

Sistema embarcado analisador de qualidade de energia com interface em aplicação *Android*

Rafael Correa, Caio Molinari, Luis Lolis

Grupo de concepção de circuitos e sistemas integrados (GICS)

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

rafaelcorrea15@yahoo.com.br

Resumo—Este artigo apresenta um projeto de sistemas eletrônicos embarcados, baseado em microcontrolador ESP-32, capaz de aferir dados de tensão e corrente elétrica da rede e, a partir deles, calcular distorção harmônica total, fator de potência e frequência. As métricas são enviadas via Wi-Fi (IEEE 802.11) a um servidor Firebase, do Google, de onde são lidas por uma aplicação desenvolvida para Android e apresentadas ao usuário. O algoritmo foi desenvolvido em C++, enquanto a aplicação foi construída em JAVA. Também foi projetado um circuito de instrumentação capaz de fazer a aquisição de dados reais de tensão e corrente da rede para posterior cálculo dos dados. Em testes realizados com o auxílio de um gerador de funções, foram obtidos resultados satisfatórios, com erro relativo menor que 1% em todas as métricas quando comparadas com seus valores teóricos. O envio de dados ao aplicativo funcionou corretamente, e os circuitos de instrumentação obtiveram resultados de atenuação e filtragem correspondentes aos esperados.

I. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos equipamentos eletrônicos da atualidade é alimentada por fontes comutadas, as quais são responsáveis por injetar uma grande quantidade de corrente harmônica no sistema, gerando assim também tensões harmônicas [1]. Tais distorções harmônicas na rede elétrica são prejudiciais para os equipamentos conectados a ela, podendo causar consideráveis impactos econômicos [2].

Por conta desses fatores, mostra-se cada vez mais essencial que seja realizada a avaliação da qualidade de energia do sistema. O presente artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado de baixo custo, capaz de realizar tais medidas cumprindo a legislação sobre medidores de qualidade de energia. O produto final poderá ser utilizado com o objetivo de melhorar a eficiência energética de pequenas e médias empresas.

O projeto, iniciado em [3], consistiu no cálculo de métricas de qualidade de energia utilizando o microcontrolador ESP-32. Para o desenvolvimento do algoritmo, utilizou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) para o cálculo da taxa de distorção harmônica e fator de potência, além dos valores no domínio do tempo para o cálculo da frequência do sinal. O protótipo transmite os dados para a Internet via Wi-Fi (IEEE 802.11) e os armazena no banco de dados *Firebase*, do Google. Foi

desenvolvida uma aplicação em sistema *Android* que mostra os dados armazenados no servidor em tempo real, além de apresentar um histórico de 24 horas.

Ademais, foi projetado um circuito de instrumentação para que pudesse ser possível a captação de sinais reais de tensão e corrente da rede elétrica e sua atenuação aos níveis do CAD (conversor analógico-digital), para posterior cálculo de seus parâmetros de qualidade de energia.

Por fim, vale ressaltar que a combinação de todos os dispositivos utilizados nesse projeto (microcontrolador e instrumentação) resultam em um custo final em torno de R\$ 200,00, enquanto medidores comerciais como o Fluke 435 series II custam aproximadamente R\$ 50.000,00.

II. INSTRUMENTAÇÃO

Em comparação ao trabalho desenvolvido em [3], a implementação da instrumentação eletrônica, que será discutida adiante, foi um dos grandes avanços do projeto. O CAD interno do microcontrolador ESP-32 tem faixa de tensão de entrada recomendada entre 100 mV e 950 mV para maior precisão [4]. Para tanto, é necessário um circuito de instrumentação de tensão e outro de corrente, de forma que seus valores sejam adequados a tal faixa.

Para o circuito de tensão, foi projetado um amplificador diferencial para aferir o sinal de tensão alternada da rede elétrica [5], cujo valor máximo especificado por este projeto é de 220 V_{RMS}. O circuito projetado é apresentado na figura 1, e sua equação de ganho é:

$$V_{OUT} = \frac{R_5}{R_4} * V_{IN} + 5,4 V, \quad (1)$$

onde V_{IN} é a tensão da rede elétrica e V_{OUT}, a tensão no ponto A mostrado na figura 1.

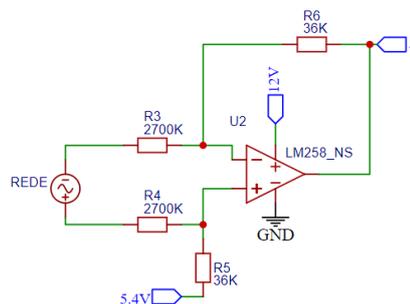


Fig. 1. Amplificador diferencial para aferição de tensão

Para a aferição de corrente, é utilizado o sensor de efeito Hall ACS712, que opera na faixa de ± 5 A em sua entrada, em série com o ramo a ser analisado. Tal sensor tem sensibilidade de 185 mV/A, e sua curva de resposta é apresentada na figura 2, retirada de seu *Datasheet*.

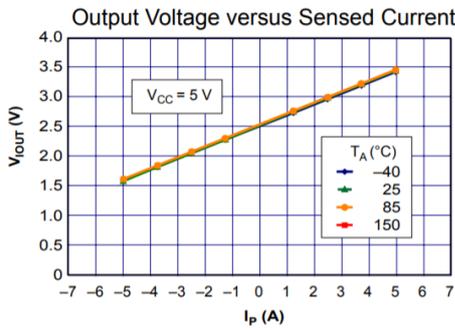


Fig. 2. Curva de resposta do sensor ACS712

Como existem, nos sinais, componentes de alta frequência que podem vir a prejudicar a informação de interesse, é necessário utilizar um filtro *anti-aliasing* passa-baixa [6] antes da entrada do CAD para ambas as aferições. Esse filtro deve, idealmente, atenuar as componentes acima de 1800 Hz, o que corresponde à 30ª harmônica de um sinal de 60 Hz. Para esse fim, é utilizado um filtro biquadrático Tow-Thomas, calculado para uma frequência de corte de 2 kHz [7]. A figura 3 apresenta o esquemático de tal filtro aplicado à aferição de tensão, cuja fórmula de ganho é:

$$V_{OUT} = \frac{R_8}{R_7} * V_{IN}, \quad (2)$$

onde V_{IN} e V_{OUT} são, respectivamente, as tensões nos pontos A e V_O mostrados na figura 3, sendo V_O ligado diretamente à entrada do CAD do microcontrolador.

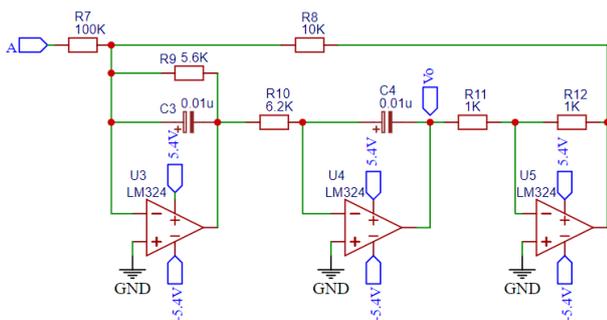


Fig. 3. Filtro *anti-aliasing* aplicado à aferição de tensão

O filtro da figura 3 é igualmente aplicado à aferição de corrente, com o ponto A ligado à saída do sensor de efeito Hall e o valor do resistor R_7 alterado para 39 k Ω , a fim de ajustar o ganho corretamente à faixa de entrada recomendada do CAD do ESP-32.

Com os ganhos aplicados aos circuitos de aferição, a tensão de saída projetada para uma entrada de tensão de 220 V_{RMS} é uma senoide com tensão mínima de 125 mV e tensão máxima de 955 mV. No circuito de aferição de corrente, para uma corrente senoidal de 5 A de pico na entrada, projeta-se na saída uma tensão senoidal entre os

valores 384 mV e 897 mV. Tais faixas máximas de operação são condizentes com a faixa recomendada do CAD, tendendo a levar a aquisição a uma maior precisão.

Observa-se nos esquemáticos que foi necessário utilizar tensões de alimentação de -5,4 V, 5,4 V e 12 V. Para isso, foi projetada uma fonte simétrica utilizando uma fonte adquirida de tensão 10,8 V, um circuito divisor de tensão, um amplificador operacional como *buffer* e capacitores de *bypass*, como mostra a figura 4. Isso gera as tensões de $\pm 5,4$ V. Para geração da tensão de 12 V, foi utilizado o conversor *Boost* ajustável MT3608, utilizando como entrada a tensão previamente gerada.

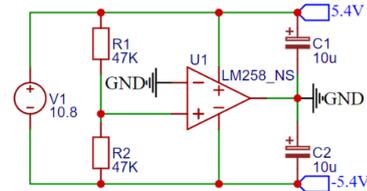


Fig. 4. Fonte simétrica de $\pm 5,4$ V

III. ALGORITMO

A. Resposta em Frequência e Cálculo da Taxa de Distorção Harmônica Total (DTT)

Comparativamente ao trabalho desenvolvido em [3], os algoritmos de cálculo de distorção harmônica total (DTT) e fator de potência (FP) (subseção B) se mantiveram iguais.

Todos os sinais periódicos e não senoidais podem ser representados pela soma de sinais senoidais juntamente com um sinal contínuo. A essa propriedade, dá-se o nome de superposição de efeitos [8]. A transformada rápida de Fourier (FFT) nos permite analisar os sinais individuais do sinal original no domínio da frequência de forma computacionalmente eficiente.

No projeto, foi definido que seriam realizadas 512 amostras do sinal de tensão do sinal de corrente, para o posterior cálculo dos parâmetros [3]. O cálculo da FFT visava a analisar 30 harmônicas da frequência fundamental de 60 Hz, ou seja, até 1800 Hz. Para respeitar o limite de Nyquist a frequência de amostragem escolhida foi 3840 Hz (período de 260 μ s).

Foi desenvolvido um algoritmo de cálculo de DTT a partir da FFT, utilizando o método de cálculo definido pelo PRODIST – módulo 8 [10]. A partir dele, são calculadas tanto a DTT da tensão quanto a DTT da corrente. A equação implementada é dada por:

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100, \quad (3)$$

onde V_1 é a amplitude da tensão RMS da harmônica fundamental e V_h , da h-ésima ordem.

B. Cálculo do Fator de Potência (FP)

O cálculo do FP foi desenvolvido também a partir da FFT dos sinais de entrada, aproveitando o fato de que o algoritmo já os decomporia em frequência para o cálculo da DTT e, assim, a implementação desse parâmetro seria facilitada [3]. A equação implementada no algoritmo é:

$$FP = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{V_i[f]}{V_r[f]} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{I_i[f]}{I_r[f]} \right) \right], \quad (4)$$

onde os índices “i” e “r” representam, respectivamente, os valores imaginários e reais dos vetores obtidos com o cálculo da FFT da tensão (V) e da corrente (I). O índice f representa a frequência fundamental do sinal (60 Hz).

C. Cálculo da Frequência

Em termos de algoritmos de cálculo, a novidade em relação a [3] foi a implementação de um algoritmo para o cálculo da frequência, baseado em estimar os pontos de cruzamento em zero do sinal de tensão, este já com sua componente contínua removida. Para isso, utilizou-se uma técnica de interpolação linear, na qual cada cruzamento em zero é estimado utilizando duas amostras subsequentes onde observa-se a inversão do sinal. Em seguida, tais pontos são armazenados e cada um é comparado com seu anterior, estimando assim o período do sinal tomando como base o período de amostragem. Faz-se a média dos períodos calculados e, assim, a frequência do sinal amostrado é calculada.

Quanto maior o número de cruzamentos em zero na amostragem, mais precisa é a estimativa de frequência. Para obter a exatidão desejada no cálculo, observou-se que seria necessário reduzir a frequência de amostragem para manter a quantidade de 512 amostras e aumentar o número de ciclos amostrados do sinal. Portanto, é feita uma nova amostragem do sinal de tensão a 384 Hz, voltada ao cálculo da frequência. Esse valor foi escolhido por ser múltiplo da outra frequência de amostragem utilizada, 3840 Hz, facilitando assim a implementação do algoritmo.

IV. CONEXÃO E APLICATIVO

A. Desenvolvimento em Android Studio

Outra adição significativa ao projeto iniciado em [3] foi o desenvolvimento de uma interface de visualização de dados em tempo real com armazenamento em servidor na nuvem (subseção B).

Foi desenvolvido um aplicativo em linguagem *Java* no *framework Android Studio*. Isso foi feito para permitir ao usuário a visualização de forma simples dos dados obtidos pelos algoritmos previamente apresentados.

Além do menu de cadastro e login de usuário, foram desenvolvidas duas interfaces gráficas principais que tem como função apresentar as métricas calculadas em tempo real e com um histórico de 24 horas, como mostrado na figura 5.



Fig. 5. Aplicação Android

B. Servidor Firebase

Após o desenvolvimento das interfaces gráficas, foi posto em prática o design do projeto, integrando o microcontrolador e o aplicativo através do servidor *Firebase*, com os dados sendo enviados de um ponto a outro via *Wi-Fi* (IEEE 802.11).

O *Firebase* é um serviço em cloud do *Google*. Nele, os dados são armazenados em formato de árvore. As informações são enviadas para o aplicativo periodicamente.

V. RESULTADOS

Para a verificação da atenuação do circuito de instrumentação de tensão, foi aplicada à entrada do circuito um sinal senoidal gerado por um gerador de funções. Os resistores R_3 e R_4 da figura 1 foram substituídos por resistores de 39 k Ω para diminuir a atenuação do circuito, uma vez que o sinal a ser aplicado pelo gerador teria amplitude muito menor que a da rede elétrica. A senoide aplicada à entrada teve amplitude de 4,5 V, equivalente a uma entrada de 220 V_{RMS} para a atenuação original. A senoide na saída do circuito variou entre 112 mV e 944 mV, o que condiz com a previsão apresentada na seção II.

Para a verificação da atenuação do circuito de instrumentação de corrente, foi aplicada à entrada do sensor de efeito Hall uma corrente senoidal de aproximadamente 900 mA de amplitude, relativa a uma carga de 200 W ligada a uma tomada de 127 V_{RMS} . Na saída do circuito, obteve-se uma tensão senoidal entre 591 mV e 673 mV, adequada à previsão de tensão entre 598 mV e 684 mV, calculada de acordo com o exposto na seção II.

A validação do filtro *anti-aliasing* se deu aplicando um sinal impulso provido por um gerador de funções em sua entrada, analisando sua saída pela função FFT do osciloscópio. Foi observada uma frequência de corte de 1800 Hz, totalmente adequada aos propósitos do projeto, uma vez que essa é a frequência da 30ª harmônica.

As métricas calculadas pelo algoritmo foram testadas utilizando sinais simulados em *Python* e enviados ao

microcontrolador via comunicação serial, assim como a partir de sinais gerados pelo gerador de funções e aplicados ao CAD. A tabela 1 apresenta os resultados de DTT, enquanto a tabela 2 apresenta os resultados de frequência. Observa-se que os resultados apresentados são muito satisfatórios, uma vez que os valores experimentados são extremamente precisos.

TABELA 1. RESULTADOS DE DTT

Forma de onda em 60 Hz	DTT medida - sinal do gerador	DTT medida - sinal simulado	DTT teórica	Erro - sinal do gerador
Senoidal	0,97%	0%	0%	0,97%
Quadrada	48,24%	48,24%	48,3%	0,06%

TABELA 2. RESULTADOS DE FREQUÊNCIA

Frequência de onda senoidal	Frequência medida - sinal do gerador	Frequência medida - sinal simulado	Erro relativo – sinal do gerador
58 Hz	58,00 Hz	58,00 Hz	0%
60 Hz	60,00 Hz	60,00 Hz	0%
62 Hz	62,00 Hz	62,00 Hz	0%

A tabela 3 apresenta os resultados do cálculo de FP. Para isso, foi realizada a mesma metodologia de teste utilizada para as outras métricas, mas com dois sinais de entrada defasados, sendo um deles a representação da informação de corrente. Os resultados se mostraram igualmente precisos.

TABELA 3. RESULTADOS DE FP

Defasagem entre os sinais	FP medido - sinais do gerador	FP medido - sinais simulados	FP teórica	Erro relativo - sinais do gerador
0°	1	1	1	0%
140°	0,762	0,766	0,766	0,52%
120°	0,501	0,500	0,5	0,2%

Todos os resultados foram obtidos em tempo real pelo aplicativo desenvolvido, comprovando assim o correto funcionamento deste, assim como da transmissão de dados. A taxa de atualização de dados no aplicativo é de aproximadamente 10 segundos, podendo variar em 5 segundos dependendo da velocidade de conexão da rede *Wi-Fi* utilizada.

VI. CONCLUSÃO

Conclui-se que o projeto teve sucesso dentro do que foi proposto, pois calculou todas as métricas com a precisão necessária para fazer dele um medidor empregável de qualidade de energia, além de possuir uma interface adequada com o usuário por meio do aplicativo. Isso o torna possivelmente aplicável a empresas de pequeno ou médio porte. Em trabalhos futuros, algumas melhorias podem ser feitas, como a implementação, no algoritmo, do cálculo de valor eficaz e potência ativa, a criação de um *site* de interface com o usuário em alternativa ao aplicativo, além de testes utilizando um medidor *Fluke* para uma melhor avaliação do cálculo da DTT.

REFERÊNCIAS

- [1] RODRIGUES, A. M. Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa. 2009. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/38.pdf> Acesso em: 05 julho. 2021
- [2] POMILIO, J. A. Harmônicos e Fator de Potência: um Curso de Extensão. 1997. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/harmo.html> Acesso em: 20 junho. 2021
- [3] MOLINARI, C. Sistema embarcado medidor de taxa de distorção harmônica e fator de potência da rede. 2020
- [4] MORAIS, J. ESP32 – Analisando e corrigindo o ADC interno. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/esp32-adc-interno/> Acesso em: 19 julho. 2021
- [5] MALIK, B. AC Voltage measurement using PIC16F877A microcontroller. Disponível em: <https://microcontrollerslab.com/ac-voltage-measurement-using-microcontroller/> Acesso em: 21 julho. 2021
- [6] OPPENHEIM, A. V. Processamento em Tempo Discreto de Sinais. 3ª Edição. São Paulo: Pearson Education, 2012.
- [7] ANTUNES. P. R. Plataforma de aquisição de dados e algoritmo não embarcado para medição de distorção harmônica na rede elétrica. 2016. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/doku-wiki/arquivostccs/355.pdf> Acesso em: 21 julho. 2021.
- [8] MYASAKA, G. Análise de perdas técnicas em circuitos secundários de distribuição. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21125/3/An%C3%A1lisePerdasT%C3%A9cnicas.pdf> Acesso em: 04 julho. 2021.
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS. Understanding FFTs and Windowing. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/understanding-ffts-and-windowing.html> Acesso em: 19 julho. 2021/
- [10] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2016. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf Acesso em: 30 junho. 2021