

Sistema embarcado medidor de taxa de distorção harmônica e fator de potência da rede.

Caio Molinari, Luis Lolis

Grupo de concepção de circuitos e sistemas integrados (GICS)
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
caio.molinari@ufpr.br

Resumo—No presente artigo, é apresentada uma plataforma embarcada de aquisição de dados e cálculo de distorção harmônica e fator de potência conectada à internet via Wi-Fi (IEE 802.11). O projeto foi realizado a partir do microcontrolador ESP-32 em ambiente Arduino IDE, no qual foi desenvolvido um algoritmo de cálculo das métricas de qualidade de energia supracitadas. A validação das medidas se deu em dois momentos: o primeiro se consistiu no cálculo das métricas de sinais gerados matematicamente; já o segundo se consistiu na obtenção de sinais gerados em laboratório através do Conversor Analógico-Digital (CAD) interno do microcontrolador e posterior cálculo das métricas. Uma vez validados, tais resultados foram enviados com sucesso para a Internet via Wi-Fi utilizando-se o protocolo MQTT. Em comparação aos valores teóricos das métricas, obteve-se um erro inferior a 0,1% para a Distorção Total de Tensão (DTT) e inferior a 1% para o Fator de Potência (FP) para os sinais gerados em simulação. Com relação aos dados obtidos experimentalmente, o erro observado foi inferior a 2,5% para DDT. Para FP, não foram obtidos resultados.

I. INTRODUÇÃO

As distorções harmônicas da rede elétrica são prejudiciais para os equipamentos a ela conectados e causam impactos econômicos substanciais [1]. Atualmente, a maioria dos equipamentos eletrônicos opera a partir de fontes de alimentação comutadas que são responsáveis por injetar uma quantidade significativa de corrente harmônica no sistema, o que acaba por gerar tensões harmônicas [5]. Com isso, revela-se a importância do monitoramento da qualidade de energia no sistema. Infelizmente, os medidores comercializados que realizam tal função possuem um custo monetário consideravelmente elevado. Desse modo, propôs-se um sistema embarcado de baixo custo que fosse capaz de realizar tais medidas. O produto final poderá ser utilizado por pequenas e médias empresas para uma verificação inicial da qualidade da rede local a fim de aumentar sua eficiência energética.

A primeira etapa do projeto se consistiu no cálculo de métricas de qualidade de energia em ambiente simulado e posteriormente experimental com o uso de um gerador de sinais que pudesse introduzir no sistema formas variadas

de ondas de tensão que seriam captadas pelo CAD (Conversor Analógico-Digital) interno do microcontrolador ESP-32. Para o desenvolvimento do algoritmo, utilizou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) para posterior cálculo da taxa de distorção harmônica. Por último, a transmissão de dados para a Internet via Wi-Fi (IEE 802.11) foi fundamentada no uso do protocolo MQTT com o objetivo de apresentar os dados no broker *Adafruit.IO*.

II. DISTORÇÕES

A. Definição de Distorções Harmônicas e DTT

Um sinal periódico tem como sua primeira frequência a harmônica fundamental. Todas as energias observadas nos múltiplos inteiros dessa frequência são consideradas harmônicas de ordem superior [1]. No caso do presente projeto, utilizou-se a frequência da rede, 60Hz. Esse tipo de fenômeno é ocasionado quando da presença de dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente, como motores, transformadores e equipamentos eletrônicos que produzem descontinuidades na corrente devido ao uso de conversores chaveados. Esse fenômeno pode ser quantificado através da taxa de distorção harmônica individual de tensão (DIT_h), a qual se refere a contribuição de cada componente de frequência, dada por:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100, \quad (1)$$

onde V_1 é a amplitude da tensão RMS da harmônica fundamental e V_h , da h -ésima ordem. O fenômeno também pode ser analisado através da taxa de distorção harmônica total de tensão (DTT) a qual considera a soma dos efeitos de todas as componentes, dada por:

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

Ambas as equações são definidas pelo PRODIST – módulo 8 [2]. Vale salientar que essas distorções estão presentes tanto no sinal de tensão quanto no de corrente, sendo a taxa de distorção da última muito superior, em geral, à taxa de distorção da primeira. Isso ocorre, pois, a tensão distribuída na rede elétrica é controlada pela concessionária enquanto a corrente circulante é influenciada pelas cargas

ligadas ao sistema elétrico, sobre as quais não há controle direto visto que o uso delas é determinado individualmente pelo usuário [3].

B. Efeitos adversos das distorções harmônicas

Existem harmônicas pares e ímpares, sendo essas as mais comuns, intensas e prejudiciais. Além da paridade, as distorções harmônicas podem ser caracterizadas pela sua sequência, que pode ser positiva, negativa ou zero.

À exemplo de um motor trifásico, a presença de harmônicas de sequência positiva geraria um campo girante direto [4] resultando em sobrecorrente nos enrolamentos e aquecimento indesejado. Harmônicas de ordem negativa, por sua vez, geram rotação oposta, freando o motor e produzindo aquecimento. Por último, as harmônicas de sequência zero não influenciam a rotação do motor, no entanto, somam-se no condutor neutro causando aquecimento, destruição de bancos de capacitores e outros problemas [5].

Os prejuízos não se limitam, no entanto, apenas a motores, podendo comprometer o bom funcionamento de transformadores, capacitores, equipamentos eletrônicos, aparelhos de medição etc [1].

III. ALGORITMO E ANÁLISE DO SINAL

A. Análise espectral

Todo sinal não senoidal periódico pode ser decomposto em uma soma de sinais senoidais e de uma componente contínua. A partir dessa decomposição, é possível analisar separadamente os sinais de diferentes frequências e o sinal original pode ser reconstruído tomando por base a soma deles. A essa propriedade, dá-se o nome de superposição de efeitos. [3]

A ferramenta matemática que possibilita analisar, no domínio da frequência, os sinais individuais do sinal original é a DFT (Transformada Discreta de Fourier). No entanto, essa operação matemática possui um alto custo computacional e, dessa forma, desenvolveu-se um algoritmo que desempenha a mesma função, porém de forma computacionalmente mais eficiente, a FFT (Transformada Rápida de Fourier).

Ao utilizar a FFT, fundamenta-se a análise sobre um conjunto finito de dados coletados durante um determinado período. Assim, quando a amostragem compreende um múltiplo inteiro de períodos, a FFT é perfeitamente calculada [7]. Em casos reais, no entanto, a amostragem não compreenderá um múltiplo inteiro do sinal e a frequência não é fixa, no caso, em 60 Hz. Portanto, o sinal não será adequadamente reconstruído. Consequentemente, a FFT apresentará vazamento espectral (*spectral leakage*). Assim, faz-se necessário empregar técnicas de janelamento ao sinal original.

Fundamentando-se nesse princípios e em certas características construtivas do microcontrolador ESP-32, foram escolhidos os parâmetros para o cálculo da FFT. Primeiramente, definiu-se que seriam utilizados 512 pontos no cálculo, pois não havia necessidade de uma grande

resolução em frequência. O cálculo da FFT visava a analisar 30 harmônicas da frequência fundamental (60Hz) o que resulta em 1800Hz; buscando respeitar o limite de Nyquist, tal frequência deve ser multiplicada por 2 a fim de evitar *aliasing*, resultando em 3600Hz. Contudo, devido a certas limitações que serão esclarecidas a seguir, optou-se por utilizar uma frequência ligeiramente maior. O ESP-32 possui um *clock* interno de 240MHz, isto é, realiza uma operação a cada 4,2ns; a fim de obter uma boa precisão na amostragem no sinal, o intervalo de amostragem dela deveria ser um múltiplo inteiro ou muito próximo do período de *clock*, que atendesse ao critério de Nyquist e cuja frequência fosse divisível pelo número de amostras. Assim, chegou-se à frequência de 3840Hz com um período de 260µs. Dessa forma, restou definir o tipo de janelamento a ser efetuado sobre o sinal; devido às características do sinal a ser analisado - sinal senoidal com precisão de magnitude relevante - optou-se pela janela *Flat-top* [7].

Nas figuras 1, 2, e 3 pode-se verificar, o processamento do sinal de uma onda quadrado com frequência de 60 Hz gerada em laboratório por um gerador de sinais e amostrada através do CAD do microcontrolador à taxa supracitada. As etapas são: i) Amostragem do sinal à 3840 Hz (figura 1); ii) Multiplicação entre sinal amostrado e janela *Flat-Top* (figura 2); iii) Cálculo da FFT em magnitude (figura 3).

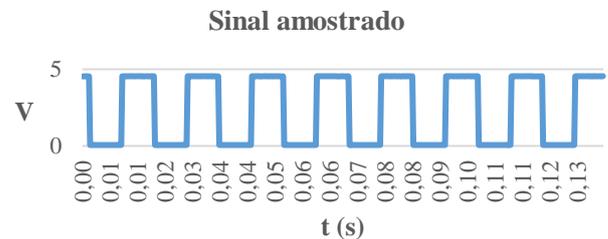


Fig. 1. Sinal 60 Hz de onda quadrada amostrado pelo CAD

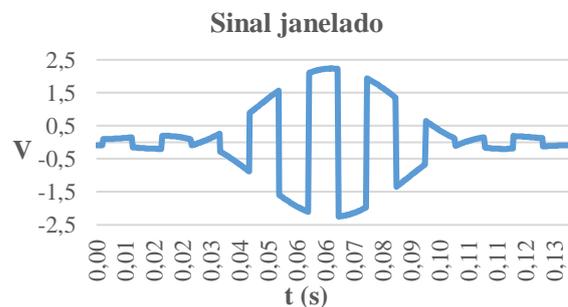


Fig. 2. Sinal resultante da operação de janelamento

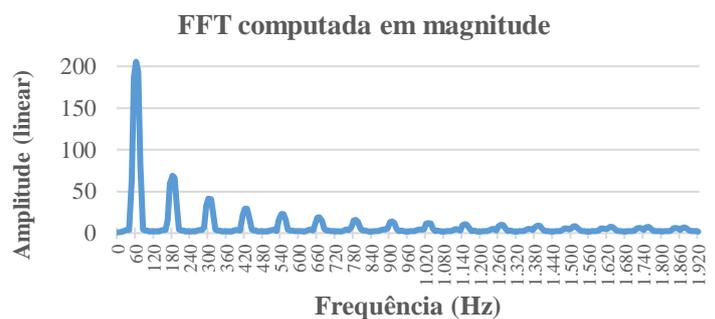


Fig. 3. FFT calculada em magnitude

Em seguida, foi desenvolvido um algoritmo de cálculo para a DTT a partir da FFT. Para tanto, utilizou-se o método de cálculo definido pelo PRODIST – módulo 8 [2] (equação 2). Adicionalmente, foi implementado o cálculo do Fator de Potência (FP) tendo em vista que o sinal já se encontrava inteiramente decomposto em frequência e bastaria adicionar poucas linhas de código para obter a métrica desejada com uma boa precisão a partir de:

$$FP = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{V_i[f]}{V_r[f]} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{I_i[f]}{I_r[f]} \right) \right], \quad (3)$$

onde, os índices “i” e “r” representam, respectivamente, os valores imaginários e reais dos vetores obtidos com o cálculo da FFT para tensão (V) e corrente (I); por último, o índice f representa a frequência fundamental do sinal. É importante salientar que a equação 3 não é o método definido como padrão pelo PRODIST – módulo 8 [2] e foi feito, como dito anteriormente, por questões de praticidade e experimentação.

B. Aquisição de dados e calibração

Para uma boa precisão no cálculo das métricas, é de suma importância que a aquisição de dados seja também precisa. Assim, foi necessário estudar as características do CAD interno do ESP-32 para verificar se seria necessária a aplicação de técnicas de calibração. De acordo com o *datasheet* do microcontrolador [6], a diferença de leitura entre chips pode chegar a até 6%, uma diferença substancial e oriunda, sobretudo, dos diferentes valores de referência de cada placa (V_{Ref}). O valor V_{Ref} padrão é de 1100 mV para 0 dB de atenuação (recomendado para melhor precisão), no entanto, as tensões de referência podem estar entre 1000 e 1200 mV entre chips diferentes. Dessa forma, é absolutamente necessário calibrar adequadamente o CAD. Para tanto, foi utilizada a API de calibração fornecida pela *Espressif Systems*, que calibra o CAD a partir do valor real de referência gravado na *Efuse* do chip como demonstrado na figura 4. Além da calibração é necessário levar em consideração fatores externos que podem comprometer a performance do CAD, sendo o mais importante deles o Wi-Fi, que pode tornar as medições ruidosas e imprecisas, como demonstrado na figura 5. Assim, compararam-se os resultados ao se utilizar a API, juntamente com o Wi-Fi desligado, com os obtidos sem fazer uso dessas técnicas ao amostrar um sinal constante de 302 mV lido por um multímetro.

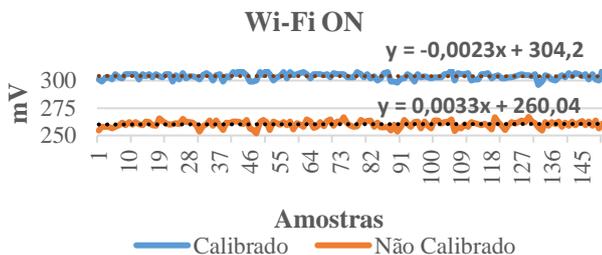


Fig. 4. Comparação entre leitura de CAD calibrado e não calibrado

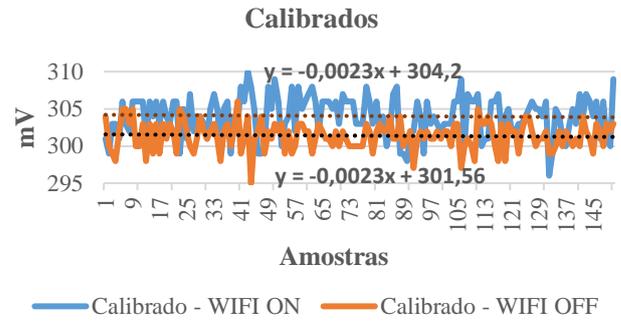


Fig.5. Comparação entre leitura de CAD com Wi-Fi ligado e desligado

Pode-se perceber que houve uma diferença muito significativa entre os valores com e sem calibração. Com relação ao Wi-Fi, não se verificou uma diferença considerável no nível de ruído, no entanto, é possível observar que as medidas com o Wi-Fi desativado aproximaram-se mais do valor lido pelo multímetro.

IV. CONEXÃO WI-FI

A etapa final do projeto teve como foco a transmissão de dados para a Internet. Para este fim, foi utilizada a biblioteca *PubSubClient* que possui recursos eficientes para comunicação através do protocolo MQTT. Este protocolo se fundamenta na utilização de *publishers* e *subscribers*. No contexto desse projeto, o ESP-32 atuou como *publisher* e um computador pessoal, como *subscriber*. Para que esses dispositivos efetivamente se comuniquem, ambos devem estar conectados à um broker MQTT que se encontra na nuvem. Nesse projeto, optou-se por utilizar o broker *Adafruit.IO* pois ele apresenta ferramentas gráficas eficientes e armazena os dados do usuário durante 30 dias. No esquema abaixo (figura 6) ilustra-se a dinâmica de transmissão de dados entre os pontos da rede.

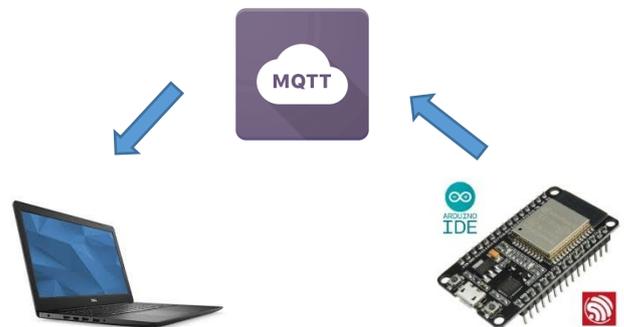


Fig. 6. Esquema explicativo sobre a comunicação MQTT

V. RESULTADOS

Para realizar uma validação inicial dos dados, foram realizados testes em dois campos: teórico e prático. Em âmbito teórico, foram gerados vetores no ESP-32 que representavam uma senoide somada a senoides de

frequências múltiplas da fundamental. Os resultados foram satisfatórios: verificou-se um erro inferior a 0,1% frente ao valor teórico esperado. Já em âmbito prático, utilizando-se o gerador de sinais com formas de onda específicas, as quais foram amostradas pelo CAD interno do ESP-32, os resultados foram satisfatórios, com erro inferior a 2,5% em relação a um sinal teórico. Esse resultado é aceitável dado que o sinal amostrado se trata de uma sequência finita de dados e não possui uma forma perfeita. A seguir, apresentam-se os resultados práticos obtidos com sinais gerados pelo gerador de sinais em laboratório (Tabela 1).

TABELA 1. COMPARATIVO DOS RESULTADOS

Forma de Onda (60Hz)	DTT Algoritmo embarcado (%)	DTT Algoritmo MatLab (%)	DTT Valor teórico (%)	Erro (%)
Quadrada	46,1395	45,9554	48,3	2,16
Senoide (Pura)	0,1619	0,116	0	0,161
Rampa	44,9937	45,0371	*	-

* Valores de referência não encontrados

O cálculo de fator de potência foi aplicado exclusivamente a séries de dados geradas matematicamente devido à falta de acesso a laboratórios durante o primeiro semestre de 2020. No entanto, o erro com relação ao cálculo em MatLab foi menor do que 1%.

Com relação ao uso do *broker* MQTT, foram enviados os resultados com sucesso, os quais foram exibidos através da interface gráfica fornecida pela *Adafruit*, como pode-se observar na figura 7. Vale ressaltar que nas imagens a seguir, foram realizados testes com sinais arbitrários gerados matematicamente com o objetivo central de testar a transmissão de dados. Por esse motivo, foram obtidos valores de DTT acima de 100%.

Com isso, pode-se concluir que o *broker* pode ser utilizado para essa aplicação, no entanto, a sua maior limitação é o tempo de armazenamento de dados caso se deseje desenvolver uma aplicação de monitoramento durante longos períodos.

VI. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o projeto teve sucesso no que se propunha pois calculou as métricas com considerável precisão, o que indica que ele tem potencial para ser utilizado como medidor de qualidade de energia de baixo custo, podendo ser aplicado, por exemplo, em empresas de pequeno ou médio porte visando a melhorar sua eficiência energética. No entanto, para que isso de fato torne-se realidade, alguns aspectos do projeto devem ser, em trabalhos futuros, revistos, como o local de armazenamento de dados, que pode ser substituído pela plataforma *Firebase*. Já outros aspectos devem ser adicionados, como o teste com um medidor *Fluke* para as harmônicas.

REFERÊNCIAS

- [1] 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: 05 junho. 2020
- [2] 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 setembro. 2019.
- [3] 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: 07 junho. 2020.
- [4] PERERIRA, H. A.; PRATES, M. O. Aula 09 – Indicadores de Distorção Harmônica Parte 1. Disponível em: http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula9_ELT428-Indicadores-de-Distor%C3%A7%C3%A3o-Harm%C3%B4nica.pdf Acesso em: 15 junho. 2020.
- [5] 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 junho. 2020
- [6] ESPRESSIF SYSTEMS. Analog To Digital Converter. 2020. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/espid/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/adc.html> Acesso em: 05 junho. 2020.
- [7] 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: 28 julho. 2019.

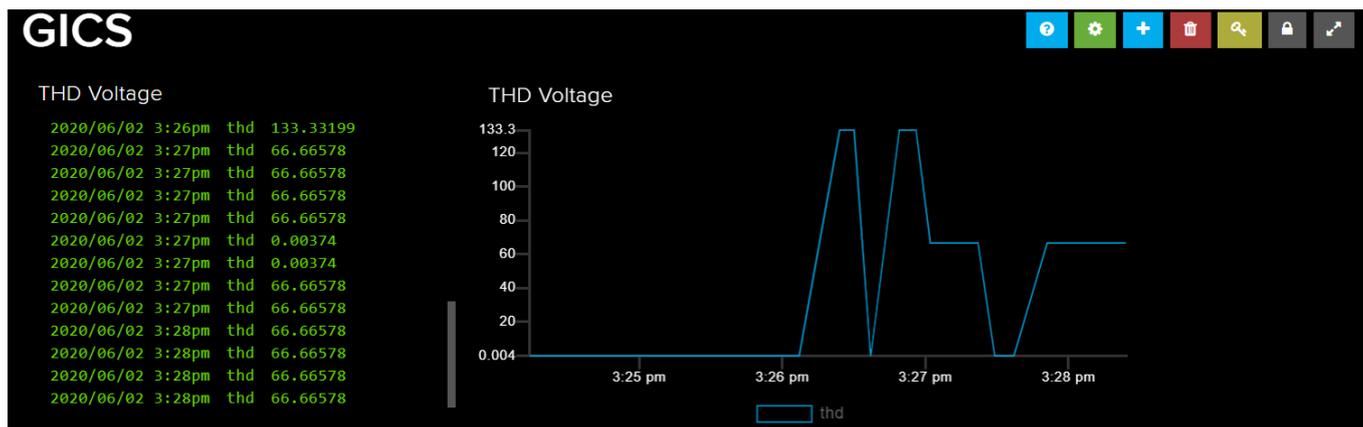


Fig. 7. Gráfico gerado pelos cálculos da DTT exibidos no broker *Adafruit.IO*