



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WERLESON DA SILVA NERY

**ANALISADOR DE COMPONENTES HARMÔNICOS ON-LINE USANDO
RASPBERRY PI PICO**

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

WERLESON DA SILVA NERY

**ANALISADOR DE COMPONENTES HARMÔNICOS ON-LINE USANDO
RASPBERRY PI PICO**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Nicolás Eusebio Cortez Ledesma

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

N456a Nery, Werleson da Silva.

Analizador de componentes harmônicos on-line usando raspberry pi pico [recurso eletrônico] / Werleson da Silva Nery. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 22 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Nicolás Eusebio Ledesma Cortez.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Qualidade de Energia Elétrica, Harmônicos, Distorção, Transformada de Fourier, Raspberry Pi Pico. I. Cortez, Nicolás Eusebio Ledesma, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

**ANALISADOR DE COMPONENTES HARMÔNICOS ON-LINE USANDO
RASPBERRY PI PICO**

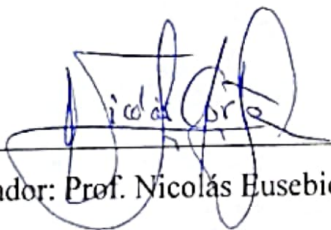
WERLESON DA SILVA NERY

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 21 de dezembro de 2022

Nota: **08,97**

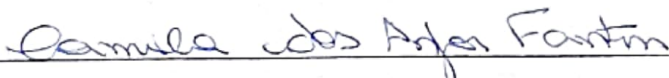
BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Nicolás Eusebio Cortez Ledesma



Examinador: Prof. Bismarck Castillo Carvalho



Examinadora: Profª Camila dos Anjos Fantin

AGRADECIMENTOS

Primeiramente devo minha determinação a Deus, que me concedeu saúde e força para perseverar em meu percurso acadêmico.

Agradeço meus pais, Sandra e Zenildo, e ao meu irmão Henrique por acreditarem nos meus sonhos, sempre me apoiarem, suprirem minhas necessidades e entenderem minha ausência nesses anos que me dediquei à graduação.

Ao meu orientador, Nicolás, pelo acolhimento, comprometimento, paciência, compreensão e esforços imensuráveis para me guiar até o fim dessa jornada acadêmica.

Ao corpo docente, não só da elétrica, mas de todos os demais cursos que fizeram parte da minha formação. Especialmente à professora Camila Fantin pelo apoio e acolhimento extraordinário. Agradeço também aos professores Fabrício Parra, Aldecy e Welitom Ttatom pelas experiências e aprendizados que construíram o alicerce para a realização deste trabalho.

Agradeço também a todos os meus amigos e colegas que me apoiaram e compartilharam conhecimentos e descobertas.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação, com conselhos e ajudas nos estudos.

RESUMO

A crescente utilização de cargas não lineares com elevada potência nominal e de sistemas eletrônicos de controle de potência, aumenta o nível de contaminação nas formas de onda de tensões e/ou correntes, forçando a procurar mecanismos para analisar e compensar as distorções harmônicas. Assim, o presente artigo visa contribuir com o desenvolvimento de um sistema de medição para estimar, em tempo real, as componentes harmônicas presentes em instalações elétricas. O sistema proposto embarca o microcontrolador RP2040 incluído na placa de desenvolvimento Raspberry Pi Pico. O software foi desenvolvido usando o ambiente da plataforma Arduino. Testes experimentais foram realizados e os resultados obtidos foram comparados usando, como referência, o analisador comercial ET-5062 da Minipa. Os resultados mostram que o sistema proposto é promissor, portátil e de baixo custo.

Palavras-Chave – Qualidade de Energia Elétrica, Harmônicos, Distorção, Transformada de Fourier, Raspberry Pi Pico.

ABSTRACT

The growing use of non-linear loads with high rated power and electronic power control systems increases the level of contamination in voltage and/or current waveforms, forcing the search for mechanisms to analyze and compensate for harmonic distortions. Thus, this article aims to contribute to the development of a measurement system to estimate, in real time, the harmonic components present in electrical installations. The proposed system incorporates the RP2040 microcontroller included in the Raspberry Pi Pico development board. The software was developed using the environment of the Arduino platform. Experimental tests were carried out and the results obtained were compared using a reference meter, the ET-5062 analyzer from Minipa.

Keywords - Electric power quality, Harmonics, Distortion, Fourier Transform, Raspberry Pi Pico.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1. Módulo RZ Easy FPGA A2.1.	16
Fig. 2. DAC - topologia R-2R.	17
Fig. 3. Tensão (azul) e corrente (vermelho) – setup 1.....	17
Fig. 4. Índice de distorção harmônica total (Azul claro) e índices individuais da fundamental, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª harmônicas (respectivamente indicadas em vermelho, verde claro, azul escuro, marrom e verde escuro) – setup 1.....	17
Fig. 5. Tensão (azul) e corrente (vermelho)– setup 2.....	17
Fig. 6. Índice de distorção harmônica total (Azul claro) Índices de distorção individual da fundamental, 2ª, 3ª e 4ª harmônicas (respectivamente indicadas em vermelho, verde claro, azul escuro e marrom) – setup 2.....	17
Fig. 7. Tensão de suprimento – setup 3.	18
Fig. 8. Amplitude da fundamental, 3ª e 5ª harmônicas (respectivamente indicadas em azul, vermelho e verde) – setup 3.....	18
Fig. 9. Tensão e corrente – setup 4.	18
Fig. 10. Amplitude da fundamental, 3ª e 5ª harmônicas (respectivamente indicadas em azul, vermelho e verde) – setup 4.....	18
Fig. 11. Diagrama de blocos funcionais do sistema proposto.	18
Fig. 12. Divisor de tensão e CCS.....	19
Fig. 13. Raspberry Pi Pico.	19
Fig. 14. Foto do protótipo do sistema de medição proposto e dimmer.	19
Fig. 15. Fluxograma da aquisição de dados.....	20
Fig. 16. Setup para comparação e calibração.	20
Fig. 17. Dados coletados para calibração do sistema proposto.	20
Fig. 18. Relação entre os valores lidos pelo Raspberry Pi Pico e o pelo medidor de referência.	20
Fig. 19. Ondas DST01 e DST16 normalizadas.	21
Fig. 20. Ondas DST11 e DST14 normalizadas.	21
Fig. 21. Ondas DST19 e Fundamental normalizadas.	21
Fig. 22. RPi vs ET-5062, com dimmer para 100%.....	21
Fig. 23. RPi vs ET-5062, com dimmer para 75%.....	21
Fig. 24. RPi vs ET-5062, com dimmer para 50%.....	22
Fig. 25. RPi vs ET-5062, com dimmer para 25%.....	22

LISTA DE TABELAS

TABELA I Valores das componentes harmônicas geradas e estimadas.	21
TABELA II Comparativa de valores do DTT	22
TABELA III Comparativa de valores do índice de DTT	22
TABELA IV Componentes harmônicas individuais de ordem H^o	22
TABELA V Tensão rms por harmônica de ordem H^o para o dimmer em 100% com seus respectivos erros.	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ARM	Família de processador com arquitetura de baixo consumo e poucas instruções.
CAD	Conversor Analógico Digital.
DAC	<i>Digital Analog Converter</i> (Conversor digital-analógico)
DITH%	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
DST	<i>Discrete Sine Transform</i> (Transformada discreta de seno).
DTT%	Distorção harmônica total de tensão
ESP32	Placa de desenvolvimento com Wi-Fi e Bluetooth embarcados.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
HFS	<i>Harmonic Frequency Scan</i> (Varredura de Frequências Harmônicas).
QEE	Qualidade de energia elétrica.
rms	<i>Root Mean Square</i> (Valor quadrático médio ou valor eficaz).
RP2040	Microcontrolador desenvolvido pela Fundação Raspberry.
true rms	Valor rms de qualquer formato de onda.

LISTA DE SÍMBOLOS

ω_0	Velocidade Angular dada por $2\pi f$ (rad/s).
f	Frequência (Hz).
L	Indutância (H).
R	Resistencia (Ω).
T	Período (s).
V	Tensão (V).

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	14
1) Distorções harmônicas	15
2) Efeitos adversos das Distorções Harmônicas.....	15
II. MATERIAL E MÉTODOS	15
1) Valor Eficaz Verdadeiro: <i>True RMS</i>	15
2) Distorção Harmônica Individual: <i>DIT_h%</i>	15
3) Distorção Harmônica Total: <i>DTT%</i>	15
4) A Transformada Discreta de Fourier.....	15
5) Divisor de tensão para atenuação do sinal	16
6) Condicionamento de tensão para 0V –3,3V.....	16
7) Simulação de ondas com presença de harmônicos.....	16
8) Conversor digital-analógico (DAC)	16
9) Simulações computacionais e cálculo de harmônicos.....	17
III. SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO.....	18
A. Hardware	18
1) Sensor	18
2) Circuito de Condicionamento do Sinal (CCS)	18
3) Núcleo computacional.....	19
4) Interface UART.....	19
5) Protótipo do sistema de medição proposto.....	19
B. Software	19
1) Condições para definir o período de amostragem.....	19
2) Fluxograma para aquisição de dados	19
C. Ensaio para calibração do sistema proposto.....	20
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
1) Aquisição e análise de harmônicos de sinais DST.....	21
2) Aquisição de sinais distorcidas geradas por Dimmer.....	21
V. CONCLUSÕES.....	23

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ANALISADOR DE COMPONENTES HARMÔNICOS ON-LINE

Werleson da Silva Nery

Acadêmico do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso:
UFMT, FAET/DENE, Cuiabá – MT, wsnerly@outlook.com

Resumo – A crescente utilização de cargas não lineares com elevada potência nominal e de sistemas eletrônicos de controle de potência, aumenta o nível de contaminação nas formas de onda de tensões e/ou correntes, forçando a procurar mecanismos para analisar e compensar as distorções harmônicas. Assim, o presente artigo visa contribuir com o desenvolvimento de um sistema de medição para estimar, em tempo real, as componentes harmônicas presentes nas instalações elétricas. O sistema proposto embarca o microcontrolador RP2040 incluído na placa de desenvolvimento Raspberry Pi Pico. O software foi desenvolvido usando o ambiente da plataforma Arduino. Testes experimentais foram realizados e os resultados obtidos foram comparados usando, como referência, o analisador comercial ET-5062 da Minipa. Os resultados mostram que o sistema proposto é promissor, portátil e de baixo custo.

Palavras-Chave – Qualidade de Energia Elétrica, Harmônicos, Distorção, Transformada de Fourier, Raspberry Pi Pico.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN ONLINE HARMONIC COMPONENT ANALYZER

Abstract - The growing use of non-linear loads with high rated power and electronic power control systems increases the level of contamination in voltage and/or current waveforms, forcing the search for mechanisms to analyze and compensate for harmonic distortions. Thus, this article aims to contribute to the development of a measurement system to estimate, in real time, the harmonic components present in the electrical installations. The proposed system incorporates the RP2040 microcontroller included in the Raspberry Pi Pico development board. The software was developed using the environment of the Arduino platform. Experimental tests were carried out and the results obtained were compared using, as reference, the ET-5062 analyzer from Minipa. The results show that the proposed system is promising, portable and low cost.

Keywords - Electric power quality, Harmonics, Distortion, Fourier Transform, Raspberry Pi Pico.

NOMENCLATURA

ω_0 Velocidade Angular dada por $2\pi f$ (rad/s).
ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica.

ARM	Família de processador com arquitetura de baixo consumo e poucas instruções.
CAD	Conversor Analógico Digital.
DAC	Digital Analog Converter (Conversor digital-analógico)
DITH%	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
DST	Discrete Sine Transform (Transformada discreta de seno).
DTT%	Distorção harmônica total de tensão
ESP32	Placa de desenvolvimento com Wi-Fi e Bluetooth embarcados.
f	Frequência (Hz).
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
HFS	Harmonic Frequency Scan (Varredura de Frequências Harmônicas).
L	Indutância (H).
QEE	Qualidade de energia elétrica.
R	Resistência (Ω).
rms	Root Mean Square (Valor quadrático médio ou valor eficaz).
RP2040	Microcontrolador desenvolvido pela Fundação Raspberry.
T	Período (s).
true rms	Valor rms de qualquer formato de onda.
V	Tensão (V).

I. INTRODUÇÃO

A proliferação de microcontroladores e dispositivos de controle eletrônico em uma ampla gama de equipamentos, inclusive os domésticos, os utilizados nas linhas de montagem industriais automatizadas e sistemas de diagnóstico hospitalar, aumentou a vulnerabilidade de equipamentos elétricos a problemas de qualidade de energia. Esses problemas incluem uma variedade de distúrbios elétricos, que podem se originar de várias maneiras e ter efeitos diferentes em vários tipos de cargas sensíveis. Além disso, a crescente utilização de cargas não lineares com grande potência nominal aumenta o nível de contaminação nas formas de onda de tensões e/ou correntes, forçando a procurar mecanismos para analisar e compensar as distorções harmônicas [1].

Sendo assim, torna-se necessário contar com sistemas para medição do conteúdo harmônico de um sistema elétrico, em tempo real, a fim de implementar mecanismos para mitigar os problemas de distorção harmônica.

Em [2] foi desenvolvido um sistema para detecção de harmônicas e otimização de instalações elétricas. O sistema foi implementado utilizando a placa de desenvolvimento Arduino Due, que embarca o microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM. O software desenvolvido implementa a transformada rápida de Fourier (FFT) e calcula apenas até a

13ª harmônica utilizando 1024 amostras de 12 bits. No entanto, no mercado o Arduino utilizado é consideravelmente mais caro que o Raspberry Pi Pico.

Foi desenvolvido em [3] um sistema para medição de distorção harmônica e fator de potência da rede. O sistema fez uso de uma placa de desenvolvimento ESP32 e implementou a FFT para os cálculos da taxa de distorção harmônica e utilizou a conexão Wi-Fi para envio dos dados calculados. No entanto, os sinais analisados foram teóricos ou gerados diretamente na porta por instrumentos sem a necessidade de condicionamento.

Já o trabalho realizado em [4] traz uma tomada inteligente de baixo custo para análise de potência e qualidade de energia para o usuário final. Utiliza um microcontrolador da MSP430 com resolução de 24 bits para a leitura e cálculo dos parâmetros elétricos comunicando com o ESP32 para conexão Wi-Fi.

A seguir é realizada uma breve introdução aos conceitos básicos sobre as harmônicas presentes em uma rede elétrica.

1) Distorções harmônicas

Conceitualmente, harmônicas são tensões ou correntes senoidais, cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental. As harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas na rede de distribuição de energia elétrica.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) “As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”. Portanto, as distorções são um dos problemas inerentes à qualidade da energia elétrica distribuída [5].

2) Efeitos adversos das Distorções Harmônicas

Problemas de qualidade de energia (QEE) são comuns na maioria das redes comerciais, industriais e de prestação de serviços. Fenômenos de comutação que resultam em transientes oscilatórios na alimentação elétrica, por exemplo, contribuem substancialmente para gerar distúrbios na qualidade da energia. Além disso, a conexão de cargas não lineares contribui para a geração de componentes harmônicos de tensão e corrente. Sendo um fator preponderante às profundas mudanças nas cargas consumidoras e os hábitos de consumo dos usuários.

Entre os diferentes efeitos adversos produzidos na QEE têm-se: os afundamentos de tensão; as variações de tensão que podem desarmar acionamentos elétricos ou equipamentos mais sensíveis; sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; danificação de capacitores, etc. levando a dispendiosas interrupções de produção [1].

Para manter os indicadores da QEE dentro dos limites operacionais aceitáveis, pelos órgãos reguladores, tornam-se necessários sistemas que permitam a determinação do conteúdo harmônico e a sua eliminação, ou pelo menos sua mitigação. O primeiro serve para avaliar e o segundo diminui a degradação da QEE. Portanto, sistemas que permitam analisar e avaliar os componentes harmônicos presentes em uma rede elétrica, e em tempo real, são desejáveis.

Assim, este trabalho contribui com um sistema microcontrolado, de baixo custo, para medição de

tensões/correntes *true rms* e para estimar as componentes harmônicas presentes em uma rede elétrica.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os fundamentos, as técnicas e as ferramentas utilizadas no desenvolvimento do sistema proposto, que consiste em um sistema de aquisição de tensões *true rms* e estimativa das componentes harmônicas presentes no suprimento distorcido de uma rede elétrica.

A seguir, são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo de indicadores de distorção harmônica. Nota-se que os equacionamentos correspondem a processamento de dados em tempo discreto com os dados obtidos por meio de amostragem [5] [6].

1) Valor Eficaz Verdadeiro: True RMS

$$True\ RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (1)$$

sendo: N = número de amostras de tensão coletadas em um período da fundamental e V_n = tensão instantânea da n ésima amostra coletada.

2) Distorção Harmônica Individual de Tensão ordem h : $DIT_h\%$

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

sendo: V_h = tensão harmônica de ordem h ; h = ordem harmônica individual e V_1 = tensão fundamental medida.

3) Distorção Harmônica Total de Tensão: $DTT\%$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3)$$

sendo: h = todas as ordens harmônicas de 2 até $h_{m\acute{a}x}$; $h_{m\acute{a}x}$ = ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (classe A ou S); V_h = tensão harmônica de ordem h e V_1 = tensão fundamental medida.

4) A Transformada Discreta de Fourier

O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta de uma expressão senoidal em frequência fundamental, de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas) e de uma eventual componente contínua.

Portanto, um sinal de tensão periódico não senoidal pode ser expresso por:

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{N-1} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (4)$$

sendo: a_0 = componente contínua; a_n e b_n são os coeficientes da série de Fourier e ω_0 é a frequência angular da fundamental.

Para achar os componentes harmônicos, devem-se achar primeiro os coeficientes da série de Fourier.

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] \quad (5)$$

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] \cos(n\omega_0 t) \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] \sin(n\omega_0 t) \quad (7)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (8)$$

sendo: $v[n]$ a n -ésima amostra coletada de $v(t)$ em um período $T = 2\pi/\omega_0$. c_n = amplitude da n -ésima componente harmônica.

5) Divisor de tensão para atenuação do sinal

Um circuito divisor de tensão é necessário para adequar os valores de tensão, de 127 Vrms ou de 220 Vrms, presentes na baixa tensão da rede de distribuição, para um nível de tensão que não exceda 3,3V que é o limite de suportado pela porta analógica do conversor analógico-digital (CAD) do microcontrolador RP2040 da Raspberry. Assim, considerando que o sistema de medição poderá operar em rede monofásica (127 Vrms) e bifásica (220 Vrms), e usando uma resistência de valor fixo ($R_1 = 200k\Omega$), portanto, apenas um valor de resistência diferente (para R_2) será escolhido para cada caso, de forma que,

$$V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{pico-pico} \leq 3,3V \quad (9)$$

Sendo V_x a tensão fornecida na porta analógica do conversor analógico-digital [7].

Resistência para uma tensão de 127 Vrms

A tensão pico a pico, da rede elétrica, deve ser adequada para um nível de tensão menor a 3,3V.

$$V_{pico-pico} = (127 \times \sqrt{2}) \times 2 = 359,21 V$$

O valor da resistência escolhida é $R_2 = 1,6k\Omega$. Verificando a tensão resultante.

$$V_x = \frac{1,6k\Omega}{200k\Omega + 1,6k\Omega} 359,21V = 2,85V$$

Resistência para uma tensão de 220 Vrms

$$V_{pico-pico} = (220 \times \sqrt{2}) \times 2 = 622,25 V$$

O valor da resistência escolhida é $R_2 = 1,0k\Omega$. Verificando a tensão resultante.

$$V_x = \frac{1k\Omega}{200k\Omega + 1k\Omega} 622,25 V = 3,09V$$

6) Condicionamento de tensão para 0 – 3,3 V

A tensão entregue pelo divisor de tensão, determinada na seção anterior, será tipo senoidal com amplitude $\pm \frac{V_x}{2}$. No entanto, na entrada do CAD deverá ser fornecido apenas tensão entre 0 e 3,3V, portanto, usando amp-op, foi implementado um seguidor unitário, para evitar o efeito de carregamento e um circuito para condicionar o nível de tensão

aos limites de 0 a 3,3V, adicionando um offset de 1,65V para deslocar a onda. A topologia escolhida foi um circuito somador por meio da entrada não-inversora, com ganho 1 e offset 1,65V. Para se obter a tensão offset, foi utilizado, como referência, a mesma tensão de alimentação do próprio Raspberry Pi Pico, que é 3,3V. Detalhes do circuito são apresentados na Fig. 12.

7) Simulação de ondas com presença de harmônicos

Inicialmente, foi pensado que os testes experimentais, usando o sistema de medição proposto, sejam realizados com um gerador de função do tipo Fonte CA Programável, modelo 61605, da Chroma COMERAM Inc., pertencente ao laboratório de QEE, porém por razões de portabilidade e necessidade de uso contínuo, as tensões de suprimento distorcido foram sintetizadas e geradas usando o módulo RZ Easy FPGA e um conversor digital-analógico de 8 bits. O módulo RZ Easy FPGA está baseado no FPGA Cyclone IV – EP4CE6E22C8N da Altera®. Na Fig. 1 é mostrada uma foto do módulo.

Utilizando o software Quartus Prime Lite Edition v.18.1 foi implementado o código na linguagem VHDL para armazenar em ROM os valores correspondentes a 360 amostras de 8-bits para cada uma das ondas DST01, DST11, DST14, DST16, DST19 e senoidal puro, todos com frequência fundamental de 60Hz. As características dos sinais DST são detalhadas em [8].

Para gerar cada uma das ondas, o FPGA entrega, por meio de 8 portas digitais, por vez um valor digital de uma forma de onda durante um intervalo de tempo de 46,3 μ s. A onda se repete ciclicamente a cada 360 amostras.

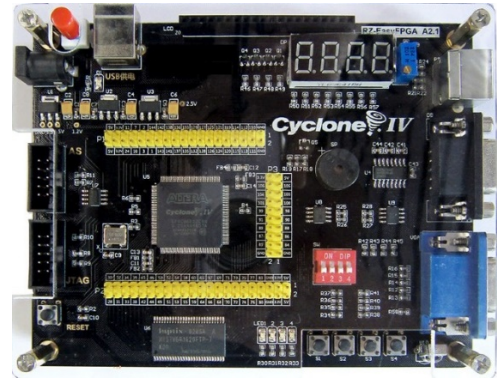


Fig. 1. Módulo RZ Easy FPGA A2.1.

8) Conversor digital-analógico (DAC)

O DAC de 8-bits foi implementado utilizando a topologia R-2R, como mostrado na Fig. 2. O DAC é utilizado para converter os valores digitais de 8-bits, entregues pelo FPGA, para valores analógicos equivalentes, na faixa de 0 a 5V. A tensão de saída do DAC foi condicionada também para que não exceda a tensão de operação na porta analógica de entrada do módulo CAD do microcontrolador RP2040.

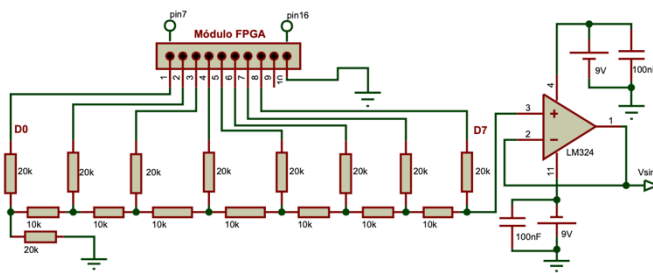


Fig. 2. DAC - topologia R-2R.

Considerando a forma de onda na saída do DAC, com níveis discretos por cada intervalo de 46,3 μ s, é claro que a onda resultante irá incluir outras perturbações ou componentes harmônicos, que são produto dos valores discretos, portanto, seria necessário implementar um filtro passa-baixas para eliminar as componentes de mais alta frequência. No entanto, neste trabalho não foi implementado o filtro, fato que será um motivo para justificar algumas discrepâncias nos resultados obtidos e apresentados nos resultados.

9) Simulações computacionais e cálculo de harmônicos

Com o objetivo de aprofundar o aprendizado sobre a transformada de Fourier aplicado ao cálculo de índices de distorção harmônica, o software ATPDraw v.7.2 foi utilizado como ferramenta para programação e simulação de sistemas elétricos. Assim, foi desenvolvido um medidor virtual que executa um script para medir/calcular grandezas elétricas durante a simulação de sistemas com fonte distorcida e com carga linear/não-linear. O medidor virtual realiza as medições de tensão e corrente *true rms*, potência, energia, fator de potência e implementa a função de um analisador de componentes harmônicos baseado na técnica da transformada rápida de Fourier. A função mais utilizada do script é para calcular os índices de distorção harmônica e os componentes harmônicos de respostas com suprimento senoidal puro, suprimento distorcido e com carga linear/não-linear. O script foi elaborado, tendo como base o medidor monofásico do Eng. Ivandro Antônio Bacca [9].

Nas Fig. 3 a Fig. 10 são apresentados os resultados das simulações computacionais com cargas lineares e suprimento distorcido, para quatro situações diferentes.

Setup da simulação 1:

- Carga linear R-L série ($R=5\Omega$, $L=15\text{mH}$)
- Fonte de Tensão HFS (Harmonic Frequency Scan): $V_{1m} = 20\text{V}$ (-25°), 60Hz; $V_{2m} = 1\text{V}$ (20°), 120Hz, $V_{3m} = 5\text{V}$ (15°), 180Hz.

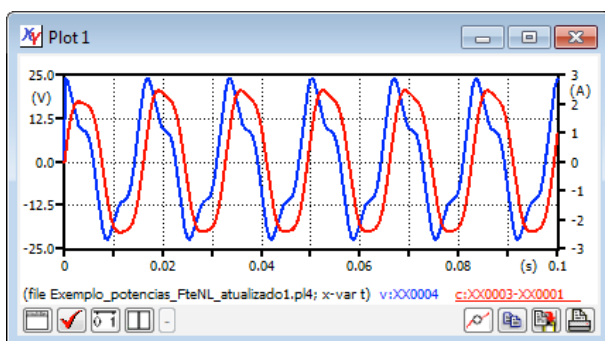


Fig. 3. Tensão (azul) e corrente (vermelho) – setup 1.

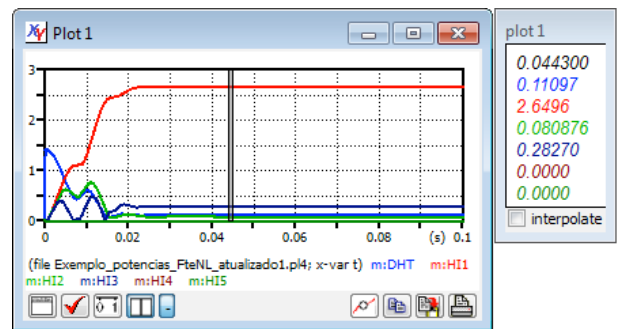


Fig. 4. Índice de distorção harmônica total (Azul claro) e índices individuais da fundamental, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª harmônicas (respectivamente indicadas em vermelho, verde claro, azul escuro, marrom e verde escuro) – setup 1.

Setup da simulação 2:

- Carga linear R-L série ($R=5\Omega$, $L=15\text{mH}$)
- Fonte de Tensão HFS: $V_{1m} = 20\text{V}$ (-25°), 60Hz; $V_{2m} = 25\text{V}$ (20°), 120Hz, $V_{3m} = 30\text{V}$ (15°), 180Hz.

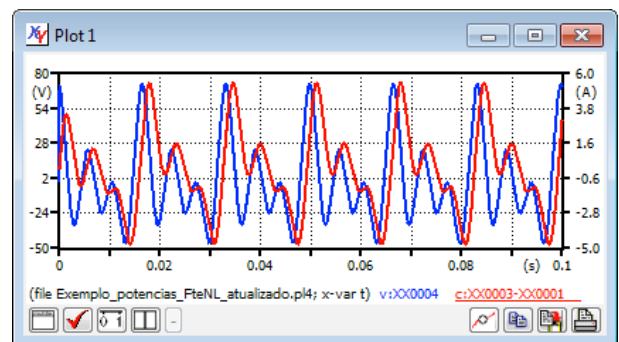


Fig. 5. Tensão (azul) e corrente (vermelho) – setup 2.

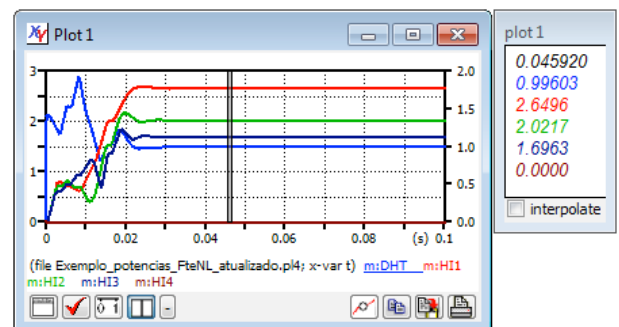


Fig. 6. Índice de distorção harmônica total (Azul claro) Índices de distorção individual da fundamental, 2ª, 3ª e 4ª harmônicas (respectivamente indicadas em vermelho, verde claro, azul escuro e marrom) – setup 2.

Setup da simulação 3:

- Carga resistiva: $R=1\Omega$
- Fonte de Tensão HFS: $V_{1m} = 2\text{V}$, 60Hz; $V_{3m} = 0,75\text{V}$, 180Hz, $V_{5m} = 0,2\text{V}$, 300Hz.

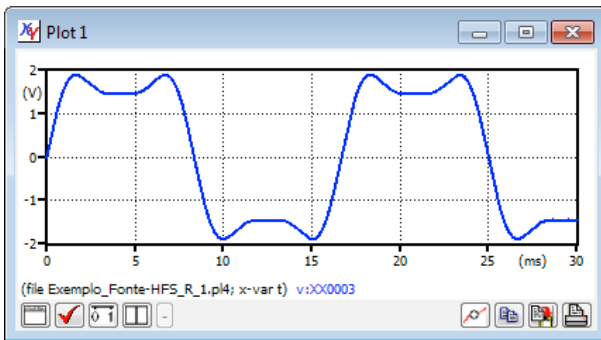


Fig. 7. Tensão de suprimento – setup 3.

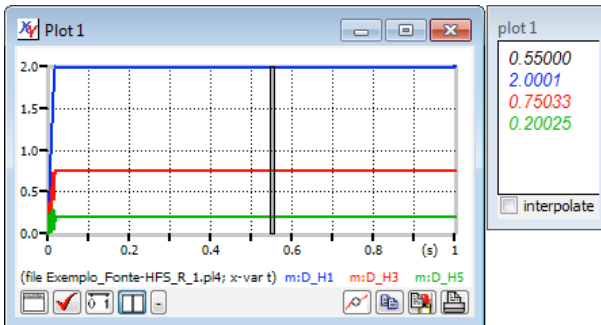


Fig. 8. Amplitude da fundamental, 3ª e 5ª harmônicas (respectivamente indicadas em azul, vermelho e verde) – setup 3.

Setup da simulação 4:

- Carga resistiva: $R=1\Omega$
- Fonte de Tensão HFS: $V_{1m} = 2V$, 60Hz; $V_{3m} = 2/3V$, 180Hz, $V_{5m} = 0,4V$, 300Hz, $V_{5m} = 1/35V$, 420Hz.

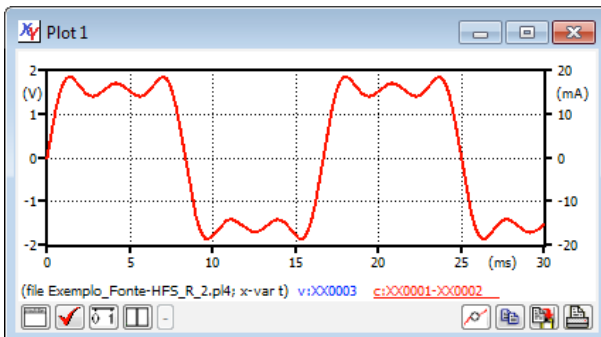


Fig. 9. Tensão e corrente – setup 4.

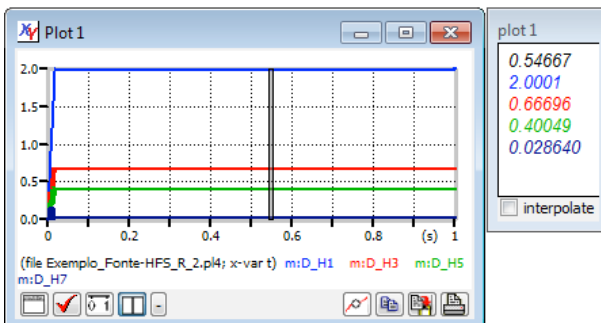


Fig. 10. Amplitude da fundamental, 3ª e 5ª harmônicas (respectivamente indicadas em azul, vermelho e verde) – setup 4.

Todos os resultados foram conferidos analiticamente, validando assim, os métodos e técnicas aplicadas, portanto, foi adquirido o embasamento necessário para desenvolver e

propor um novo sistema para medição de tensões/correntes *true rms* e cálculo de componentes harmônicas e índices de distorção harmônica.

III. SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO

O sistema proposto visa realizar as medições de tensão e corrente *true rms* e calcular os valores dos primeiros 27 componentes harmônicos em tempo real. O sistema visa ser portátil e de baixo custo. A seguir, são apresentados e descritos de maneira sucinta os componentes Hardware e o Software do sistema.

A. Hardware

O hardware do sistema de medição proposto será descrito por partes, portanto, na Fig. 13 é apresentado o sistema por meio de quatro blocos funcionais.

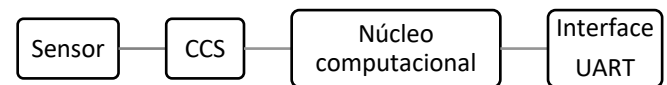


Fig. 11. Diagrama de blocos funcionais do sistema proposto.

1) Sensor

O sensor é componente que realiza a conversão da grandeza física a ser medida para tensão elétrica [10]. Para este trabalho, o sensor de tensão é composto por dos resistores em série configurando um divisor de tensão, como mostrado na Seção II.5, e um seguidor de tensão unitário. Na Fig. 12, os resistores R7, R8 e R3 e o amp-op TL084 – U1:A representam os componentes do sensor. O seguidor unitário funciona como um buffer, isolando o divisor de tensão do restante do circuito.

Para uma tensão de linha de 127Vrms, os resistores R7 e R8 deverão ser conectados, porém se a tensão for de 220Vrms, os resistores R7 e R3 deverão ser conectados. A escolha apropriada deverá ser realizada por meio do jumper JP1.

2) Circuito de Condicionamento do Sinal (CCS)

O sinal entregue pelo seguidor unitário será de natureza senoidal como valor médio igual a zero, ou seja, estará formado por tensões positivas e negativas. No entanto, na entrada do CAD do microcontrolador RP2040, somente será possível aplicar tensões positivas entre 0V e 3,3V. Portanto, o CCS foi projetado para condicionar o sinal aos limites entre 0V e 3,3V, para isso foi necessário adicionar um nível DC de 1,65V para deslocar a onda e obter uma máxima excursão simétrica.

Na Fig. 12 é apresentada também o CCS por meio dos resistores R1, R4, R5, R6, R34 e R35 e o amp-op TL084 – U1:D. A topologia corresponde a um somador não-inversor de ganho 1 e offset 1,65V. Além disso, na saída no amplificador foi adicionado um diodo zener 1N4728, como dispositivo de proteção contra sobretensão, de modo a evitar que os níveis de tensão não excedam os limites na entrada do CAD do microcontrolador RP2040.

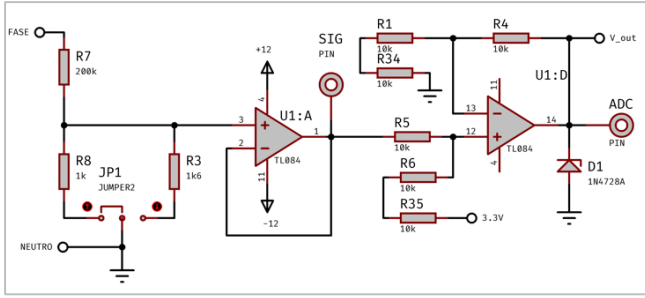


Fig. 12. Divisor de tensão e CCS.

3) Núcleo computacional

O microcontrolador RP2040 utilizado como núcleo computacional neste trabalho se encontra incluído em uma mini placa de desenvolvimento chamada “Raspberry Pi Pico”, projetada e produzida pela Fundação Raspberry Pi.

Na Fig. 13 é mostrada uma foto dessa placa, que embarca um chip RP2040, construído pela própria Raspberry, que é um microcontrolador Dual-Core com arquitetura Arm Cortex-M0+ de 133MHz, com 264KB de memória RAM e 2MB de memória Flash. A placa também possui disponíveis 26 pinos multipropósito de GPIO, incluindo 3 terminais que podem ser utilizados como pinos de entrada analógica CAD de 12-bits que podem coletar até 500 mil amostras por segundo [11].



Fig. 13. Raspberry Pi Pico.

Neste trabalho, o microcontrolador é utilizado para realizar aquisição de tensão elétrica e, então, calcular a tensão *true rms* e os valores das componentes harmônicas até a 27ª.

4) Interface UART

Após uma aquisição completa, os dados e os resultados são transferidos, via porta serial UART, para um terminal de computador para visualização e armazenamento. Para exibição dos resultados, nos testes experimentais, foi utilizado o terminal monitor da IDE do Arduino.

5) Protótipo do sistema de medição proposto

Na Fig. 14 é apresentada uma foto do protótipo do sistema de medição proposto. Da esquerda para direita tem-se a placa de desenvolvimento Raspberry Pi Pico, o Circuito de Condicionamento de Sinais (CSS) e o Dimmer utilizado para geração de sinais distorcidos.

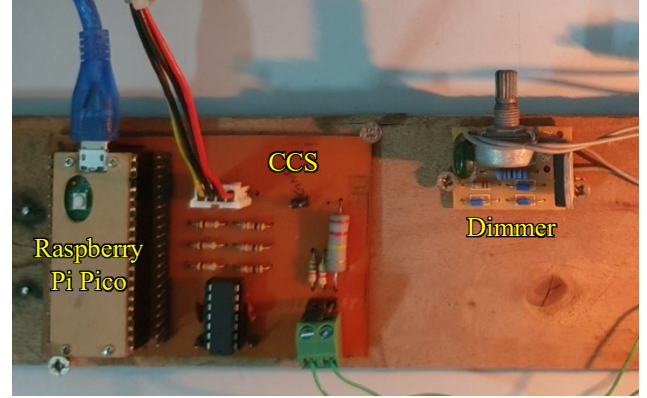


Fig. 14. Foto do protótipo do sistema de medição proposto e dimmer.

B. Software

O programa para aquisição de dados e cálculos necessários que realiza o sistema proposto, foi desenvolvido utilizando o IDE da plataforma Arduino. A linguagem de programação utilizada é C++ (com pequenas modificações). Para isso foi necessário instalar uma biblioteca para gerenciar a placa Raspberry Pi Pico e outra para utilizar algumas funções de interrupção executadas por meio de timers. Após compilar o programa, o firmware é gravado na memória flash do microcontrolador.

Considerando que a aquisição de dados deve ser realizada de forma periódica, o período de amostragem foi definido buscando atender as duas condições indicadas a seguir.

1) Condições para definir o período de amostragem

- A frequência de amostragem ($f_{Nyquist}$) ou taxa de aquisição deve maior que o dobro da frequência do componente de maior frequência do sinal que se deseja analisar, para cumprir com o teorema de Nyquist, ou seja, para analisar uma onda com frequência fundamental de 60Hz e que inclui componentes harmônicas até a harmônica de ordem 50.

$$f_{Nyquist} > 2 \times (60Hz \times 50) = 6000Hz \quad (10)$$

$$T_{aquisição} < \frac{1}{6000Hz} = 166,67\mu s \quad (11)$$

- O período de amostragem ($T_{aquisição}$) deve ser o mais próximo possível de um submúltiplo inteiro do período da onda fundamental. Para atender a este quesito, foi utilizada o mecanismo de interrupções periódicas, com períodos definidos por temporizadores do próprio microcontrolador.

Assim, considerando que as funções de interrupção, disponíveis nas bibliotecas do Arduino, permitem definir períodos de interrupção com apenas valores inteiros para a ordem de magnitude dada em microssegundos (μs). Para este trabalho, foi definido o período de amostragem de 13us, de modo que em um período da fundamental serão obtidas 1282 amostras do sinal.

2) Fluxograma para aquisição de dados

O fluxograma do programa é apresentado na Fig. 15. A seguir, um resumo da sequência de operações implementadas no programa:

- Três aquisições são realizadas. Em cada aquisição são coletadas 1282 amostras. O período de amostragem é 13 μ s, totalizando por cada aquisição 16,666ms que corresponde ao período da componente fundamental de uma onda de 60Hz;
- Usando os dados das três aquisições, implementa-se um mecanismo de filtragem que dá como resultado o equivalente a uma aquisição que será utilizada para os processamentos das etapas seguintes;
- Se calcula o valor médio, ainda como os valores dados pelo CAD do microcontrolador;
- Se realiza a conversão para a grandeza física (tensão ou corrente). Inclui ajustes de calibração;
- Utiliza-se a transformada de Fourier para os calcular as amplitudes das componentes harmônicas;
- Calculam-se os índices de distorção harmônicas DTT e DTI;
- Os dados e resultados são enviados para um terminal via porta serial UART;
- Todo o processo se repete cada 10s.

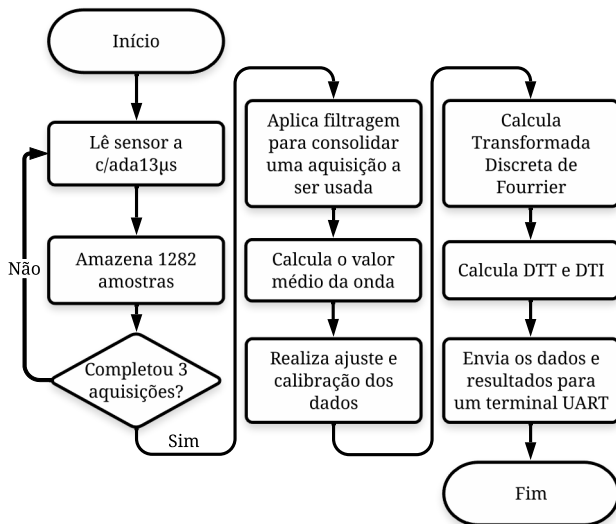


Fig. 15. Fluxograma da aquisição de dados.

C. Ensaios para calibração do sistema proposto

Para validar o sistema de medição proposto, um passo necessário é realizar os procedimentos para calibração. Como instrumento de medição de referência foi utilizado um analisador de energia da marca Minipa, modelo ET-5062. Esse instrumento permite visualizar os parâmetros em tempo real e transferindo para o computador. Os recursos disponíveis que foram utilizados são: visualização do sinal de entrada, forma de onda, gráfico das componentes harmônicas, valor de tensão *true rms* e valores instantâneos das amostras dos parâmetros escolhidos [12].

Na Fig. 16, lado esquerdo, é mostrado o setup montado para realizar as medições simultâneas a fim de comparar os resultados que foram utilizados para a calibração. No lado direito uma foto de um teste experimental.

Na Fig. 17 se apresenta um gráfico elaborado com os dados coletados por ambos os instrumentos: Raspberry Pi Pico e medidor de referência. A calibração foi feita comparando os dados de um ciclo de um ciclo do sinal.

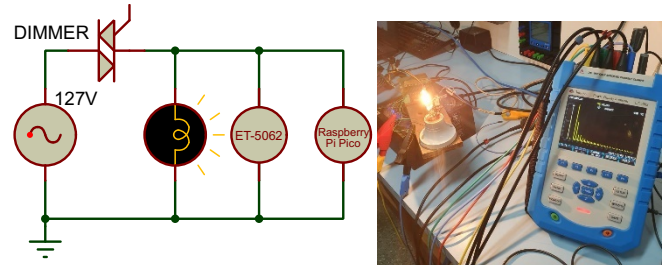


Fig. 16. Setup para comparação e calibração.

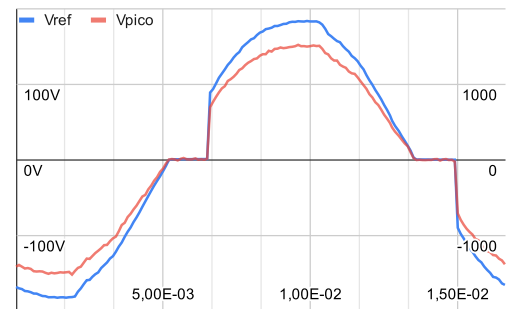


Fig. 17. Dados coletados para calibração do sistema proposto.

Na Fig. 17, os valores adquiridos pelo Raspberry Pi Pico foram apresentados usando o valor digital de 12-bits entregue pelo CAD do microcontrolador, podendo ir de 0 a 4.095 (resolução de 12 *bits*) menos o nível médio. Depois de sincronizar as ondas, foi gerado um segundo gráfico, mostrado na Fig. 18, com os valores obtidos pelo medidor de referência em função dos valores adquiridos pelo Raspberry Pi Pico.

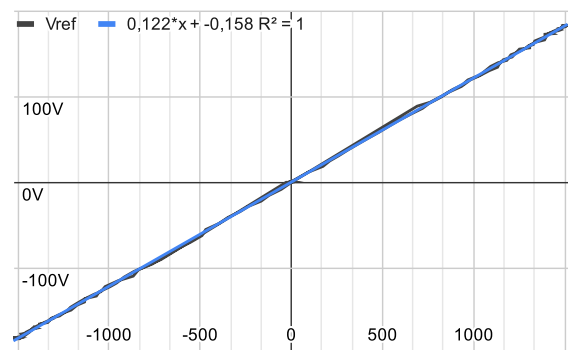


Fig. 18. Relação entre os valores lidos pelo Raspberry Pi Pico e o pelo medidor de referência.

Se pode perceber que existe uma forte relação linear entre as duas leituras através do coeficiente de determinação (R^2). Assim, é o valor do coeficiente angular (0,122) que é utilizado como fator multiplicativo para uma conversão correta.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes realizados sobre a aquisição de tensão e cálculo dos componentes harmônicos por meio do sistema de medição proposto.

1) Aquisição e análise de harmônicos de sinais DST

Primeiro, os sinais DST foram gerados utilizando o módulo FPGA e um DAC, conforme indicado na Seção II.7. Cada um desses sinais DST se caracteriza por incluir alguns componentes harmônicos em percentuais determinados [8].

Segundo, utilizando o sistema de medição proposto, foi realizado uma aquisição dos sinais DST gerados a fim de estimar as componentes harmônicas e conferir com os valores definidos usados para gerá-los, conforme indicado na TABELA I.

Nas Fig. 19, Fig. 20 e Fig. 21 são ilustradas as ondas resultantes após as aquisições. As ondas se encontram padronizadas, para isso a amplitude da fundamental foi considerada como valor unitário.

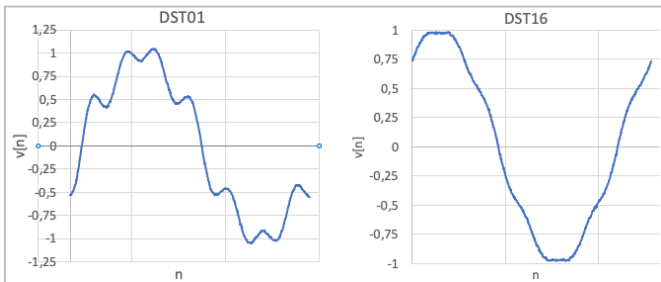


Fig. 19. Ondas DST01 e DST16 normalizadas.

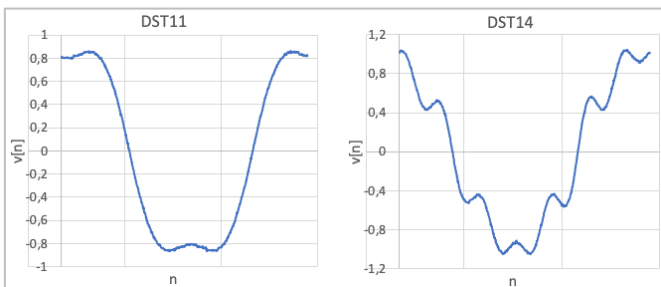


Fig. 20. Ondas DST11 e DST14 normalizadas.

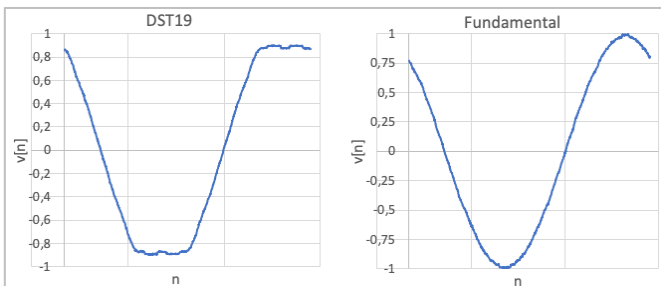


Fig. 21. Ondas DST19 e Fundamental normalizadas.

Na Tabela I são apresentados os valores dos percentuais usados para gerar os sinais DST e os valores dos percentuais estimados por meio do sistema de medição proposto. A coluna H° indica a ordem da componente harmônica. A coluna FPGA indica o percentual de cada componente harmônica usada para gerar cada sinal DST por meio do módulo FPGA. A coluna Pico indica os percentuais estimados por meio do sistema de medição proposto.

Analisando as informações apresentadas na Tabela I, pode-se afirmar que o sistema proposto apresenta resultados satisfatórios. Embora existam divergências nos resultados,

quando comparados, essas divergências podem ser explicadas: 1) pela precisão na geração dos sinais DST e 2) pelo fato do sistema ainda não ter implementado um filtro passa-baixas que elimine os componentes espúrios que são produto da sintetização dos sinais DST a partir de valores discretos.

TABELA I

Valores das componentes harmônicas geradas e estimadas.

	DST01 %		DST11 %		DST14 %		DST16 %		DST19 %	
H° FPGA	Pico	FPGA	Pico	FPGA	Pico	FPGA	Pico	FPGA	Pico	FPGA
2°	0,09		0,03	2,19	2,16		0,02		0,04	
3°	0,42	17,72	17,82		0,37		0,17	8,07	8,18	
5°	9,8	9,84	0,13	9,83	9,97	2,42	2,80	3,55	3,27	
7°	15,8	15,68	0,34	15,76	15,76	3,91	4,09		0,24	
8°	2,16	2,21	0,06	2,34	2,36		0,04		0,07	
9°	0,06		0,13		0,06		0,02	0,96	0,91	
13°	0,10		0,03		0,10		0,04	0,92	1,04	

2) Aquisição de sinais distorcidas geradas por Dimmer

Foram realizadas mais um conjunto de aquisições por meio do sistema proposto. Desta vez, a aquisição das ondas distorcidas foi realizada na saída de um dimmer (Fig. 16). Uma onda diferente é gerada cada vez que o Triac do dimmer é controlado para acionar a carga (lâmpada) com ângulos de condução diferentes. Assim, os termos “dimmer para X%”, foram usadas para indicar que, antes de uma aquisição, o controle foi colocado para o dimmer entregar à lâmpada uma tensão eficaz aproximada de X% da tensão de fase (127Vrms).

Nas Fig. 22 a Fig. 25 são ilustradas as ondas resultantes, que foram registradas utilizando o medidor de referência e o sistema proposto. Para entender as legendas, o sistema de medição proposto será identificado como “RPi” e o medidor de referência como “ref” ou “ET-5062”.

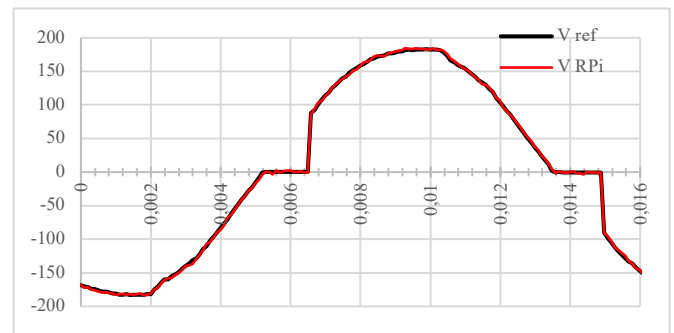


Fig. 22. RPi vs ET-5062, com dimmer para 100%.

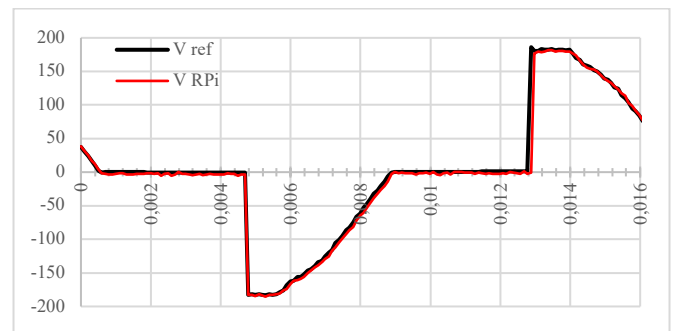


Fig. 23. RPi vs ET-5062, com dimmer para 75%.

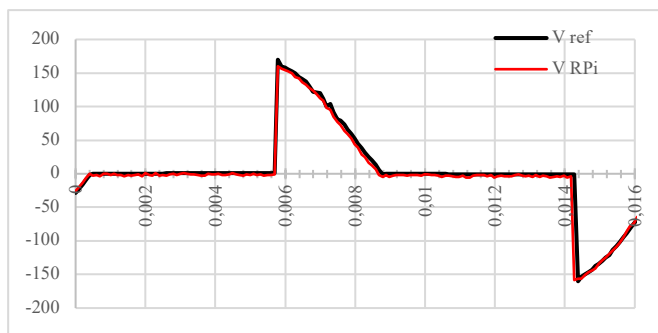


Fig. 24. RPi vs ET-5062, com dimmer para 50%.

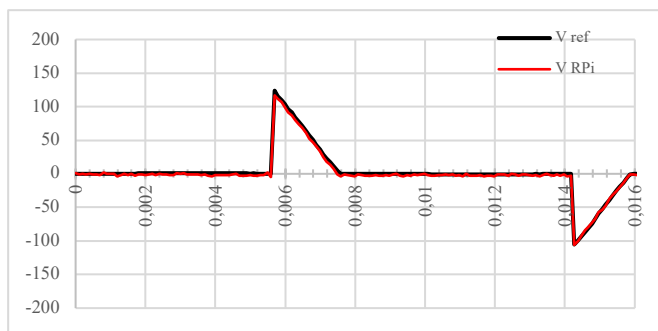


Fig. 25. RPi vs ET-5062, com dimmer para 25%.

Mais uma vez, uma avaliação qualitativa feita analisando as ilustrações permite conferir os resultados promissores do sistema proposto.

Análise de tensões pico

Para uma avaliação quantitativa, foi elaborada a Tabela II onde são indicados os erros relativos calculados comparando as tensões pico obtidos pelo RPi e pelo ET-5062.

TABELA II
Comparativa de valores do DTT

Dimmer	100%	75%	50%	25%
V RPi	129,36	94,83	60,72	30,50
Vref	128,80	95,74	61,28	31,65
Erro relativo	0,44%	-0,95%	-0,92%	-3,64%

Pode-se conferir que os erros achados são aceitáveis.

Análise do índice de distorção harmônica total de tensão (DTT)

Foram calculados também, por ambos os sistemas de medição, o índice de distorção harmônica total. Na Tabela III são apresentados os valores estimados incluindo o erro percentual. Considerando que os erros obtidos são muito baixos, conclui-se que o sistema proposto é um bom instrumento que pode ser utilizado para estimar a de distorção harmônica total.

TABELA III
Comparativa de valores do índice de DTT

Dimmer	100%	75%	50%	25%
DTT RPi	13,39%	60,76%	95,36%	145,37%
DTT ref	13,61%	61,46%	97,04%	144,65%
Erro relativo	-1,64%	-1,14%	-1,73%	0,50%

Análise de componentes harmônicas de ordem H°

Para os sinais apresentados nas Fig. 22 a Fig. 25, foram calculadas um conjunto de componentes harmônicas, no caso até a componente de ordem 26°. Essas componentes são apresentadas na TABELA IV.

Nota-se que para os valores das componentes harmônicas presentes com maior impacto, com valor eficaz acima de 2%, ou seja, as harmônicas de ordem 3°, 5°, 7°, 9°, 11° e 13°, o erro relativo estimado é menor do que 3,4%, atingindo o máximo (3,38%) para a 3° harmônica na coluna dimmer para 100%.

Nota-se também que existe uma pequena energia espectral nos harmônicos pares. Portanto, por fatores de precisão e presença de sinais espúrios presentes nos diferentes instantes de medição, por ambos os sistemas, existe uma alta probabilidade de se obter erros relativos elevados nas componentes harmônicas com menor impacto. Assim, dos valores tabelados, verifica-se que os maiores erros relativos se encontram nas harmônicas pares com menor impacto, ou seja, as harmônicas presentes com valor eficaz abaixo de 0,16%.

TABELA IV
Componentes harmônicas individuais de ordem H°

H°	100%		75%		50%		25%	
	RPi	Ref.	RPi	Ref.	RPi	Ref.	RPi	Ref.
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	0,18	0,12	3,74	3,79	7,32	7,72	13,63	13,42
3	6,72	6,50	51,74	51,72	74,58	74,96	91,63	89,01
4	0,13	0,07	3,74	3,78	7,22	7,72	13,46	13,27
5	7,35	7,32	16,48	16,32	41,41	41,30	73,83	71,61
6	0,11	0,08	3,60	3,74	7,30	7,72	13,36	13,17
7	5,88	6,00	16,62	16,50	19,82	19,86	51,42	51,00
8	0,13	0,13	3,57	3,75	7,44	7,68	12,54	13,03
9	3,84	3,78	9,84	9,88	18,07	17,78	33,14	32,49
10	0,14	0,11	3,67	3,68	7,33	7,58	12,21	13,02
11	3,46	3,48	8,87	8,75	13,64	13,80	21,54	21,17
12	0,13	0,09	3,49	3,64	7,16	7,44	12,58	12,81
13	2,07	2,02	5,85	5,74	9,57	9,46	18,64	18,07
14	0,10	0,07	3,57	3,61	7,02	7,40	12,73	12,53
15	1,90	1,98	5,80	5,67	9,12	8,92	17,08	16,80
16	0,10	0,10	3,42	3,57	6,93	7,16	12,10	12,31
17	1,44	1,48	4,55	4,58	7,39	7,09	13,98	13,76
18	0,16	0,14	3,42	3,53	6,66	6,88	12,17	11,95
19	1,78	1,74	4,35	4,28	5,40	5,23	10,47	9,86
20	0,16	0,06	3,34	3,43	6,29	6,63	12,26	11,68
21	1,50	1,45	3,56	3,45	4,94	4,89	8,10	7,35
22	0,10	0,07	3,30	3,40	6,05	6,36	11,06	11,26
23	1,50	1,54	3,21	3,16	3,49	3,32	7,18	6,67
24	0,11	0,14	3,18	3,33	6,14	6,11	11,02	10,97
25	1,05	1,04	2,17	2,17	2,77	2,24	6,54	5,84
26	0,10	0,08	3,05	3,18	5,80	5,91	10,63	10,48

Pela TABELA V é possível verificar que o maior erro absoluto encontrado (0,710 V), representa apenas 0,56% de erro, evidenciando que os maiores erros relativos acontecem em ordens harmônicas cuja amplitudes são tão pequenas quanto o próprio ruído.

TABELA V
Tensão rms por harmônica de ordem H° para o dimmer em 100% com seus respectivos erros.

H°	RPI	Ref.	Erro %	Erro absoluto (Vrms)
1	128,22	127,51	0,56	0,710
2	0,23	0,15	47,66	0,073
3	8,62	8,28	4,10	0,339
4	0,16	0,10	69,73	0,066
5	9,42	9,33	0,93	0,086
6	0,14	0,10	42,57	0,043
7	7,54	7,65	-1,48	-0,113
8	0,17	0,16	5,15	0,008
9	4,92	4,83	1,91	0,092
10	0,18	0,14	23,45	0,034
11	4,44	4,44	0,11	0,005
12	0,17	0,12	43,51	0,052
13	2,65	2,57	3,02	0,078

V. CONCLUSÕES

Com base no que foi apresentado, um aumento na demanda de carga na rede traz como consequência as dificuldades relacionadas à distribuição e a qualidade de energia elétrica como produto entregue ao consumidor final. Nesse aspecto, a distorção harmônica é uma das principais causas de distúrbios de qualidade.

Neste trabalho foi apresentado um sistema embarcado que realiza a medição de tensões *true rms* e calcula, pelo menos, as primeiras 27 componentes harmônicas presentes em uma rede elétrica. As medições e cálculos são obtidos e exibidos em tempo real (on-line), em um terminal UART. Testes de bancada foram realizadas com diferentes ondas distorcidas e as medições realizadas foram comparadas como um medidor comercial, usado como referência. Os resultados evidenciam que o sistema proposto é promissor com erros relativos consideravelmente baixos para harmônicas com índice de distorção acima de 2%, mesmo sem os filtros necessários que podem ajudar a eliminar alguns ruídos.

Dessa maneira, considera-se que o sistema possui muito potencial para aplicação em laboratórios, residências ou até na indústria. Além disso, considerando o período de amostragem utilizado, que é 13µs, o sistema pode captar componentes de frequência de até 38kHz, ou seja, harmônicas de ordem 600, para uma fundamental de 60Hz.

Para trabalhos futuros recomenda-se implementar filtros e segundo, aprimorar a alimentação do módulo CAD do Raspberry Pi Pico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. A. MORÁN, J. W. DIXON, J. R. ESPINOZA e R. R. WALLACE, "Using Active Power Filters to Improve Power Quality," pp. 501-5011, 1999.
- [2] J. L. d. S. Mello, D. A. Amâncio, M. Chagury, L. A. Rasia, H. Furlan e M. A. Fraga, "Harmonic detection and energy optimization of electrical installations using an Arduino microcontroller system," 02 Dezembro 2020.
- [3] C. H. B. Molinari e D. L. H. A. Lolis, "Sistema embarcado medidor de taxa de Distorção Harmônica e fator de Potência da Rede," *Brazilian Journal of Development*, pp. 10423-10432, 07 Janeiro 2022.
- [4] T. M. Serrano, L. C. P. da Silva, L. Pereira, F. Andreoli, T. Ji and F. Fruett, "A Low-cost Smart Plug with Power Quality and Energy Analyzer Features,," *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-6, 2019.
- [5] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST Módulo 8 - Qualidade de Energia," 01 Janeiro 2022. [Online]. Available: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodist_modulo_8_v13.pdf. [Acesso em 08 Dezembro 2022].
- [6] MathWorks, "Compute discrete-time, cumulative root mean square (DRMS) of signal," MathWorks, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/sldo/ref/drms.html>. [Acesso em 10 dezembro 2022].
- [7] R. L. Boylestad, Introdução à análise de circuitos, 12ª ed., D. Vieira e J. Ritter, Eds., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012, p. 128.
- [8] CHROMA COMERAM INC., "Fonte CA programáveis 61701/61702/61704 - Manual do usuário. Ed. Maio/2014," CHROMA COMERAM INC., Taiwan, 2014.
- [9] B. I. A., "Modelagem para a análise de desempenho de eletrodomésticos à força-motriz diante de distúrbios de qualidade da energia," Uberlândia - MG, Setembro, 2008.
- [10] L. A. Aguirre, Fundamentos de instrumentação, São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- [11] Raspberry Pi Ltd, "Raspberry Pi Pico Datasheet," 30 Jun 2022. [Online]. Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>. [Acesso em 10 Dezembro 2022].
- [12] MINIPA DO BRASIL LTDA., "ET-5062-1103-BR manual.pdf," 25 04 2017. [Online]. Available: http://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-5062-1103-BR_manual.pdf. [Acesso em 09 12 2022].
- [13] A. V. Oppenheim e R. W. Schaffer, Processamento em tempo discreto de sinais, 3ª ed., São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012, p. 1.
- [14] S. Franco, Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos, 3ª ed., Delegación Cuauhtémoc: McGraw-Hill, 2005.
- [15] A. Saxena, A. Saxena, R. Bharti, H. Nayak, A. Kapoor, S. Amayur e R. S. Saxena, "Fourier analysis of periodic signals using an Arduino-based low-cost portable setup," *Physics Education*, 21 November 2022.
- [16] Hyukjin Lim and Seongjoo Lee, "A study on the low-cost digital spectrum analyzer design,," *Proceedings of the 2014 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pp. 31-34, 2014.