

INTERFACE DIDÁTICA DE UM ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA COM COMPENSAÇÃO DE REATIVOS E APLICAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS UTILIZANDO MATLAB

Diego Costa Vinha – diegovinha@hotmail.com*

Erick Araujo Nunes – ericknunes@alunos.utfpr.edu.br*

Vinícius Suterio – suterio@utfpr.edu.br*

Larissa Aparecida Baratieri – lbaratieri@alunos.utfpr.edu.br*

Marcelo Favoretto Castoldi – marcastoldi@utfpr.edu.br*

Alessandro Goedtel – agoedtel@utfpr.edu.br*

Paulo Rogério Scalassara – prscalassara@utfpr.edu.br*

Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Avenida Alberto Carazzai, 1640*

86300-000 – Cornélio Procópio – Paraná*

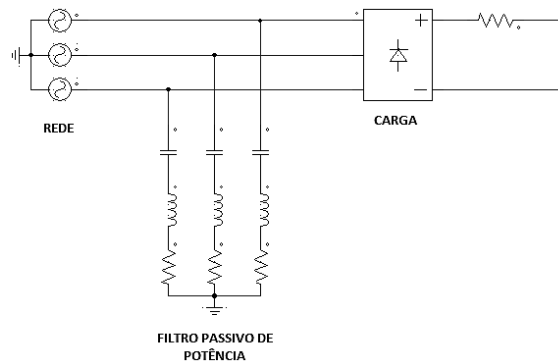
Resumo: Este artigo apresenta a criação de uma interface didática que emula um analisador de qualidade de energia com compensação de reativos e aplicação de filtros passivos. Essa interface foi desenvolvida na plataforma gráfica do software Matlab (GUI) permitindo a realização de uma análise fácil e de grande utilidade na identificação da qualidade e das grandezas envolvidas em um sinal qualquer de tensão e corrente. Juntamente com a análise do sinal a interface é capaz de projetar um banco de filtros passivos, sintonizado nas ordens harmônicas de acordo com a maior relevância estipulada pelo usuário, a fim de melhorar a taxa de distorção harmônica (THD). Vale salientar que esse analisador também terá a função de contribuir para um projeto de banco de capacitores realizando a compensação de reativos e consequente adequação do fator de deslocamento do sistema de acordo com o desejado.

Palavras-chave: Analisador de qualidade de energia. Interface didática. Taxa de distorção harmônica. Compensação de reativos. Filtros Passivos.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica tem por definição descrever o conjunto de fenômenos que podem afetar a amplitude, a forma de onda da tensão e corrente e de modo geral, a qualidade no fornecimento de energia elétrica (DUGAN, 2015). Quando um sistema elétrico apresenta um alto conteúdo harmônico, o mesmo é caracterizado como um sistema de baixa qualidade, pois haverá perdas por efeito Joule nos condutores, transformadores e nos demais equipamentos elétricos (EMANUEL, 1958). Uma das maneiras mais simples para solucionar problemas relacionados com a eficiência energética do sistema elétrico é a instalação de filtros passivos de potência na rede elétrica. Sua estrutura típica é composta por um circuito RLC em série, na qual são colocados em derivação com a rede, para uma redução da contaminação harmônica de corrente em sistemas elétricos de potência, sendo assim, os filtros são sintonizados nas proximidades das frequências a qual se deseja eliminar (BAITHA, 2015). A topologia deste filtro é ilustrada na Figura 1.

Figura 1- Topologia típica de um filtro sintonizado de potência.



Fonte: Adaptado de (DUGAN,2015).

Com o intuito de analisar a qualidade de energia elétrica de um sistema, desenvolveu-se neste trabalho, uma interface didática que emula um analisador de qualidade de energia com compensação de reativos e aplicação de filtros passivos. Essa foi desenvolvida na plataforma gráfica (GUI) do software *MatLab* e seu principal objetivo é apresentar dados relevantes para uma avaliação completa e criteriosa da qualidade de energia do sistema elétrico.

Dentre alguns trabalhos na área da engenharia elétrica e com foco educacional pode-se citar (RUSINARU , 2012; NISHIDA, 2015; STANESCU, 2017).

O restante deste artigo está como segue: a Seção 2 contém uma breve contextualização do comportamento do sistema elétrico frente aos reativos da rede e filtros passivos. Na Seção 3 é apresentada a interface didática, bem como suas funcionalidades, a Seção 4 aborda a validação da plataforma, e por fim na Seção 5 estão as considerações finais.

2 DESENVOLVIMENTO

Para corrigir um sistema elétrico, de baixa qualidade, faz-se necessário realizar a compensação de reativos, que segundo ANEEL (2010), o fator de potência mínimo adotado no Brasil é de 0,92, e eliminar possíveis harmônicas existentes no sinal, muitas vezes inseridas no sistema devido a existência de cargas não lineares. Para este segundo caso, aplica-se filtros passivos que são acoplados à rede. O intuito destes filtros é apresentar um caminho de baixa impedância na frequência de ressonância entre o capacitor e o indutor, que também é conhecida como sintonia do filtro e é apresentada na Equação (1). Tal filtro apresenta caráter capacitivo com baixa impedância, para frequências abaixo da sintonia, e caráter indutivo com alta impedância em elevadas frequências (DUGAN, 2003)

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

A relação entre a parte resistiva com a reativa, Equação (2), é estabelecida por meio do fator de qualidade Q na qual é determinante para a escolha da largura da banda passante e na escolha do grau de seletividade do filtro (BAITHA, 2015). Os filtros sintonizados são filtros passa-banda com alto fator de qualidade, geralmente com valores entre 30 a 100 (DE, 2003), será utilizado valores em torno de 20 e 60 para filtrar os harmônicos com baixa frequência.

$$Q = \frac{X_n}{R} = \frac{\sqrt{L_{STF}/C_{STF}}}{R} \quad (2)$$

3 INTERFACE DIDÁTICA

A interface do analisador de qualidade de energia foi desenvolvida utilizando a plataforma gráfica do *MatLab* GUI onde o usuário irá inserir os dados que se deseja avaliar. Esses dados foram gerados utilizando o software *Psim* que será explicado em seções futuras.

Basicamente a interface funciona da seguinte forma: quando o sinal de tensão e corrente apresentar conteúdos harmônicos, o usuário terá um campo destinado para inserir os dados de projeto de um filtro passivo sintonizado nos harmônicos de maior relevância, contribuindo assim com a melhoria da qualidade do sinal. O software gráfico tem a capacidade de analisar qualquer tipo de carga, e assim, como uma segunda proposta, será realizada a análise de uma carga RL onde haverá necessidade de projetar um banco de capacitor para a compensação de reativos. O usuário para efetuar tal análise, deverá entrar com os dados de projeto no campo destinado para a elaboração dos filtros passivos sintonizados, sendo que o resultado na saída capacitância total corresponderá à capacitância do banco de capacitores para alcançar o fator de potência desejado pelo usuário.

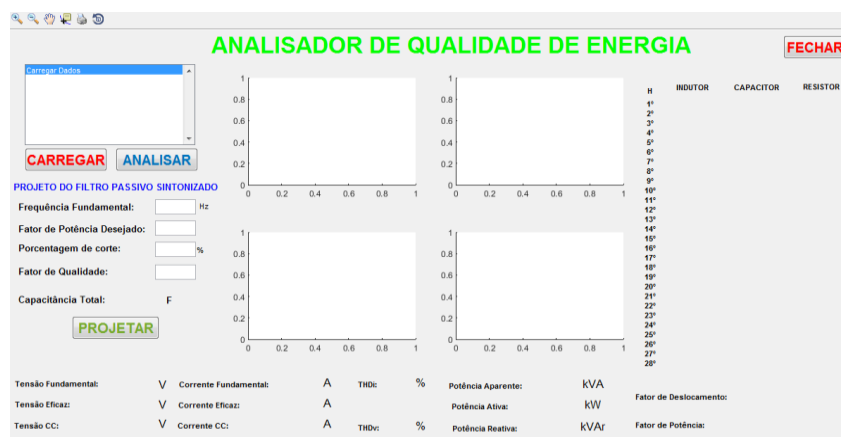
Na Figura 2 tem-se a representação da interface gráfica GUI, na qual os dados a serem analisados deverão estar em formato específico e serem inseridos na pasta 'dados' da plataforma. O resultado da coleta de dados, para a tensão e corrente em função do tempo, deverá ser distribuído em três colunas, sendo elas na seguinte ordem: tempo, tensão e corrente. Quando o usuário clicar no botão 'carregar', todos os arquivos de texto serão importados para a *listbox* e apresentado na tela do software gráfico, permitindo a escolha daquele que se deseja analisar. As duas janelas gráficas superiores apresentam os resultados para o formato de onda da tensão e corrente em função do tempo, enquanto as duas inferiores apresentam o espectro harmônico das respectivas grandezas.

Na parte inferior da interface gráfica são apresentados os parâmetros de relevância para o sinal de tensão e corrente, tais como: tensão e corrente fundamental, eficaz e contínua; taxa de distorção harmônica para a tensão e corrente; potência aparente, ativa e reativa e por fim, os fatores de deslocamento e de potência. No canto central esquerdo é o local destinado ao projeto do filtro passivo sintonizado, sendo que os parâmetros de projeto são inseridos pelo usuário. O primeiro parâmetro é a frequência fundamental do sinal analisado, sendo o segundo o fator de potência desejado. O terceiro parâmetro é a porcentagem de corte, sendo ela importante para definir qual harmônico será de relevância para serem incluídos no projeto do filtro sintonizado. A porcentagem de corte está relacionada com quais harmônicos estão acima do valor inserido pelo usuário, pois o valor de corte é a porcentagem, a qual foi inserida, da amplitude fundamental do sinal. E por fim, o quarto parâmetro que se refere ao fator de qualidade do filtro, que possui uma faixa de valores já mencionados anteriormente.

Por fim, o valor que aparecer no campo da capacitância total será o valor do banco de capacitor para a compensação de reativo, quando a análise se tratar de uma carga RL. Agora, quando o valor de capacitância aparecer para uma análise de uma carga não linear, tal resultado será referente à capacitância total dos filtros passivos, pois caso o usuário deseje projetar um banco de indutor para consumir a energia reativa fornecida pelos, o valor da capacitância total será necessário.



Figura 2-Analisador de qualidade de energia via interface gráfica desenvolvido no Matlab.



Fonte: Autoria própria.

4 VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA DIDÁTICA

Duas análises de um sinal de tensão e corrente, no ponto de acoplamento comum, foram realizadas no analisador de qualidade de energia. A primeira é composta por uma carga retificada por uma ponte trifásica, caracterizando então uma carga não linear com alta taxa de distorção harmônica e a segunda análise é compensar o reativo de uma carga RL por intermédio de um banco de capacitores. Os dados para gerar o arquivo de texto, que descreve a tensão e corrente em função do tempo, foram obtidos por intermédio do *Psim*, que é um software de simulação de circuito eletrônico, especialmente para o uso em simulações de eletrônica de potência e acionamento de motores. O *Psim* será utilizado para comparar e validar os resultados da implementação gráfica do analisador de qualidade de energia.

4.1 Carga não linear

A carga representada na Figura 3 foi montada e analisada no software *Psim*, e com isso, obteve-se o arquivo de texto contendo os dados necessários para analisar a qualidade do sinal via implementação gráfica do analisador de qualidade de energia.

O formato de onda da tensão e corrente gerado pode ser observado na Figura 4, na qual é possível identificar uma elevada taxa de distorção harmônica. Com base nos dados do *Psim*, que descrevem o comportamento dos sinais, o arquivo de texto é importado para a pasta 'dados' do analisador de qualidade e assim é iniciado o processo de análise via implementação gráfica, de acordo com a Figura 5. Um comparativo entre as grandezas obtidas através das simulações estão apresentadas na Tabela 1, na qual a análise foi feita para a fase A do circuito.

Tabela 1 - Grandezas coletadas por ambos métodos na fase A.

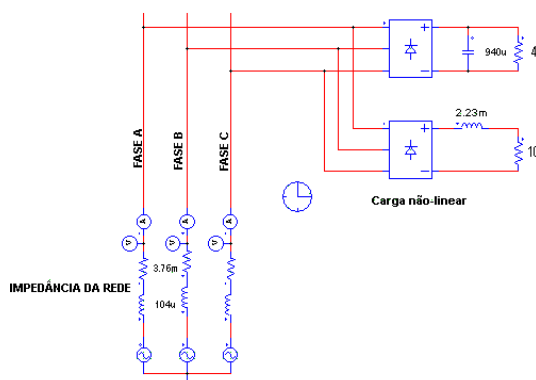
Grandezas	<i>Psim</i>	<i>GUI</i>	Erro [%]
Fator de Potência	0,831	0,832	0,12
Corrente Eficaz [A]	100,13	100,19	0,06
Tensão Eficaz [V]	127,47	127,34	0,10
THDv [%]	9,92	9,84	0,81
THDi [%]	65,62	65,35	0,41

Fonte: Autoria própria.



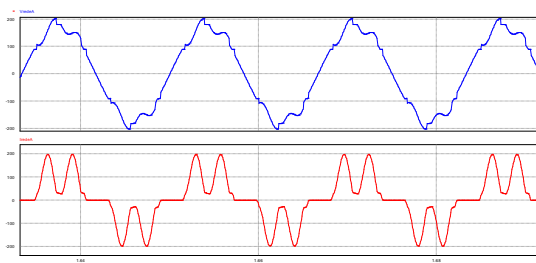
via implementação gráfica do analisador de qualidade energia.

Figura 3- Circuito com cargas não lineares com alta taxa de distorção harmônica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 - Formato de onda da tensão (azul) e corrente (vermelho) no ponto de acoplamento comum.



Fonte: Autoria própria.

O projeto dos filtros passivos de potência foi dado com a inserção dos parâmetros no campo de projeto e obteve os seguintes resultados, que são apresentados na Tabela 2. Os parâmetros inseridos foram: frequência fundamental de 60Hz, o fator de potência desejado de 0,92, a porcentagem de corte de 2% e o fator de qualidade típico de 60.

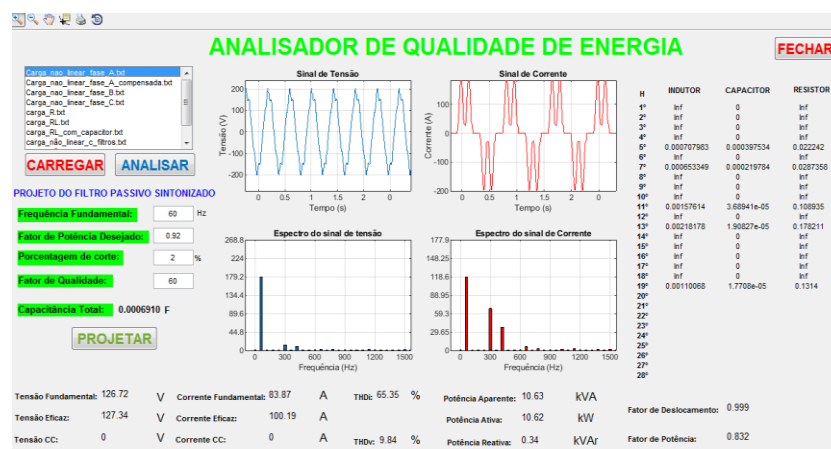
A partir dos valores determinados pelo analisador de qualidade de energia, os filtros passivos foram inseridos ao circuito da Figura 3 para a atenuação dos harmônicos acima da porcentagem de corte de 2%, como apresentado na Tabela 2. A Figura 6 representa o circuito com a inserção dos filtros passivos de potência RLC série. Como o sistema é equilibrado, os valores dos componentes obtidos serão iguais para as fases B e C, sendo assim, ao inserir os filtros passivos de potência nas três fases, os mesmos apresentarão um caminho de baixa impedância para o harmônico o qual foi sintonizado, resultando na diminuição das amplitudes harmônicas. Na Figura 7 encontra-se ilustrado o resultado da forma de onda do sinal da tensão e corrente simulado no *Psim*.

Tabela 2 - Resultado dos parâmetros necessário para a construção do filtro passivo sintonizado.

Harmônico	Frequência [Hz]	Indutor [mH]	Capacitor [μ F]	Resistor [m Ω]
5°	300	0,708	397,5	22,24
7°	420	0,653	219,8	28,74
11°	660	1,576	36,89	108,9
13°	780	2,182	19,08	178,2
19°	1140	1,101	17,71	131,4

Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Interface gráfica do analisador de qualidade de energia: análise das grandezas para carga não-linear.

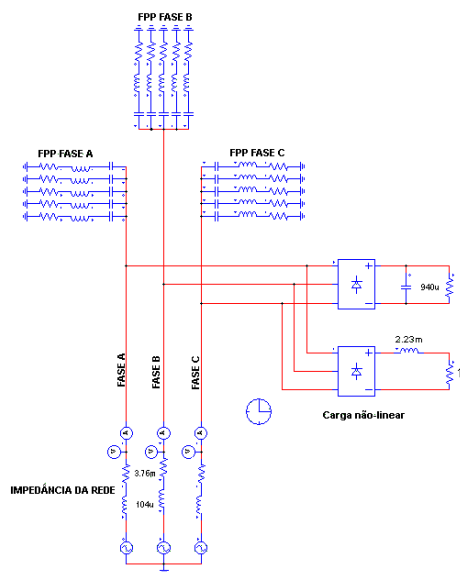


Fonte: Autoria própria.

Com base nos dados gerados pelo *Psim*, após a inserção dos filtros passivos, foi realizada uma avaliação da qualidade do sinal e da eficiência do filtro projetado em comparação com os dados obtidos pelo analisador de qualidade de energia. Essa comparação é apresentada na Tabela 3.

O sinal da tensão e corrente se aproximou de um formato senoidal, houve a diminuição da corrente eficaz, no ponto de acoplamento comum, e também a elevação simultânea da tensão e do fator de potência, resultados alcançados apenas com a diminuição das amplitudes dos harmônicos de maior relevância. A Figura 8 apresenta os resultados das grandezas obtidas por intermédio do analisador de qualidade de energia, para o sinal da tensão e corrente com instalação dos filtros passivo de potência ao sistema elétrico.

Figura 6 - Circuito com carga não linear quando os filtros passivos de potência não inseridos para a compensação harmônica de corrente no ponto de acoplamento comum.



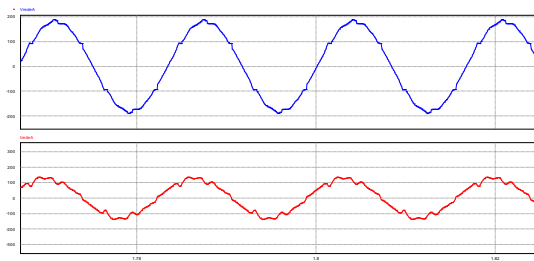
Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 - Grandezas coletadas por ambos os métodos na fase A após a inserção dos filtros sintonizados.

Grandezas	<i>Psim</i>	<i>GUI</i>	Erro [%]
Fator de Potência	0,900	0,902	0,22
Corrente Eficaz [A]	91,06	90,96	0,11
Tensão Eficaz [V]	128,49	128,45	0,03
THDv [%]	3,280	3,21	2,13
THDi [%]	9,923	9,80	1,24

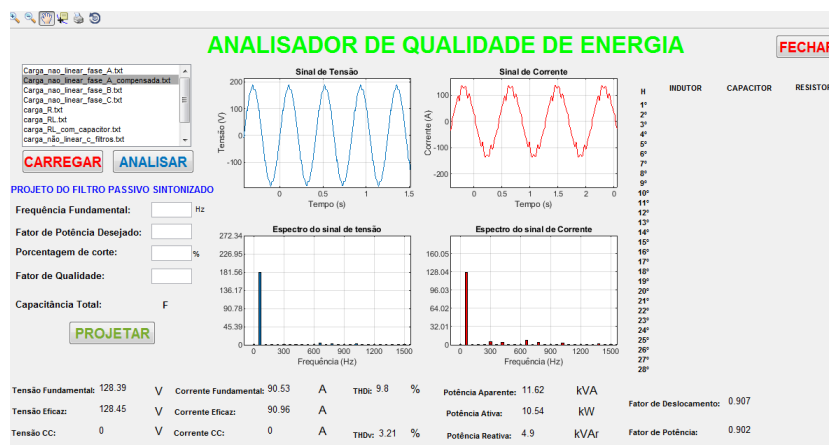
Fonte: Autoria própria.

Figura 7- Formato de onda da tensão (azul) e corrente (vermelho) após a inserção dos filtros passivos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 - Interface gráfica do analisador de qualidade de energia: grandezas após a inserção dos filtros.



Fonte: Autoria própria.

4.2 Carga indutiva

A segunda análise é a compensação de reativos de uma carga indutiva com a inserção de um banco de capacitor em paralelo com a rede, com o propósito da elevação do fator de potência ao valor desejado. A carga indutiva está representada na Figura 9.

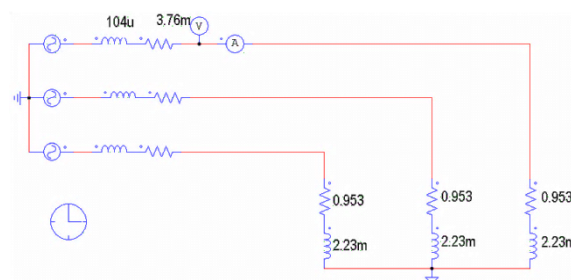
As grandezas de interesse para a análise da carga indutiva estão dispostas na Tabela 4, e os dados contidos nela foram obtidos pelos dois métodos.

O fator de potência de 0,75 é atrasado devido à característica da carga indutiva e deve ser corrigido para 0,92, como já mencionado anteriormente. Com base nesta informação, um projeto de banco de capacitor foi feito no campo de projeto de filtro passivo do analisador de qualidade de energia, onde a capacitância total que o mesmo fornece quando os parâmetros de projeto são inseridos, se refere à capacitância total para alcançar o fator de potência desejado inserido pelo usuário. A Figura 10 (a) representa o formato de onda da tensão e corrente no ponto de acoplamento comum quando o sistema elétrico alimentar uma carga RL.

O banco de capacitor, para alcançar o fator de potência desejado de 0,92, é de 713,9 μ F, sendo que esse resultado foi obtido por intermédio do analisador de qualidade de energia. A Figura 10 (b) representa o formato de onda do sinal da tensão e corrente quando o banco de capacitor, ligado em estrela, foi inserido ao circuito, realizando a compensação reativa do sistema.

A Figura 11 representa a interface gráfica do analisador com os resultados obtidos para a análise do sinal de corrente e tensão, na qual o resultado da capacitância do banco está apresentada no campo de projeto para o filtro passivo sintonizado.

Figura 9 - Circuito com carga indutiva.



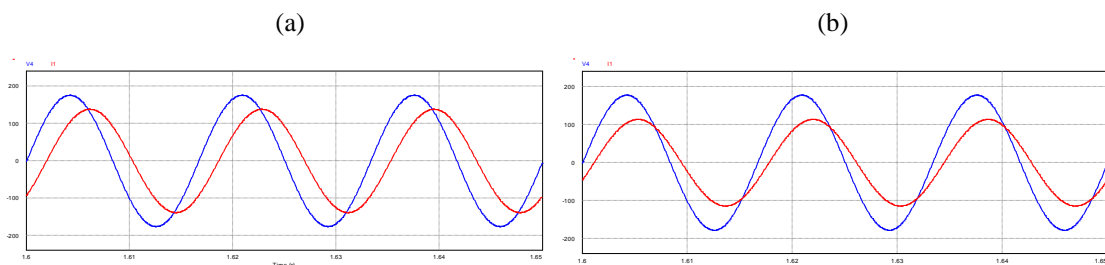
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Grandezas coletadas por ambos os métodos numa carga RL.

Grandezas	<i>Psim</i>	<i>GUI</i>	<i>Erro [%]</i>
Fator de Potência	0,75	0,75	0,00
Corrente Eficaz [A]	97,94	97,92	0,02
Tensão Eficaz [V]	124,44	124,44	0,00
Potência Ativa [kW]	9,147	9,14	0,08
Potência Aparente [kVA]	12,188	12,19	0,02
Potência Reativa [kVar]	8,055	8,06	0,06

Fonte: autoria própria.

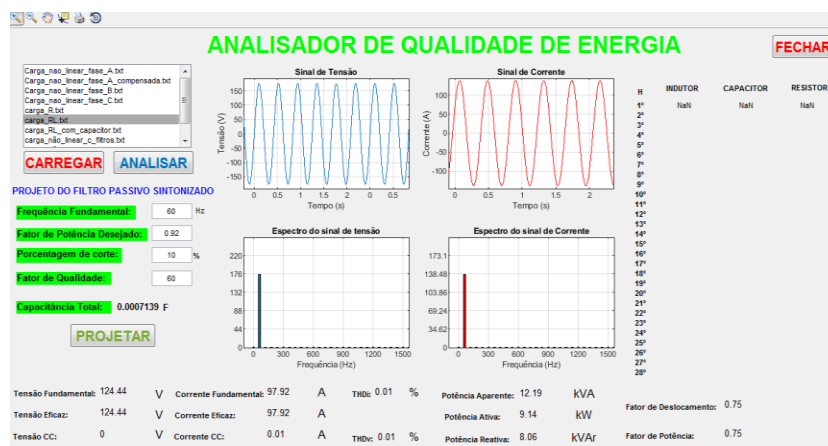
Figura 10 - Formato de onda da tensão (azul) e corrente (vermelho): (a) operação sem a correção do fator de potência; (b) operação com banco de capacitor para compensação.



Fonte: Autoria própria.

Independentemente dos valores inseridos nos parâmetros de projeto do filtro passivo, quando a análise em questão for uma carga linear, o analisador sempre retornará NaN como resposta, evidenciando que não há distorções harmônicas significativas na tensão e corrente, descartando a necessidade de filtros passivos. As grandezas de interesse para a análise da carga indutiva, após a inserção do banco de capacitores, estão dispostas na Tabela 5, e os dados contidos nela foram obtidos pelos dois métodos.

Figura 11- Interface gráfica do analisador de qualidade de energia: análise das grandezas para carga RL.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Grandezas coletadas por ambos os métodos com a inserção do banco de capacitores.

Grandezas	<i>Psim</i>	<i>GUI</i>	<i>Erro [%]</i>
Fator de Potência	0,919	0,920	0,11
Corrente Eficaz [A]	80,77	80,65	0,15
Tensão Eficaz [V]	125,74	125,73	0,01
Potência Ativa [kW]	9,338	9,33	0,09
Potência Aparente [kVA]	10,156	10,14	0,16
Potência Reativa [kVar]	3,993	3,97	0,58

Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito desse trabalho foi desenvolver um analisador de qualidade de energia elétrica utilizando a plataforma gráfica de desenvolvimento (*guide*) do *Matlab*. A plataforma criada foi capaz de demonstrar resultados satisfatórios na análise da qualidade energia, aplicada a qualquer tipo de carga.

Por fim, pode-se dizer que ao analisar uma carga não linear trifásica com alta distorção harmônica de corrente, ao projetar o filtro passivo com os parâmetros inseridos pelo usuário, foi possível diminuir em sete vezes a TDH de corrente. A segunda análise foi baseada em uma carga linear RL com baixo fator de potência, e através dos parâmetros de projeto do filtro passivo inseridos, foi possível obter o banco de capacitores necessário para a compensação de reativo, elevando o fator de potência para o desejado. Dessa forma, com base nos resultados apresentados, o analisador de qualidade de energia demonstrou ser eficiente fornecendo resultados satisfatórios para uma aplicação prática.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Normativa 414/2010 14724**: direitos e deveres dos consumidores e distribuidoras. Brasília, 2010.

BAITHA, Anil; Gupta, Nitin. A comparative analysis of passive filters for power quality improvement. In: 2015 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy. Kollam, 2015.

DE, Subrata; BHUVANESWARI, G. Investigations on the impact of VAR rating and quality factor on the effectiveness of a shunt passive filters. In: 2006 IEEE Power India Conference, New Delhi, 2006.

DUGAN, Roger C. *et al.* **Electrical Power Systems Quality**. 2ª ed. McGraw-Hill. 2003.

EMANUEL, A. E. On the assessment of harmonic pollution. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v. 10, n. 3, pp. 1693-1698, 1995.

NISHIDA, E. N. *et al.* Low-cost platform for electrical measurement and frequency analysis in power electronic education. In: 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza, 2015, pp. 1-6.

RUSINARU, D.; MANESCU, L.; FIRINCA, D. E. Integrated didactic software package for computer based analysis of power quality," In: 2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, 2012.

SASAKI, Chari Midoral; OSHIRO, Larissa KEiko. **Kit didático para a implementação de filtros passivos e ativos**. 2014. 247 f. Monografia (Graduação) - Faculdade de Engenharia Industrial Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

STANESCU, Dan Gabriel; ARDELEANU, Mircea Emilian; STAN, Andrei Cristian. Designing, simulation and testing of low current passive filters used in the didactic activity. In: The 7th International Conference on Modern Power Systems (MSP 2017). Craiovi, 2017.

DIDACTIC INTERFACE AN ENERGY QUALITY ANALYZER WITH REACTIVE COMPENSATION AND PASSIVE FILTER APPLICATION USING MATLAB

Abstract: *This article presents the creation of a didactic interface that emulates a power quality analyzer with reactive compensation and application of passive filters. This interface was developed on the graphical platform of the Matlab software (GUI) allowing an easy and very useful analysis to be carried out to identify the quality and quantities involved in any voltage and current signal. Together with the signal analysis, the interface is able to design a passive filter bank, tuned in harmonic orders according to the highest relevance stipulated by the user, in order to improve the harmonic distortion rate (THD). It is worth mentioning that this analyzer will also have the function of contributing to a capacitor bank project, carrying out the reactive compensation and consequent adaptation of the system displacement factor according to the desired value.*

Keywords: *Power quality analyzer. Didactic interface. Harmonic distortion rate. Reactive compensation. Passive Filters.*