

PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA APLICADA À ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – ESTUDO DE CASO

Bruno Antônio Mandrick – brunomandrick@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Avenida Alberto Carazzai, 1640
86300-000 - Cornélio Procópio – PR

Silvio Aparecido de Souza – silviosouza@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Avenida Alberto Carazzai, 1640
86300-000 - Cornélio Procópio – PR

Murilo da Silva – murilosilva@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Avenida Alberto Carazzai, 1640
86300-000 - Cornélio Procópio - PR

Resumo: *O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de caso de ensino e aprendizagem de engenharia elétrica cujo foco está no desenvolvimento de uma ferramenta computacional aplicada a avaliação de sinais de tensão/corrente, coletados de um sistema elétrico de potência. O trabalho demonstra a importância da iniciação científica, mesmo em nível de graduação, melhorando algumas habilidades relevantes aos estudantes, por meio de desenvolvimento de projetos reais, da mesma maneira que eles são resolvidos nas empresas. Nestes tipos de projetos, o aluno é estimulado constantemente a identificar e analisar os dados do problema, criando e implementando uma forma ágil e prática de visualização os dados sob análise, a fim de auxiliá-lo na tomada de decisão sobre como proceder para a efetiva resolução do problema. No tocante ao ensino, o projeto propiciou ao aluno a aprendizagem aplicada da engenharia e o desenvolvimento de competência técnicas e gerenciais.*

Palavras-chave: *Competências. Ensino e Aprendizagem por Projetos. Iniciação Científica. Qualidade da Energia Elétrica.*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das habilidades técnicas necessárias aos estudantes dos cursos de Engenharia tem passado por uma constante transformação. Embora a base de fundamentação teórica destes cursos tenha sido pouco alterada, novos desafios têm se apresentado devido às novas tecnologias e ferramentas utilizadas pela área. No Brasil, ainda é comum que os engenheiros tenham que lidar tanto com as tecnologias antigas, baseadas em grandezas analógicas, quanto digital, onde as grandezas digitalizadas possuem uma variedade maior de aplicação, principalmente por sua facilidade de comunicação, armazenamento e compartilhamento de dados entre sistemas. De uma forma geral, o universo das Engenharias passou de um momento em que se tinham poucos dados para análise dos engenheiros, e consequente tomada de decisão, para uma nova realidade, ou seja, excesso de informações. A área de engenharia elétrica não difere das demais e, devido as características intrínsecas de um

sistema elétrico de potência (SEP), passando pela geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, possuem uma grande relevância nacional por se apresentar como um sistema de grandes dimensões. O mercado da tecnologia, digitalização, comunicação, disseminação da informação, regulamentação dos setores, globalização como um todo, tem aumentado o nível de competitividade entre as empresas. Portanto, a formação dos novos engenheiros deve ter como foco, além do seu desenvolvimento acadêmico teórico/prático, outras habilidades específicas para que estes possam ser capazes de trabalhar de forma otimizada com essas informações, oriundas de várias partes do SEP, e apresentar soluções inovadoras que agilizam tanto nas ações no seu dia a dia quanto na tomada de decisões mais importantes, as quais devem estar alinhadas as estratégias da empresa.

2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nos últimos anos, o estudo voltado à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem sido muito enfatizado devido ao aumento do número de cargas sensíveis às perturbações na tensão de fornecimento aos consumidores.

A ocorrência de distúrbios em SEP, como aqueles ocasionados por descargas atmosféricas, correntes de magnetização de transformadores, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores, ou ainda pelos efeitos de chaveamentos de capacitores em linhas de transmissão, pode provocar inúmeras interferências indesejáveis e, conseqüentemente, acarretar em efeitos econômicos não desprezíveis, ocasionando prejuízos tanto às concessionárias como aos consumidores.

Dentre muitos apontamentos da literatura, Dugan, McGranaghan, Beaty (1996), definem o termo qualidade da energia como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos de consumidores.

Atualmente, a QEE é avaliada pela concessionária e órgãos governamentais através de específicos índices, como DEC e FEC, conforme os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST, em seu módulo 8, revisão 10, vigente a partir de 01 de Janeiro de 2018 (ANEEL, 2018), o qual estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações. No tocante a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracterizando os fenômenos e estabelecendo os limites ou valores de referência.

A utilização de ferramentas computacionais para se modelar um sistema elétrico real tornou-se, ao longo dos anos, uma prática comum e indispensável. As razões para essa postura são inúmeras, dentre as quais pode-se destacar: a possibilidade de se verificar eventuais falhas de um sistema antes que este seja implementado, o dimensionamento dos dispositivos de segurança, economia de capital, uma maior compreensão do sistema, maior eficiência de seus equipamentos, dentre outros. Nos sistemas de potência, por se tratar de uma área onde o volume de capital envolvido é bastante significativo, essa prática se difundiu largamente, visto que fazer simulações é uma forma segura e barata de se fazer testes e implementações, auxiliando, inclusive, no dimensionamento dos dispositivos da rede (FONSECA e LEAL, 2003).

Neste contexto, o foco principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional aplicada a análise da qualidade da energia elétrica, baseados em dados de simulações de distúrbios presentes nos sinais de tensão e corrente de um dado sistema elétrico de potência. Destaca-se que esta interação no meio acadêmico desde a simulação do fenômeno, neste trabalho simulada no *software* ATPDraw (PRIKLER e HOIDALEN, 2002) e (EEUG, 2018), passando pela aquisição dos sinais de tensão/correntes e posterior utilização na

ferramenta computacional desenvolvida, mediante visualização gráfica das informações, acrescenta um conhecimento prático e teórico importante na formação dos novos engenheiros e, ainda, auxilia significativamente na metodologia de ensino aplicada em sala de aula.

3 HABILIDADES REQUERIDAS

3.1 Linguagem de Programação C#

A linguagem C# (C Sharp) além de ser moderna e gratuita, é composta de um conjunto de linguagens dentre elas o Delphi, C++ e Java. Juntando-se os melhores recursos de cada uma delas criou-se o C# a fim de quebrar as limitações que as demais linguagens proviam. A linguagem C# utiliza da programação orientada a objetos em conjunto com a arquitetura .NET (dotNET), sendo assim especialmente desenvolvida para esta plataforma (LIMA, 2002).

Segundo Deitel e Deitel (2007), algumas características desta linguagem são:

- Desenvolvido unicamente para a plataforma .NET;
- Sintaxe semelhante à de outras linguagens como C, C++ e Java;
- Padrões de orientação a objeto;
- Possui uma sintaxe simples de ler e entender;
- Diversos recursos *online* e suporte gratuito;
- Amplo número de ferramentas já incluídas em seu script inicial.

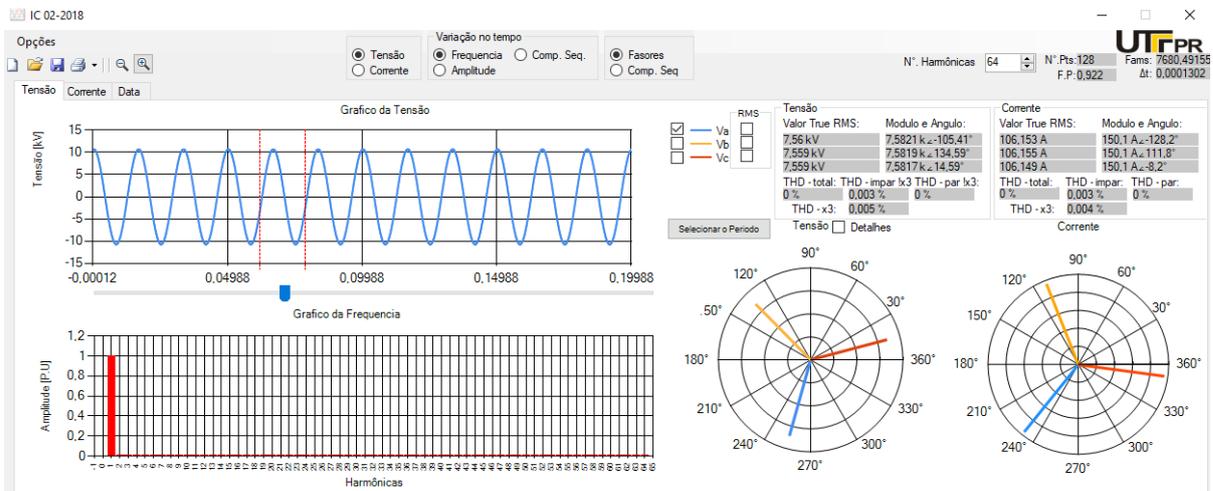
O .NET é um projeto da empresa *Microsoft* que visa em apenas uma plataforma para realizar o desenvolvimento de sistemas e aplicações. Qualquer código que for gerado a partir do .NET poderá ser executado em qualquer dispositivo que possua um *framework* desta plataforma. Os programas em C# são executados no .NET *Framework*, que é um componente integrado ao Windows que inclui um sistema de execução virtual o CLR (*Common Language Runtime*) e um conjunto de bibliotecas unificado de classes. Além deste tempo de execução, o .NET também inclui uma biblioteca abrangente com mais de 4000 classes que estão organizadas em *namespaces*, tudo isso para fornecer uma ampla variedade de funcionalidades para praticamente todo o tipo de programação, desde a entrada até a saída de dados (DEITEL e DEITEL, 2007).

3.2 Metodologia do Projeto Interface Gráfica Desenvolvida

A maioria dos programas/ferramentas computacionais que analisam dados medidos de tensão e corrente, provindos de um sistema elétrico, sejam oriundos de medição ou de simulações, não são gratuitos. Neste sentido, o projeto de desenvolvimento de uma ferramenta computacional, apresenta ao acadêmico a oportunidade de desenvolvimento de habilidades requeridas no universo das Engenharias. Segundo Gil (2002), o êxito de uma pesquisa depende fundamentalmente de certas qualidades intelectuais e sociais do pesquisador, como a curiosidade, criatividade, atitude autocorretiva, perseverança e paciência, imaginação disciplinada, dentre outras. Desta forma, a iniciação científica, possibilita ao discente o desenvolvimento dessas e outras características bem como contribui para obtenção do perfil do egresso desejado no curso, conforme o Projeto Pedagógico do Curso (UTFPR-CP, 2017). Para este trabalho, conceitos como linguagem de programação, alinhada a construção de uma interface gráfica, simulações no *software* ATPDraw, qualidade da energia elétrica, distribuição de energia elétrica, processamento digital de sinais, dentre outros, foram necessários.

A ideia central deste trabalho é apresentada na Figura 1, a qual ilustra no canto superior esquerdo a forma de onda de tensão, no domínio do tempo, oriunda de simulação. No entanto, a informação no domínio da frequência, canto inferior esquerdo da mesma figura, é importante para distinguir qual o tipo de distúrbio pode estar afetando a QEE. Essa análise é feita para uma dada janela no tempo, escolhida pelo usuário e configurada apenas com a movimentação do cursor. No canto superior direito da figura têm-se os valores calculados RMS (*Root Mean Square*) e respostas relacionadas as distorções harmônicas dos sinais trifásicos de tensão e corrente em análise. Por fim, na parte direita inferior da Figura 1, tem-se a apresentação na forma fasorial para os sinais trifásicos já mencionados.

Figura 1 – Área de trabalho do programa desenvolvido



Fonte: Autoria própria.

Assim, desta janela em análise, o discente percebe um sinal de tensão senoidal, sem distorção harmônica e perfeitamente equilibrado, podendo ser traduzido como uma energia de boa qualidade a ser entregue aos consumidores. A equação (1), descreve a transformada discreta de Fourier (TDF) que foi implementada para obtenção das informações no domínio da frequência (LEÃO, SAMPAIO, ANTUNES, 2014).

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} n \cdot k} \quad (1)$$

Sendo N o número de amostras por período, f_k a amplitude de cada amostra, F_n os valores complexos (modulo e fase) das N senóides obtidas com TDF. Já a equação (2), descreve a metodologia de componentes simétricas (STEVENSON, 1986), onde três fasores desequilibrados de um sistema podem ser substituídos por três sistemas equilibrados de fasores.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

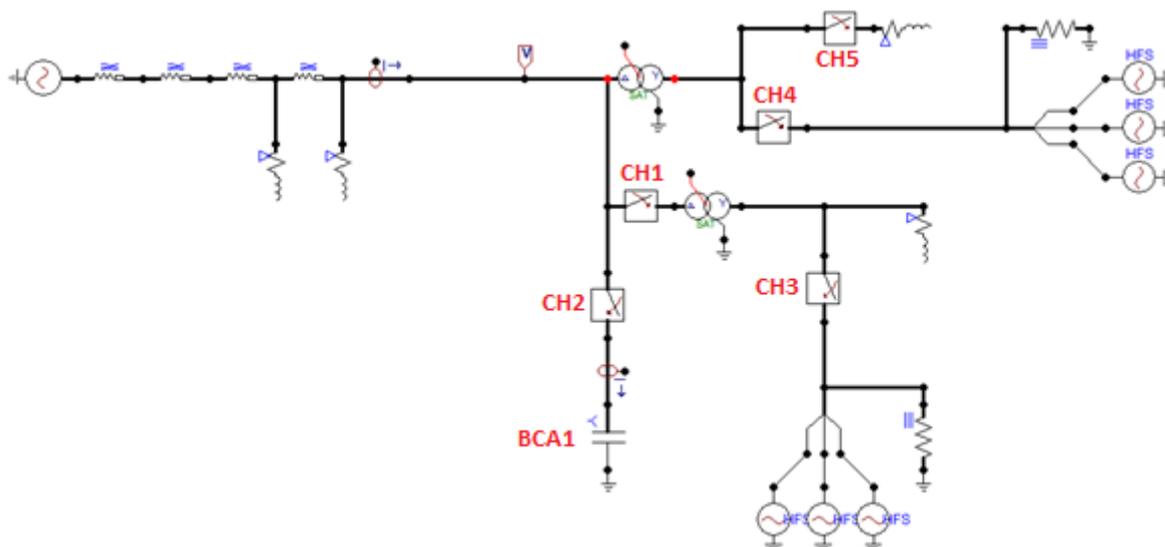
Sendo V_A , V_B e V_C os fasores trifásicos da tensão, V_{a0} , V_{a1} e V_{a2} os fasores de sequências zero, positiva e negativa da fase a, respectivamente, e, por fim, $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ e $\alpha^2 = 1 \angle 240^\circ$ são os operadores responsáveis pelo deslocamento angular entre as fases.

Os demais equacionamentos para a distorção harmônica total, distorção harmônica de ordem par, distorção harmônica de ordem ímpar e distorção harmônica múltiplos de 3, podem ser encontrados no PRODIST, em seu módulo 8, revisão 10 (ANEEL, 2018).

4 SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Com o intuito de testar e validar a plataforma desenvolvida utilizou-se de dados de tensão e corrente obtidos por meio de simulação de um sistema de distribuição de energia elétrica, modelado por meio do software ATPDraw (PRIKLER e HOIDALEN, 2002) e (EEUG, 2018). Na Figura 2, tem-se o sistema modelado no ATPDraw. Trata-se de um alimentador de um sistema elétrico de distribuição de 13,8 KV real de uma cidade do noroeste do estado de São Paulo.

Figura 2 – Sistema simulado pelo ATPDraw.



Fonte: Autoria própria

Assim, o sistema foi modelado para realizar a análise dos sinais de tensão e corrente e levantamento de indicadores relativos a distorção harmônica frente a ligação de cargas com grande potencial harmônico. Neste sistema são representados todos os elementos: fonte CA, impedâncias do sistema de distribuição, transformadores, cargas fundamentais, fontes harmônicas, chaves e banco de capacitores. As chaves CH4 e CH5 interligam ao sistema as cargas atuais. As chaves CH1 e CH3 são responsáveis por interligar as cargas futuras, devido a solicitação de aumento de carga da empresa em questão. A chave CH2 energiza o banco de capacitores para correção do fator de potência da empresa.

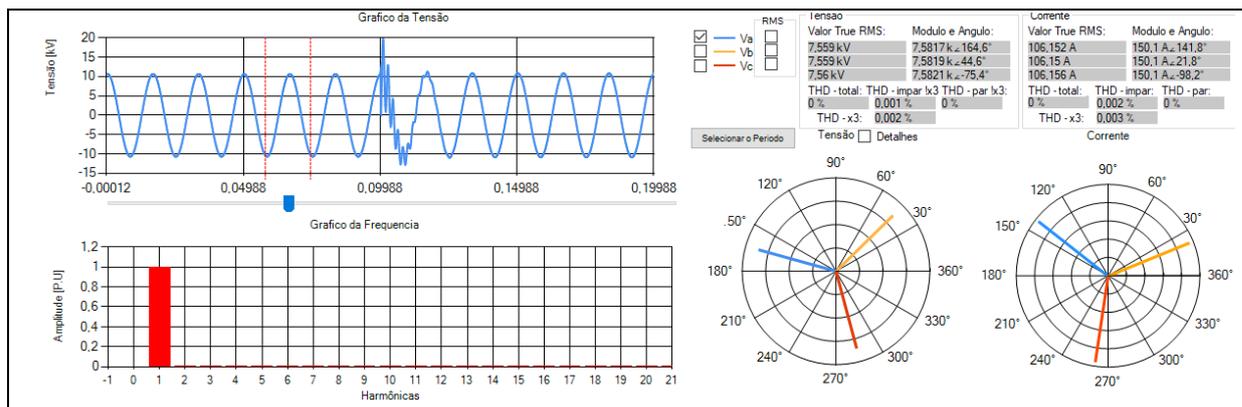
5 RESULTADOS OBTIDOS

Baseado no sistema elétrico apresentado, a ferramenta computacional desenvolvida permitiu as seguintes análises para os estudos de caso em destaque:

5.1 Estudo de caso 1: Análise antes do chaveamento do banco de capacitores e sem Cargas não lineares

O fechamento do banco de capacitores (BCA1) foi realizado em torno de 0,100 segundos, conforme ilustrado na figura 3, sendo selecionada uma janela de dados para análise antes desse tempo.

Figura 3 – Resultados para estudo de caso 1.



Fonte: Autoria própria

A tabela 1 apresenta os valores calculados pela ferramenta computacional desenvolvida, para várias grandezas de medição e compara com os valores de referência, percebendo, praticamente não haver diferença entre eles.

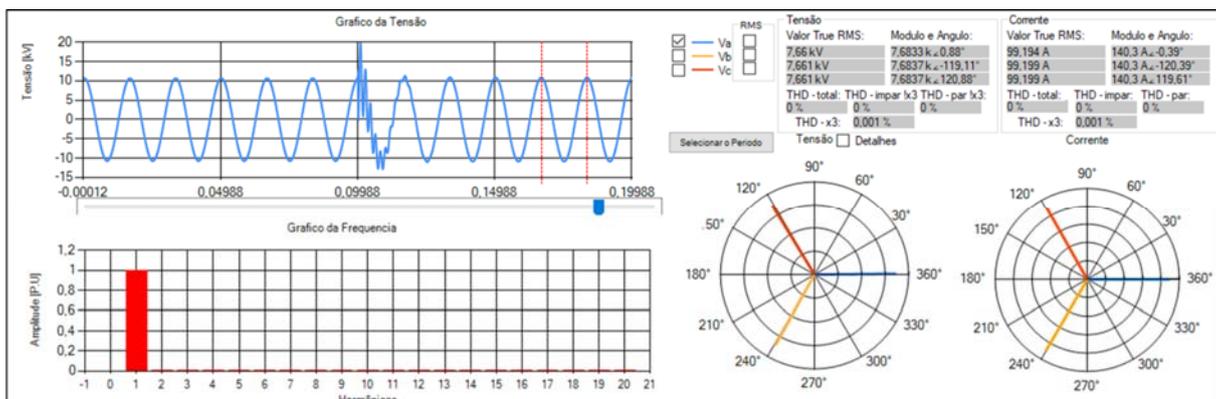
Tabela 1 – Comparação entre os valores de referência e calculados para o estudo de caso 1.

	Valores de Referência	Valores Calculados
Tensão Fase (kV)	7558,86	7559,00
Corrente (A)	106,15	106,15
DTT (%)	0,00	0,00
DTTp (%)	0,00	0,00
DTTi (%)	0,00	0,00
DTT3 (%)	0,00	0,00

5.2 Estudo de caso 2: Após do chaveamento do banco de capacitores e sem Cargas não lineares

Neste caso, a janela de dados escolhida para análise se deu após o fechamento do banco de capacitores (BCA1), de acordo com a figura 4. Novamente, bons resultados são percebidos na tabela 2. A tensão estimada é ligeiramente superior ao caso 1, uma vez que a introdução do banco de capacitores melhora o perfil de tensão.

Figura 4 – Resultados para estudo de caso 2.



Fonte: Autoria própria

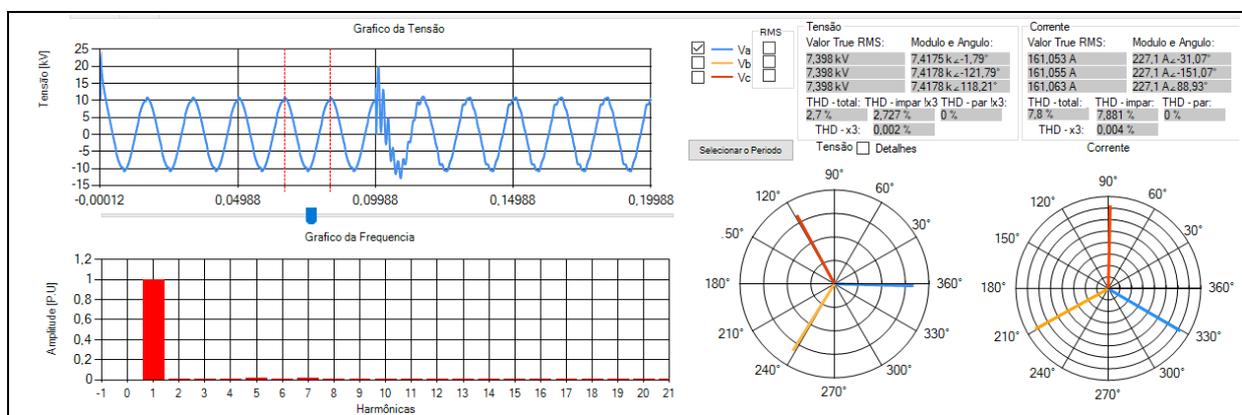
Tabela 2 – Comparação entre os valores de referência e calculados para o estudo de caso 2.

	Valores de Referência	Valores Calculados
Tensão Fase (kV)	7660,40	7668,00
Corrente (A)	99,19	99,19
DTT (%)	0,00	0,00
DTTp (%)	0,00	0,00
DTTi (%)	0,00	0,00
DTT3 (%)	0,00	0,00

5.3 Estudo de caso 3: Análise antes do chaveamento do banco de capacitores e com Cargas não lineares

Basicamente, com a utilização cada vez maior de cargas não lineares, oriundas do desenvolvimento da eletrônica de potência, tem-se que as correntes e tensões do sistema perdem sua característica senoidal desejada, afetando a qualidade da energia elétrica. Neste estudo de caso, foi considerado a existência destas cargas não lineares, mediante suas conexões no sistema em estudo através das chaves CH3 e CH4, figura 2. Novamente, uma janela de dados para análise foi tomada antes do fechamento do BCA1. A figura 5, ilustra os resultados desta análise.

Figura 5 – Resultados para estudo de caso 3.



Fonte: Autoria própria

A tabela 3 apresenta excelentes resultados na comparação entre os valores calculados pela ferramenta computacional os valores de referência, destacando o aparecimento de distorção harmônica, neste caso, de ordem ímpar.

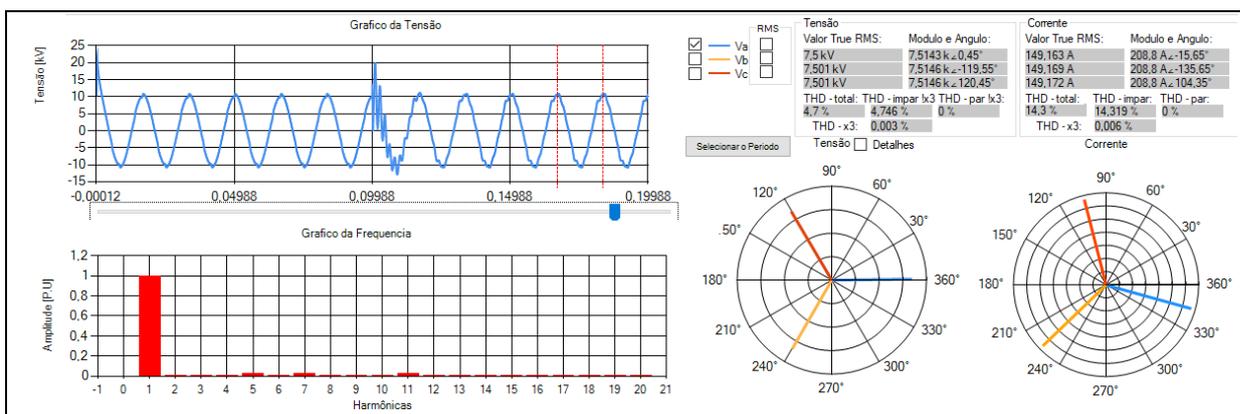
Tabela 3 – Comparação entre os valores de referência e calculados para o estudo de caso 3.

	Valores de Referência	Valores Calculados
Tensão Fase (kV)	7463,81	7417,50
Corrente (A)	162,05	161,05
DTT (%)	2,70	2,70
DTTp (%)	0,00	0,00
DTTi (%)	2,70	2,72
DTT3 (%)	0,00	0,00

5.4 Estudo de caso 4: Análise depois do chaveamento do banco de capacitores e com Cargas não lineares

Este quarto estudo de caso diferencia do anterior apenas por escolher uma janela de dados para análise após o fechamento do BCA, figura 6. Embora de baixa amplitude, percebe no gráfico das harmônicas, a presença de algumas componentes, como a 5ª, 7ª e 11ª.

Figura 6 – Resultados para estudo de caso 4.



Fonte: Autoria própria

A tabela 4, novamente destaca bons resultados obtidos pela ferramenta computacional desenvolvida. Com relação a plotagem dos fasores de tensões e correntes, por não haver a introdução de situação de desequilíbrio no sistema, os mesmos se mantiveram com mesmos módulos e defasagens iguais entre si.

Tabela 4 – Comparação entre os valores de referência e calculados para o estudo de caso 4.

	Valores de Referência	Valores Calculados
Tensão Fase (kV)	7561,21	7514,30
Corrente (A)	149,03	149,16
DTT (%)	4,70	4,70
DTTp (%)	0,00	0,00
DTTi (%)	4,70	4,73
DTT3 (%)	0,00	0,00

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possibilitou a análise de casos de estudo relacionados a qualidade da energia elétrica mediante a utilização de uma interface gráfica, desenvolvida por meio de iniciação científica. Os excelentes resultados obtidos comprovaram que o sucesso da ferramenta implementada, uma vez que estes foram obtidos de acordo com os cálculos previstos em Normas, podendo ser utilizada práticas de sala de aula.

Do ponto de vista técnico, o aluno interagiu diretamente com *softwares* de simulação e conceitos relacionados a SEP, trabalhando com dados reais e realizando tarefas que são comuns ao dia a dia dos engenheiros eletricitas, mesmo sem ter cursado disciplinas mais específicas da área. Destaca-se, também, o desenvolvimento de novas habilidades e a formação e consolidação de competências ligadas a análise de problemas, criação, inovação, aplicação, gestão e geração de valor.

A iniciação científica, aplicada a problemas reais de Engenharia, como na avaliação da qualidade da energia elétrica, além de ajudar na solução de problemas, permite ao aluno o desenvolvimento de competências requeridas pelas empresas, proporcionando um fator motivacional importante.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo incentivo e apoio.

REFERÊNCIAS

DEITEL, Harvey. M.; DEITEL, Paul. J. **C# - Como Programar**. São Paulo: Pearson Education, 2007.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. (1996). **Electrical Power Systems Quality**. McGraw-Hill.

E.E.U.G European EMTP-ATP users group. Disponível em: <https://www.eeug.org/index.php/about-eeug/about-atp-draw>. Acesso em: 06 maio 2019.

FONSECA, H. L. C. A.; LEAL, M. F. **Análise de transitórios eletromagnéticos utilizando o ATPDraw**. 2003. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 2014.

LIMA, E.; REIS, E. **C# e .Net para desenvolvedores**. Rio de Janeiro: Campus, 2002.

PPC-UTFPR-CP. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Elétrica, UTFPR- Cornélio Procópio.** Disponível em: <http://portal.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/graduacao/cornelio-procopio/cp-engenharia-eletrica/documentos/documentos-do-curso-de-engenharia-eletrica>.

Acesso em: 06 maio 2019.

PRIKLER, László; HOIDALEN, Hans Kristian. **ATPDRAW Version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP – Users' Manual.** Sintef Energy Research, Trondheim, Norway, 2002.

PRODIST-ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional.** Revisão 10, (2018).

STEVENSON, Willian D. **Elementos de análise de sistema de potência.** 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

Undergraduate Research Project Applied to Power Quality Analyze - Case Study

Abstract: *This paper presents a case study in an electrical engineering teaching and learning which the main idea is to develop a graphical interface tool applied to analyze voltage/current data obtained from an electrical power system. This work presents how important is a research, even in an ungraduated level, improving some relevant skills to the students, as it involves work with real problems, in the same way they are solved in companies. In these kinds of projects, students are constantly stimulated to identify and analyze all the data related to the problem, by developing a practical and agile tool which can help them visualize and understand this problem, leading to decide what should be done to solve it. In terms of teaching, the project provided students with applied apprenticeship in engineering and the development of technical and managerial skills.*

Key-words: *Skills, Teaching and Learning by Projects, Undergraduate Research, Power Quality.*