

Sistema IoT para Monitoramento de Tensão, Corrente, Potência e Energia Elétrica em Instalações Residenciais Monofásicas Utilizando ESP32 e Firebase

Marcelo Rodrigues Bechiato¹, Alessandro Paulo de Oliveira², Felipe Walter Dafico Pfrimer²

¹*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo-PR, Brasil
(Marcelobechiato@hotmail.com)*

²*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo-PR, Brasil*

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema IoT para monitoramento de energia elétrica residencial utilizando ESP32, ADS1015, sensores ACS758 e ZMPT101B, *Firestore Realtime Database* e aplicativo Android. O sistema desenvolvido realiza a medição de tensão, corrente, potência e energia em tempo real, permitindo o acompanhamento remoto do consumo. Os resultados demonstraram medições consistentes, comunicação estável e baixa latência na atualização dos dados.

Palavras-chave: Internet das Coisas (IoT); Monitoramento de Energia Elétrica; ESP32; *Firestore Realtime Database*.

INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha papel fundamental nas atividades residenciais, comerciais e industriais, sendo indispensável para o funcionamento de equipamentos, sistemas de comunicação, iluminação e dispositivos eletrônicos. Com a crescente presença de eletrodomésticos, sistemas de climatização e dispositivos conectados à internet nos ambientes residenciais, o acompanhamento do consumo energético tornou-se uma questão cada vez mais relevante para consumidores e concessionárias (Moura et al., 2024).

Além da maior dependência da energia elétrica nas atividades cotidianas, os custos associados ao seu fornecimento continuam exercendo impacto significativo sobre o orçamento das famílias brasileiras. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025), o setor residencial permanece entre os principais consumidores de eletricidade do país, refletindo a intensificação do uso de equipamentos elétricos e das tecnologias digitais.

Nesse contexto, ferramentas de monitoramento energético assumem papel importante ao possibilitar a visualização das grandezas elétricas consumidas, auxiliando na identificação de desperdícios, no uso mais eficiente da energia e na redução de gastos (Stojkoska e Trivodaliev, 2017). Paralelamente, o avanço da Internet das Coisas (IoT) tem ampliado as possibilidades de monitoramento e gerenciamento remoto de sistemas elétricos, permitindo a integração

entre sensores, microcontroladores, serviços em nuvem e aplicações móveis. De acordo com (AL-Fuqaha et al., 2015), a IoT possibilita a comunicação entre dispositivos conectados à internet, favorecendo a aquisição, o processamento e a disponibilização de dados em tempo real. Dessa forma, soluções baseadas em IoT têm se mostrado uma alternativa viável para aplicações de monitoramento energético residencial, oferecendo ao usuário acesso contínuo às informações de consumo e contribuindo para uma gestão mais eficiente da energia elétrica.

Nos últimos anos, a evolução dos microcontroladores com conectividade integrada, dos serviços de computação em nuvem e das aplicações móveis tem impulsionado a adoção de sistemas IoT em diferentes áreas, incluindo automação residencial, monitoramento ambiental e gerenciamento de energia. Essas tecnologias permitem que dados coletados por sensores sejam transmitidos, armazenados e analisados remotamente (Raza et al., 2017), possibilitando a tomada de decisões de forma mais rápida e eficiente. Além disso, a integração entre dispositivos inteligentes, plataformas em nuvem e técnicas de análise de dados tem ampliado significativamente o potencial das aplicações IoT voltadas à eficiência energética e ao gerenciamento de recursos em ambientes residenciais (Sarker et al., 2024).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma de monitoramento de energia elétrica baseada em Internet das Coisas, destinada a cargas residenciais

monofásicas. Para isso, propõe-se a implementação de um sistema capaz de realizar a medição das grandezas elétricas de tensão e corrente, calcular potência e energia consumida, armazenar os dados em nuvem por meio do *Firestore Realtime Database* e disponibilizar as informações em um aplicativo móvel para sistema Android. Além disso, busca-se integrar os sensores de medição, o conversor analógico-digital ADS1015, o microcontrolador ESP32 e a interface de usuário, permitindo o acompanhamento remoto e em tempo real do consumo energético.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema foi desenvolvido com uma arquitetura modular composta pelas etapas de aquisição, conversão, processamento, comunicação e visualização. Conforme apresentado na Figura 1, o fluxo de dados inicia-se na coleta das grandezas elétricas e segue até a disponibilização das informações ao usuário.

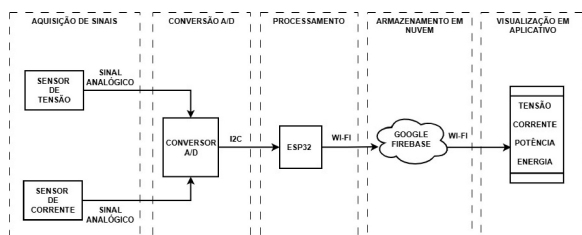


Figura 1. Etapas do sistema.

A aquisição das grandezas elétricas foi realizada por meio dos sensores ACS758 e ZMPT101B, responsáveis pela medição da corrente e da tensão, respectivamente. O ACS758 foi conectado em série com a carga monitorada, enquanto o ZMPT101B foi instalado em paralelo à rede elétrica, permitindo o monitoramento contínuo das variáveis elétricas do sistema. Após a calibração dos sensores, os sinais analógicos obtidos foram encaminhados ao conversor analógico-digital ADS1015.

A etapa de conversão analógico-digital foi executada pelo ADS1015, configurado para operar com faixa de entrada de 4,096 V, compatível com os níveis máximos de tensão fornecidos pelos sensores. O conversor foi ajustado para sua maior taxa de amostragem, 3300 amostras por segundo (SPS), permitindo a aquisição alternada dos sinais de tensão e corrente sem comprometer a quantidade de amostras necessária para a reconstrução das formas de onda senoidais. Para a leitura das variáveis, foram utilizados dois canais independentes do ADS1015, sendo um dedicado à tensão e outro à corrente. As amostras digitalizadas foram transferidas sequencialmente ao ESP32 por meio do barramento I²C, utilizando as linhas SDA e SCL. Essa interface

foi escolhida devido à sua simplicidade de implementação, ao reduzido número de conexões necessárias e à estabilidade apresentada durante os testes experimentais.

A comunicação entre o ESP32 e o ADS1015 foi implementada utilizando a biblioteca `Adafruit_ADS1X15.h` no ambiente Arduino IDE. Inicialmente, o barramento I²C foi configurado por meio da função `Wire.begin()`, enquanto a inicialização do conversor foi realizada pela função `ADS.begin()`. Em seguida, foram definidos os parâmetros de operação do dispositivo, incluindo a faixa de entrada de 4,096 V por meio da função `ADS.setGain(1)`, a taxa de amostragem de 3300 SPS por meio de `ADS.setDataRate(7)` e o modo de conversão contínua utilizando `ADS.setMode(0)`, reduzindo o intervalo entre leituras sucessivas. A seleção dos canais foi realizada pela função `ADS.requestADC()`, enquanto os valores convertidos foram obtidos por meio da função `ADS.getValue()`.

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade das medições, os sensores de tensão e corrente foram alimentados por um regulador de tensão dedicado, isolando-os das variações de corrente provocadas pelo módulo Wi-Fi do ESP32 durante as transmissões de dados. Essa estratégia contribuiu para a redução de interferências e ruídos nos sinais adquiridos, resultando em leituras mais estáveis e consistentes ao longo dos ensaios realizados.

O processamento das grandezas de tensão, corrente, potência e energia foi implementado no ESP32 utilizando sua arquitetura de dois núcleos de processamento, conforme ilustrado na Figura 2. Com o objetivo de garantir a continuidade das medições, um dos núcleos foi dedicado às tarefas de aquisição dos dados e cálculo das variáveis elétricas, enquanto o outro ficou responsável pela comunicação Wi-Fi e pelo envio periódico das informações ao Firebase. Essa divisão de tarefas reduz a influência de eventuais atrasos de comunicação sobre o processamento dos dados, contribuindo para uma operação mais estável do sistema.

O núcleo destinado ao processamento executa continuamente a rotina de cálculo das grandezas elétricas a partir das amostras fornecidas pelo ADS1015. A utilização dos valores dos valores eficazes, ou *Root Mean Square* (RMS), é necessária porque os sinais elétricos em corrente alternada variam continuamente ao longo do tempo, não sendo adequadamente representados por valores instantâneos ou de pico. Dessa forma, o valor RMS fornece uma medida equivalente capaz de representar o efeito equivalente associado à dissipação de potência em uma carga resistiva. No sistema desenvolvido, o cálculo dessas grandezas foi realizado digitalmente a partir das amostras

adquiridas pelo ADS1015, por meio da raiz quadrada da média dos quadrados das amostras coletadas, conforme descrito por:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2[n]} \quad (1)$$

Para garantir a precisão dos resultados, foi empregada uma taxa de amostragem de 3300 amostras por segundo, valor significativamente superior ao mínimo exigido pelo teorema de Nyquist-Shannon para sinais com frequência fundamental de 60 Hz.

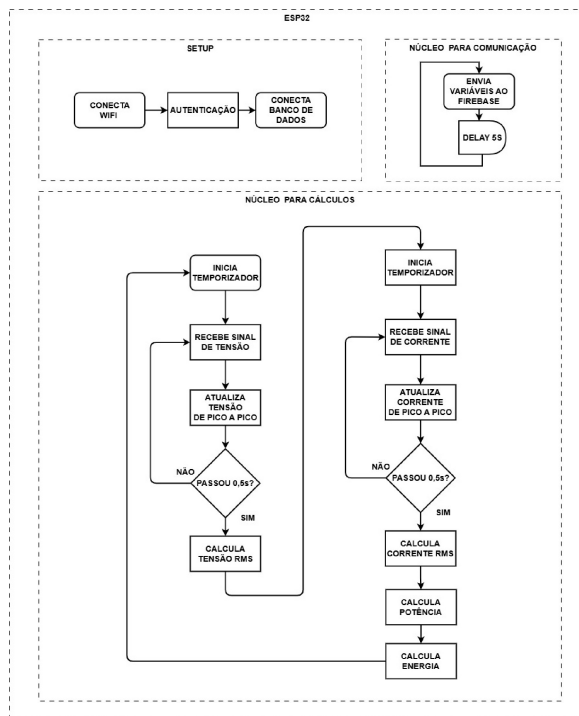


Figura 2. Fluxograma das rotinas de aquisição, processamento e transmissão de dados implementadas no ESP32.

Essa configuração assegura uma representação adequada das formas de onda de tensão e corrente, contribuindo para a exatidão dos cálculos das grandezas elétricas.

Durante cada ciclo de processamento, as amostras de tensão e corrente são elevadas ao quadrado e acumuladas em variáveis específicas. Após o período de aquisição, calcula-se a média desses valores e, em seguida, aplica-se a operação de raiz quadrada, obtendo-se os valores eficazes de tensão e corrente na escala digital do conversor analógico-digital.

Como os valores RMS calculados ainda se encontram na escala digital do ADS1015, foi necessária a aplicação de fatores de calibração para convertê-los em unidades físicas. Esses fatores foram determinados experimentalmente a partir da comparação entre os Valores Eficazes fornecidos pelo conversor e os valores de referência obtidos por

instrumentos de medição. Dessa forma, tornou-se possível converter as leituras digitais para seus correspondentes valores de tensão e corrente.

Após a determinação dos Valores Eficazes de tensão e corrente, a potência elétrica é calculada pelo ESP32 por meio do produto entre essas duas grandezas. Esse produto foi feito devido ao uso da carga resistiva. Entretanto, para qualquer outro tipo de carga, seria preciso calcular a potência ativa. A energia consumida é então estimada a partir da integração discreta da potência ao longo do tempo. Para isso, a potência é amostrada a cada segundo e multiplicada pelo intervalo de aquisição, resultando na energia consumida durante esse período, conforme apresentado na Equação 2.

$$E_{1s} = P_{média} \cdot \Delta t \quad (2)$$

em que $P_{média}$ representa a potência média medida durante o intervalo de amostragem e Δt corresponde ao período de aquisição, igual a um segundo. Como a energia calculada inicialmente está expressa em Watt-segundo (Ws), realiza-se sua conversão para Watt-hora (Wh) por meio da divisão pelo número de segundos existentes em uma hora, conforme apresentado na Equação 3.

$$E_{wh} = \frac{P_{média} \Delta t}{3600} \quad (3)$$

A energia total consumida ao longo do período de monitoramento é obtida pela soma das contribuições energéticas de cada intervalo de amostragem, sendo expressa pela Equação 4.

$$E_{total} = \sum_{k=1}^N \frac{P_{média,k} \Delta t}{3600} \quad (4)$$

em que (N) representa o número total de intervalos de amostragem considerados durante o período de medição.

A comunicação entre o ESP32 e o Firebase foi implementada por meio da biblioteca 'Firebase ESP_Client', responsável por fornecer os recursos necessários para leitura e gravação de dados no *Firebase Realtime Database*. Além das operações de acesso ao banco de dados, essa biblioteca realiza o gerenciamento da autenticação, da renovação automática de tokens, da reconexão à rede Wi-Fi e do tratamento de possíveis falhas de comunicação.

No *firmware*, foram configurados os parâmetros necessários para acesso à rede e ao banco de dados, incluindo as credenciais da rede Wi-Fi, o endereço do *Firebase Realtime Database* e as informações de autenticação. Após a inicialização do sistema, o ESP32 verifica o estabelecimento da conexão com a rede antes de iniciar a comunicação com o Firebase, garantindo que as operações de transmissão ocorram apenas quando houver conectividade disponível. Uma vez autenticado, o microcontrolador passa a atualizar periodicamente os registros do banco de

dados com os valores das grandezas elétricas calculadas.

A transmissão dos dados foi executada em uma tarefa específica alocada no segundo núcleo do ESP32, permanecendo independente da rotina responsável pela aquisição e processamento das medições. Essa abordagem permite que o envio das informações ocorra em intervalos previamente definidos, evitando que eventuais atrasos na comunicação afetem a execução dos cálculos locais e reduzindo a quantidade de requisições realizadas ao servidor.

Os dados enviados foram armazenados no *Firestore Realtime Database* utilizando uma estrutura hierárquica baseada em pares chave-valor, facilitando a recuperação das informações pelo aplicativo móvel e permitindo o monitoramento remoto das grandezas elétricas. A Figura 3 apresenta a organização utilizada no banco de dados para armazenamento das medições realizadas pelo sistema.

<https://medidor-c87a6-default-rtdb.firebaseio.com>

```
https://medidor-c87a6-default-rtdb.firebaseio.com/
├── Corrente_RMS: 0.3
├── Energia: 77.9
├── Potencia: 0
└── Tensao_RMS: 133.3
```

Figura 3. Variáveis no Firebase

O diagrama esquemático do circuito pode ser visto na Figura 4.

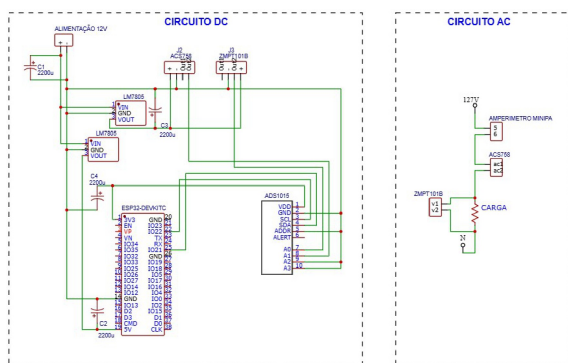


Figura 4. Diagrama esquemático do circuito

O aplicativo desenvolvido para consulta das grandezas elétricas monitoradas foi implementado na plataforma MIT App Inventor, utilizando o ambiente de programação visual baseado em blocos. A escolha dessa ferramenta se justificou pela praticidade na integração com o *Firestore Realtime Database* e pela facilidade de criação de interfaces gráficas responsivas, permitindo a construção de um

aplicativo funcional sem a necessidade de codificação textual em linguagens nativas Android.

A interface do aplicativo, apresentada na Figura 5, foi desenvolvida com foco na simplicidade e na facilidade de visualização das informações monitoradas. Para a organização dos elementos gráficos, foram utilizados componentes de arranjo horizontal e vertical, permitindo uma distribuição estruturada dos dados na tela. A página principal exibe o logotipo da instituição e uma área destinada à apresentação das grandezas elétricas medidas pelo sistema.

As informações de tensão eficaz (RMS), corrente eficaz (RMS), potência ativa e energia acumulada são exibidas por meio de uma tabela implementada com o componente 'TableArrangement'. Cada grandeza é identificada por um rótulo descritivo associado ao respectivo campo de valor numérico. Esses campos são atualizados automaticamente a partir dos dados armazenados no *Firestore Realtime Database*, permitindo ao usuário acompanhar em tempo real as medições realizadas pelo sistema.

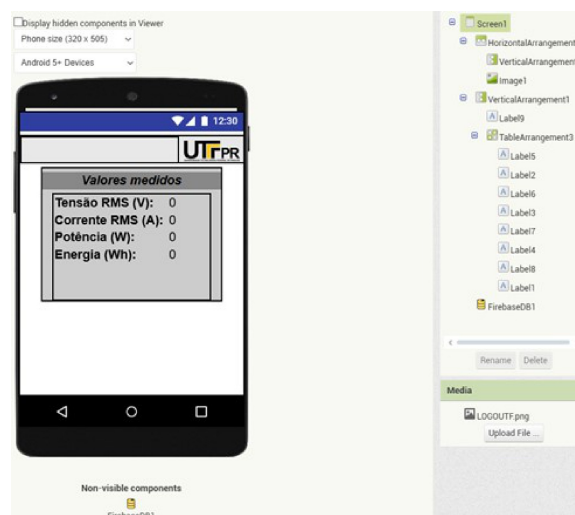


Figura 5. Tela do App Inventor

A integração do aplicativo com o Firebase foi realizada por meio do componente 'FirestoreDB', configurado com o endereço do *Firestore Realtime Database* utilizado no projeto. Esse componente é responsável por acompanhar as alterações realizadas no banco de dados e acionar automaticamente o evento 'DataChanged' sempre que uma das variáveis armazenadas é modificada pelo ESP32. Dessa forma, os dados podem ser atualizados em tempo real na interface do usuário, sem a necessidade de consultas periódicas ao servidor, reduzindo o tráfego de rede e tornando a comunicação mais eficiente.

A lógica responsável pela atualização das informações exibidas no aplicativo foi desenvolvida utilizando o ambiente de programação por blocos do MIT App Inventor. Conforme ilustrado na Figura 6,

os blocos implementados recebem os dados provenientes do Firebase e atualizam automaticamente os campos correspondentes às grandezas elétricas monitoradas, garantindo que os valores apresentados ao usuário reflitam continuamente as medições mais recentes realizadas pelo sistema.

No evento 'FirebaseDB.DataChanged', o aplicativo identifica qual informação foi modificada por meio do parâmetro 'tag', que corresponde ao nome do nó atualizado no *Firebase Realtime Database*. A partir dessa identificação, uma estrutura de decisão associa cada variável recebida, tensão RMS, corrente RMS, potência e energia, ao respectivo elemento da interface gráfica. Em seguida, o valor recebido é atribuído ao campo correspondente, mantendo a exibição das informações constantemente sincronizada com os dados armazenados no banco de dados.

Além da visualização das medições, foi implementada uma funcionalidade para reinicialização do valor acumulado de energia. Quando o usuário aciona o botão Zerar Energia, o aplicativo envia um comando ao ESP32 por intermédio do Firebase. Esse processo é iniciado pelo evento 'Click' do botão, enquanto a atualização do valor no banco de dados é realizada pela função 'FirebaseDB.StoreValue'. Ao detectar a alteração no nó correspondente, o microcontrolador redefine o valor acumulado de energia, permitindo o reinício do monitoramento sem a necessidade de reprogramação ou intervenção direta no dispositivo.

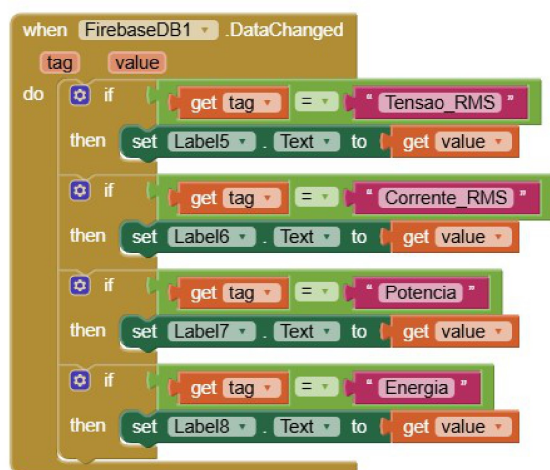


Figura 6. Configuração em blocos do aplicativo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a etapa experimental, foi utilizada como carga uma resistência de aquecimento com potência nominal de 1000 W alimentada por uma rede de 127 V. A medição da corrente foi realizada por meio do

sensor ACS758, conectado em série com a carga, enquanto a tensão foi monitorada pelo módulo ZMPT101B, ligado em paralelo aos terminais de alimentação. Essa configuração permitiu a aquisição simultânea das grandezas elétricas sem interferir significativamente no funcionamento do circuito monitorado. Com o objetivo de validar as medições de corrente fornecidas pelo sistema, um multímetro digital configurado para a escala de 20 A foi conectado em série com a carga e com o sensor ACS758, fornecendo valores de referência para o processo de calibração e comparação dos resultados obtidos.

O sensor de tensão ZMPT101B foi instalado em paralelo à carga monitorada, possibilitando a aquisição do sinal de tensão sem alterar o funcionamento do circuito elétrico. Inicialmente, foi realizada uma avaliação com a carga desconectada da rede de 127 V, utilizando um osciloscópio configurado para medições em tensão contínua (CC). Nessa condição, verificou-se que a saída do sensor permaneceu próxima de 2,5 V (CC). Esse valor corresponde ao nível de offset incorporado ao módulo, utilizado para deslocar o sinal alternado para uma faixa compatível com sistemas de aquisição alimentados por tensão única.

A medição obtida confirma o correto funcionamento do circuito de condicionamento de sinal presente no ZMPT101B, responsável por centralizar a forma de onda em torno da tensão de referência de 2,5 V (valor desconsiderado nos cálculos). Adicionalmente, observou-se que o sinal permaneceu praticamente estável durante o ensaio, sem oscilações significativas, indicando baixo nível de ruído e boa estabilidade do sistema de medição.

Na etapa seguinte, os ensaios foram realizados com a carga alimentada pela rede de 127 V. Para essa análise, o osciloscópio foi configurado para medições em corrente alternada (CA), permitindo a visualização da componente senoidal fornecida pelo sensor, conforme ilustrado na Figura 7.

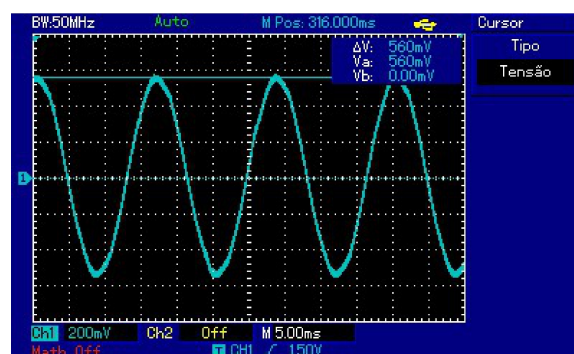


Figura 7. Sinal de tensão da rede

Utilizando a função de cursores do instrumento, o potenciômetro de ajuste do módulo ZMPT101B foi calibrado de modo que o sinal de saída apresentasse

variação entre aproximadamente 2,0 V e 3,0 V. Esse procedimento garantiu que os níveis de tensão permanecessem dentro da faixa de operação do conversor analógico-digital ADS1015, possibilitando a aquisição adequada do sinal sem risco de saturação ou perda de informação durante o processo de conversão. A forma de onda obtida apresentou comportamento senoidal estável, sem a presença de ruídos expressivos ou deformações perceptíveis. A amplitude do componente alternado foi de aproximadamente 560 mV de pico, valor compatível com as características de transformação do ZMPT101B e com a calibração aplicada ao módulo. Os resultados observados indicam que o sensor foi capaz de reproduzir adequadamente a forma de onda da tensão da rede elétrica, fornecendo um sinal compatível com as etapas de aquisição e processamento digital realizadas pelo sistema.

O sensor de corrente ACS758 foi instalado em série com a carga monitorada, de modo que toda a corrente consumida circulasse pelo condutor interno do dispositivo. Inicialmente, foi realizado um ensaio com a carga desconectada da rede de 127 V, estabelecendo uma condição de corrente nula. Para essa análise, o osciloscópio foi configurado para medições em corrente contínua (CC). Nessa situação, verificou-se que a tensão de saída do sensor permaneceu próxima de 2,5 V (CC) (valor desconsiderado nos cálculos). Este valor corresponde ao nível de offset característico do ACS758 quando não há circulação de corrente pelo sensor. Além disso, o sinal observado apresentou comportamento estável, sem oscilações ou ruídos significativos, indicando o correto funcionamento do circuito de medição. Esse resultado foi semelhante ao observado nos testes realizados com o sensor de tensão, evidenciando a estabilidade dos sinais fornecidos pelos módulos utilizados no sistema.

A segunda etapa de testes foi realizada com a carga conectada à rede elétrica, permitindo a circulação de corrente pelo ACS758. Durante o experimento, o osciloscópio foi configurado para medições em corrente alternada (CA), de modo a visualizar apenas a componente senoidal do sinal fornecido pelo sensor. Paralelamente, um multímetro conectado em série com a carga foi utilizado como instrumento de referência para a medição da corrente elétrica. O multímetro indicou uma corrente de 6,75 A, valor adotado como referência para a validação das medições realizadas pelo ACS758. Com o auxílio dos cursores do osciloscópio, foi observada na saída do sensor uma forma de onda senoidal com amplitude aproximada de 380 mV de pico, conforme apresentado na Figura 8. O resultado obtido mostrou boa concordância com o valor esperado teoricamente, evidenciando que o sensor respondeu adequadamente à corrente aplicada e forneceu um sinal compatível

com as etapas posteriores de aquisição e processamento digital.

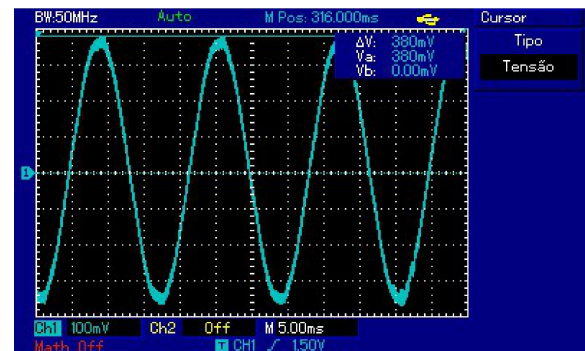


Figura 8. Medição de corrente no aquecedor

O sinal medido apresentou forma de onda estável, sem a presença de ruídos significativos ou deformações perceptíveis, indicando que o ACS758 foi capaz de reproduzir adequadamente as variações de corrente da carga alimentada pela rede elétrica. Além disso, os níveis de tensão observados na saída do sensor permaneceram dentro da faixa de operação do ADS1015, assegurando a compatibilidade entre os estágios de condicionamento de sinal, aquisição e conversão analógico-digital. Essa característica contribuiu para a obtenção de medições confiáveis e para o correto processamento das grandezas elétricas pelo sistema desenvolvido. A reconstrução das formas de onda no ESP32 foi realizada por meio de uma rotina de aquisição que alterna continuamente a leitura dos canais configurados no ADS1015. Para avaliar o comportamento dos sinais digitalizados, utilizou-se a ferramenta de plotagem gráfica disponível no Arduino IDE, permitindo a visualização direta das amostras adquiridas pelo conversor analógico-digital.

Na primeira análise, apresentada na Figura 9, foi avaliado o canal associado ao sensor de corrente ACS758 operando com uma carga que consumia aproximadamente 6,75 A. Observou-se que as amostras obtidas preservaram o formato senoidal característico do sinal original, evidenciando a capacidade do sistema em reproduzir adequadamente a forma de onda medida. Em alguns pontos, entretanto, foram observadas repetições entre amostras consecutivas, ocasionando pequenas deformações na representação digital do sinal. Apesar dessas ocorrências, os valores máximos e mínimos da forma de onda permaneceram inalterados, não comprometendo a determinação das grandezas elétricas calculadas pelo sistema.

A segunda análise foi realizada no canal associado ao sensor de tensão ZMPT101B, operando sob uma tensão de 127 V RMS. Conforme apresentado na Figura 10, a forma de onda reconstruída pelo sistema apresentou comportamento compatível com o sinal observado durante as medições realizadas com o osciloscópio.

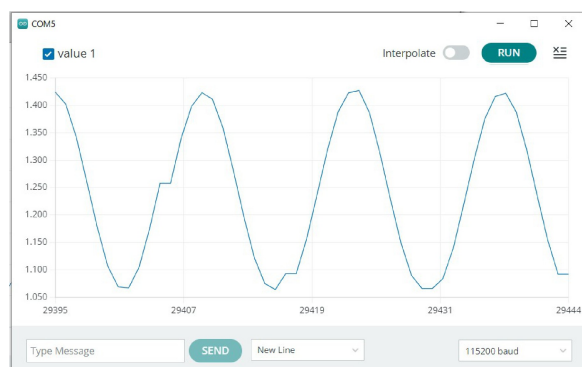


Figura 9. Canal 1 ADS1015

O formato senoidal foi preservado ao longo de todo o período analisado, demonstrando que a etapa de aquisição e conversão foi capaz de representar adequadamente a tensão da rede elétrica. Esses resultados confirmam a eficiência da rotina de amostragem implementada no ESP32 e a compatibilidade do sistema com as características dos sinais monitorados.

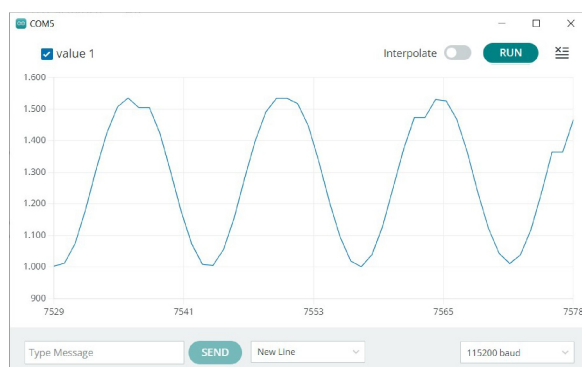


Figura 10. Canal 2 ADS1015

A comunicação entre o ESP32 e o *Firestore Realtime Database* apresentou funcionamento estável durante todo o período de testes. As grandezas elétricas calculadas pelo sistema, incluindo tensão, corrente, potência e energia, foram transmitidas periodicamente e armazenadas corretamente no banco de dados, sem ocorrência de perdas ou falhas de registro. Além disso, os mecanismos de reconexão automática disponibilizados pela biblioteca utilizada mostraram-se eficazes na manutenção da comunicação, mesmo diante de variações temporárias na qualidade do sinal Wi-Fi. Durante os ensaios, foi possível acompanhar as atualizações em tempo real por meio do painel de gerenciamento do *Firestore*, verificando-se a correta estruturação dos dados e o funcionamento adequado da organização hierárquica baseada em pares chave-valor. A Figura 8 ilustra a estrutura final adotada no banco de dados, bem como um exemplo das informações armazenadas durante a operação do sistema. De maneira geral, a solução desenvolvida apresentou desempenho satisfatório quanto à transmissão dos

dados, mantendo intervalos regulares de atualização e latência inferior a um segundo. Esses resultados demonstram que a arquitetura proposta atende aos requisitos de aplicações de monitoramento elétrico remoto em tempo real.

A integração entre o aplicativo móvel e o *Firestore Realtime Database* ocorreu de forma adequada durante os testes realizados. Sempre que uma alteração era efetuada nos valores armazenados no banco de dados, a interface do aplicativo era atualizada automaticamente, refletindo em tempo real as informações enviadas pelo ESP32. Ao longo dos ensaios, o aplicativo apresentou funcionamento estável, sem falhas de execução ou interrupções durante a exibição das grandezas elétricas monitoradas. Os resultados obtidos demonstram que a solução desenvolvida atende aos requisitos de monitoramento remoto propostos, permitindo a visualização das informações de tensão, corrente, potência e energia de maneira simples e eficiente. A Figura 11 apresenta o aplicativo em operação em um dispositivo Android, evidenciando a interface desenvolvida e a exibição das medições recebidas do sistema de monitoramento.



Figura 11. Tela do Aplicativo Android

Com o objetivo de verificar a precisão das informações apresentadas ao usuário, foi realizada uma análise comparativa entre os valores exibidos no aplicativo e as medições de referência obtidas por instrumentos de medição. Para isso, foram coletadas amostras sucessivas dos dados apresentados na interface do aplicativo durante a operação do sistema. A Figura 12 apresenta um conjunto de 17 amostras consecutivas da corrente elétrica exibida no aplicativo, comparadas com os valores de referência medidos por um multímetro. Observa-se que os valores transmitidos pelo sistema permaneceram próximos das medições de referência, indicando que as informações armazenadas no *Firestore* e disponibilizadas pelo aplicativo representam

adequadamente as grandezas elétricas monitoradas. Esses resultados confirmam a consistência da cadeia de aquisição, processamento, transmissão e visualização dos dados implementada no sistema.

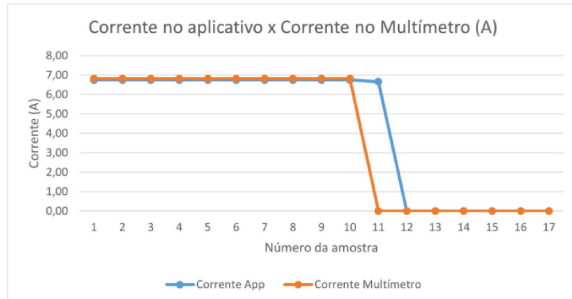


Figura 12. Gráfico de corrente medida

A Figura 13 apresenta 17 amostras consecutivas dos valores de tensão exibidos pelo aplicativo, comparadas com o valor de referência da rede elétrica de 127 V. De forma semelhante ao observado na análise da corrente, os valores apresentados pelo sistema permaneceram próximos do valor esperado, demonstrando a capacidade da solução desenvolvida em representar adequadamente a tensão monitorada. Os resultados obtidos indicam que o processo de aquisição, calibração, processamento e transmissão dos dados foi realizado de maneira consistente, garantindo a confiabilidade das informações disponibilizadas ao usuário.

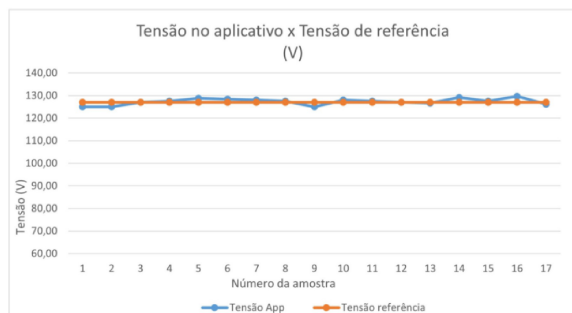


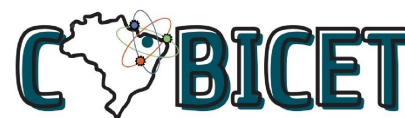
Figura 13. Gráfico de tensão medida

Os resultados obtidos demonstram que o sistema desenvolvido operou de forma contínua e confiável, realizando a aquisição, o processamento e a disponibilização das grandezas elétricas monitoradas sem interrupções significativas. A integração entre os componentes de hardware, o firmware embarcado no ESP32, o *Firestore Realtime Database* e o aplicativo móvel apresentou desempenho consistente, evidenciando a viabilidade da arquitetura proposta para aplicações de monitoramento energético. Além disso, a utilização dos dois núcleos de processamento do ESP32 mostrou-se eficaz, permitindo que as tarefas de aquisição e cálculo fossem executadas de forma independente da comunicação com a nuvem. Entre os resultados observados, destacam-se o

correto funcionamento dos sensores ACS758 e ZMPT101B, que foram capazes de reproduzir adequadamente os sinais de corrente e tensão utilizados durante os ensaios. As formas de onda adquiridas apresentaram comportamento compatível com os sinais medidos por instrumentos de referência, enquanto o processo de transmissão dos dados para o Firebase ocorreu de forma estável. Da mesma forma, o aplicativo Android refletiu corretamente as atualizações realizadas no banco de dados, disponibilizando ao usuário as informações monitoradas com baixo tempo de resposta. O sistema também demonstrou potencial de aplicação em diferentes contextos. No ambiente educacional, pode ser utilizado como ferramenta de apoio ao ensino de eletrônica, instrumentação, sistemas embarcados e Internet das Coisas. Em aplicações residenciais, possibilita o acompanhamento do consumo energético de cargas específicas, permitindo ao usuário monitorar parâmetros elétricos e analisar o comportamento do consumo ao longo do tempo. A comparação entre os valores obtidos pelo sistema e os valores de referência indicou que as medições permaneceram dentro da faixa de precisão esperada para a aplicação proposta. Os resultados fornecidos pelos sensores de tensão e corrente apresentaram boa concordância com as medições realizadas por instrumentos de referência, demonstrando que os métodos de aquisição, calibração e processamento adotados foram adequados para o monitoramento de grandezas elétricas em instalações residenciais. De forma geral, o trabalho evidencia que a combinação de sensores de baixo custo, plataformas embarcadas e serviços em nuvem possibilita o desenvolvimento de soluções funcionais para monitoramento energético. Além de atender aos objetivos propostos, o sistema constitui uma base para o desenvolvimento de aplicações futuras envolvendo automação residencial, supervisão remota e gerenciamento de energia. Como perspectivas de continuidade, o projeto pode ser ampliado com funcionalidades adicionais, como armazenamento histórico das medições, geração de gráficos diretamente no aplicativo, emissão de alertas de consumo, integração com plataformas como Node-RED e desenvolvimento de painéis de supervisão mais completos. Essas melhorias podem aumentar a capacidade de análise dos dados e ampliar as possibilidades de aplicação do sistema em diferentes cenários de monitoramento e gerenciamento energético.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de energia elétrica baseado em Internet das Coisas (IoT), utilizando o microcontrolador ESP32, sensores de tensão e corrente, armazenamento em nuvem por meio do *Firestore Realtime Database* e um aplicativo móvel



para visualização dos dados. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema foi capaz de realizar a aquisição, o processamento e a transmissão das grandezas elétricas de forma estável e confiável. As medições de tensão e corrente apresentaram boa concordância com os valores de referência, indicando que os métodos de aquisição, calibração e processamento adotados foram adequados para a aplicação proposta. Além disso, a integração entre o hardware, o banco de dados em nuvem e o aplicativo móvel ocorreu de maneira satisfatória, permitindo o monitoramento remoto das grandezas elétricas com baixa latência. Dessa forma, os objetivos estabelecidos para o trabalho foram alcançados, comprovando a viabilidade da utilização de tecnologias IoT e plataformas embarcadas de baixo custo para aplicações de monitoramento energético residencial.

REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2025: Ano base 2024. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2025.

MOURA, F. A.; SILVA, R. S.; OLIVEIRA, L. M. Energy consumption monitoring in smart homes: challenges and opportunities for residential energy efficiency. *Energy Reports*, v. 10, p. 4821-4834, 2024.

AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.

SARKER, I. H.; KHAN, A. I.; KAYES, A. S. M.; WATTANAPONGPHASUK, P. Internet of Things for smart and sustainable environments: recent advances, challenges and future directions. *Internet of Things*, v. 25, p. 101145-101167, 2024.

STOJKOSKA, B. L. R.; TRIVODALIEV, K. V. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 1454-1464, 2017.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOAR, J. Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855-873, 2017.