segunda com 180 Hz (terceira harmônica) com amplitude de 50 mV_{pp} e a terceira de 1800 Hz com amplitude de 50 mV_{pp}. Também foi adicionado 200 mV de *offset* para representar o nível DC do sinal aplicado. Através dos gráficos da Figura 9 é possível verificar o sinal elétrico de entrada e os três sinais de saída de cada filtro, com suas respectivas FFTs (*Fast Fourier Transform*), para cada etapa de filtragem.

Conforme o primeiro gráfico da Figura 9, foram plotados a entrada do sinal (amostrada pelo conversor ADC) e sua resposta em frequência. No segundo gráfico é apresentado a saída do filtro passa-altas para remover o nível DC, atenuando a frequência em 0 Hz (conferido pela FFT). No terceiro gráfico é exposto a saída do filtro passa-baixas para remover ruídos indesejáveis, verificando que a frequência em 1800 Hz e o nível DC também foram eliminados. Por fim, no quarto gráfico, é representado o sinal de saída da última etapa de filtragem que separa a harmônica fundamental (60 Hz) das demais frequências, constatando que as componentes de 180 Hz, 1800 Hz e o nível DC foram atenuados, permanecendo somente a frequência fundamental na saída. Desta maneira validou-se todo o sistema de filtros digitais proposto ao dispositivo de monitoramento.

Com a garantia de funcionamento no processamento digital dos sinais, a 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 [14].

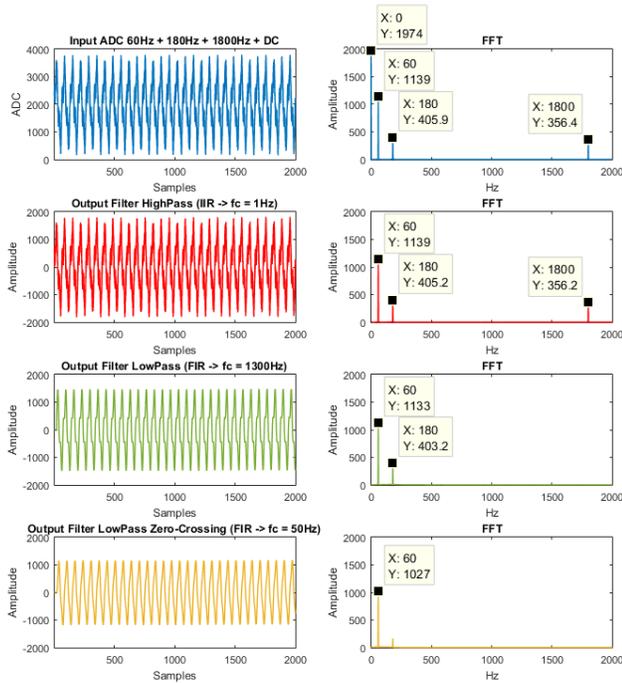


Figura 9: Sinais processados pelos filtros digitais

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 voltmetro e amperímetro (como equipamento de referência), 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), descritos através das Equações (7) - (11):

$$E_t = \pm \sqrt{E_a^2 + E_{esc}^2} \quad (7)$$

$$E_a = \pm t \cdot \frac{\delta}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

$$E_{esc} = \pm MDE \quad (9)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n - 1}} \quad (10)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (11)$$

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	Smart Meter
120V	119.7V	119.8V
120V	119.8V	120.0V
120V	120.0V	120.0V
Média (Erro):	119.8V (± 1%)	119.9V (± 0.1V)
220V	222.2V	222.2V
220V	222.1V	222.2V
220V	222.2V	222.2V
Média (Erro):	222.2V (± 1%)	222.2V (± 0.1V)

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

A adoção de lâmpadas incandescentes e os eletrodomésticos utilizados nos testes 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	Smart Meter
1 - Lâmpada	0.288A	0.29A
1 - Lâmpada	0.288A	0.29A
1 - Lâmpada	0.287A	0.29A
Média (Erro):	0.288A (± 1%)	0.29A (± 0.01A)
2 - Lâmpadas	0.574A	0.57A
2 - Lâmpadas	0.574A	0.57A
2 - Lâmpadas	0.574A	0.57A
Média (Erro):	0.574A (± 1%)	0.57A (± 0.01A)
3 - Lâmpadas	0.859A	0.86A
3 - Lâmpadas	0.860A	0.86A
3 - Lâmpadas	0.859A	0.86A
Média (Erro):	0.859A (± 1%)	0.86A (± 0.01A)
1 - Aquecedor	1.332A	1.33A
1 - Aquecedor	1.329A	1.33A
1 - Aquecedor	1.335A	1.33A
Média (Erro):	1.332A (± 1%)	1.33A (± 0.01A)
1 - Torradeira	3.653A	3.65A
1 - Torradeira	3.648A	3.63A
1 - Torradeira	3.635A	3.63A
Média (Erro):	3.645A (± 1%)	3.64A (± 0.01A)
Todos	5.879A	5.86A
Todos	5.865A	5.86A
Todos	5.851A	5.86A
Média (Erro):	5.865A (± 1%)	5.86A (± 0.01A)

Como as demais grandezas apresentadas pelo sistema (potências e consumo) são medidas indiretas com base nos valores de tensão e corrente, o erro de tais variáveis pode ser assumido como a propagação dos erros das medidas diretas aferidas. Por fim, conforme visto nas tabelas 1 e 2, o dispositivo proposto apresentou valores precisos com desvio e erro de medição de no máximo uma divisão de escala (tanto para os valores de tensão, quanto para os de corrente), permanecendo dentro do erro máximo de 1%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O medidor *Smart Meter* atingiu os resultados esperados, indicando informações importantes sobre a utilização da energia elétrica, com dados instantâneos, transparentes e históricos de consumo. Além disso, a precisão e a acurácia nas medidas conferiu ao medidor confiabilidade instrumental.

A integração do dispositivo ao contexto IoT se mostrou condizente com aplicações remotas, uma vez que o armazenamento local e na nuvem se comportaram conforme o esperado, realizando com êxito a conexão ao serviço MQTT e aos serviços da AWS (AWS Iot Core, DynamoDB, Virtual Machine EC2). O serviço de hospedagem da aplicação na nuvem se mostrou confiável, não apresentando instabilidades de acessos múltiplos ou características de atraso de resposta entre o dispositivo e o servidor.

Uma vez integrado o sistema aos serviços de IoT, o mesmo poderá servir para repassar os dados de cada *Smart Meter* instalado nas residências, até as concessionárias de energia. Isso eliminaria 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 (e já estão sendo desenvolvidos em estudos paralelos pelos autores), é a utilização de aprendizado de máquina para identificar quais eletrodomésticos estão consumindo recursos no momento. Dessa forma, os equipamentos e a respectiva utilização da energia podem ser classificados por grupos, contribuindo na quantidade de informações disponíveis aos usuários, facilitando e auxiliando na tomada de decisão com vistas à eficiência energética.

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. 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 e gestão consciente da energia.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. Relatórios de consumo e receita de distribuição. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. URL <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acesso em: 15 Jul. 2020.
- [2] EPE. Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional) - 1995-2019. Empresa de Pesquisa Energética, 2019. URL <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>. Acesso em: 15 Jul. 2020.
- [3] ABESCO. Brasil desperdiça meia itaipu por ano. Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia, 2018. URL <http://www.abesco.com.br/novidade/brasil-desperdiça-meia-itaipu-por-ano/>. Acesso em: 15 Jul. 2020.
- [4] Claudia Guadagnin. De 2011 a 2015, brasil desperdiçou energia suficiente para um ano de consumo. Gazeta do Povo, 2016. URL [https://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/de-](https://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/de-2011-a-2015-brasil-desperdiçou-energia-suficiente-para-um-ano-de-consumo)

- 2011-a-2015-brasil-desperdiçou-energia-suficiente-para-um-ano-de-consumo-8bnk42j8bd25of8e9yiw5h1/. Acesso em: 08 Set. 2019.
- [5] Joana Cunha. Desperdiço consome 10% da energia elétrica no país, diz associação. Folha de São Paulo, 2015. URL <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/02/1586778-desperdiço-consome-10-da-energia-eletrica-no-pais-diz-associacao.shtml>. Acesso em: 08 Set. 2019.
- [6] Energy Industrial Strategy Department for Business. Smart metering implementation programme - a report on progress of the realisation of smart meter consumer benefits. GOV.UK, 2019. URL https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/830668/smart-meters-benefits-realisation.pdf. Acesso em: 25 Ago. 2020.
- [7] Gerson Sena. Medidor de consumo de energia elétrica com acesso local e remoto usando plataforma esp8266. Graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal do Pampa, 2018.
- [8] Luigi Atzori, Antonio Iera, and Giacomo Morabito. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805, 2010. ISSN 1389-1286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>.
- [9] Brasil. Decreto nº 9.854, de 25 de junho de 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, 2019. URL http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D9854.htm. Acesso em: 23 Set. 2019.
- [10] S. Saha, S. Mondal, A. Saha, and P. Purkait. Design and implementation of iot based smart energy meter. *2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*, pages 19–23, Dec 2018. doi: [10.1109/ASPCON.2018.8748696](https://doi.org/10.1109/ASPCON.2018.8748696).
- [11] W. Hlaing, S. Thepphaeng, V. Nontaboot, N. Tangsunantham, T. Sangsuwan, and C. Pira. Implementation of wifi-based single phase smart meter for internet of things (iot). *2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, pages 1–4, March 2017. doi: [10.1109/IEECON.2017.8075793](https://doi.org/10.1109/IEECON.2017.8075793).
- [12] A. R. Al-Ali, T. Landolsi, M. H. Hassan, M. Ezzeddine, M. Abdelsalam, and M. Baseet. An iot-based smart utility meter. *2018 2nd International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, pages 80–83, Aug 2018. doi: [10.1109/ICSGSC.2018.8541314](https://doi.org/10.1109/ICSGSC.2018.8541314).
- [13] M. Carratù, M. Ferro, A. Pietrosanto, and V. Paciello. Smart power meter for the iot. *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pages 514–519, July 2018. doi: [10.1109/INDIN.2018.8472018](https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8472018).
- [14] João J. Piacentini, Bartira C. S. Grandi, Márcia P. Hofmann, Flavio R. R. Lima, and Erika Zimmermann. *Introdução ao Laboratório de Física*. Editora UFSC, Santa Catarina, 5 edition, 2013.