

SOFTWARE DE AUXILIO AO ENSINO DA RESSONÂNCIA HARMÔNICA EM CURSOS DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Aryana Santos de Azevedo – aryana.emg.eletrica@gmail.com

Felipe Giovanni Moura Araújo – e.felipearaujo@hotmail.com

Maria Emília de Lima Tostes – tostes@ufpa.br

Paulo de Lima Tostes – paulolimatostes@gmail.com

Thiago Mota Soares – thiagosoares@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia

Avenida Perimetral 2651, Prédio 01.

CEP: 66077-830 - Belém -Pará

Resumo: *O Estudo de harmônicos é essencial em cursos de graduação em Engenharia Elétrica, pois são os responsáveis por ocasionar diversos problemas em sistemas elétricos, afetando tanto o desempenho em diversos equipamentos, quanto causando prejuízos técnicos e econômicos na rede de energia elétrica. O fenômeno da ressonância agrava tais problemas com Harmônicos, pois amplificam os seus efeitos. Profissionais ligados ao setor elétrico precisam conhecer as causas e consequência destes fenômenos, entendendo como estes distúrbios elétricos se comportam, para que soluções possam ser criadas a fim de solucioná-las. O fenômeno da ressonância é de difícil entendimento para alunos de graduação em engenharia elétrica. Este artigo apresenta e descreve o projeto de um Software para auxílio e compreensão do fenômeno da Ressonância harmônica, assim como a facilidade de sua utilização em sala de aula por professores de graduação em cursos de Engenharia Elétrica.*

Palavras-chave: *Harmônicos em Sistemas Elétricos; Ressonância Harmônica; Software.*

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a sofrer distúrbios ligados falta da qualidade da energia elétrica, como harmônicos, flutuações, desequilíbrios de tensão, dentre outros, que geralmente são ocasionados por fatores externos ou internos aos sistemas de potência. No setor elétrico, podem-se evitar grandes perdas através da identificação rápida destes fenômenos. Instituições acadêmicas com cursos voltados a área da engenharia elétrica colocam em seu currículo pedagógico disciplinas voltadas ao estudo de distúrbios em sistemas elétricos, devido a sua importância, porém muitas das vezes não são abordadas de forma correta devido a sua complexibilidade ou pela falta de conteúdos visuais para auxiliar na didática das mesmas, o que acarreta em uma difícil compreensão por parte do Aluno.

O estudo de Ressonância Harmônica é um exemplo da necessidade e falta de recursos visuais durante a realização de cursos de graduação, pois é necessário que o aluno



saiba interpretar gráficos, além da utilização de resultados experimentais retirados de análises feitas em analisadores de qualidade da energia. A utilização de analisadores de qualidade de energia em disciplinas que ensinam sobre Ressonância Harmônica é inviável, devido ao valor elevado para a aquisição destes equipamentos.

Utilizar ferramentas de simulação em sala de aula torna a disciplina mais dinâmica, proporcionando ao professor criar situações encontradas em experimentos sem a necessidade de equipamentos caros.

Este artigo apresenta o resultado do desenvolvimento de um software para facilitar o entendimento da ressonância harmônica. O Software vem para ilustrar visualmente a ressonância harmônica a fim de aprimorar a compreensão do aluno. No software proposto o professor terá total liberdade para configurar o seu ambiente de acordo com a sua necessidade, para que possa ilustrar exemplos, tendo sempre resultados próximos aos obtidos em resultados experimentais.

2. SOFTWARE DIDÁTICO PARA ENSINO DE RESSONÂNCIA HARMÔNICA

Para o desenvolvimento do software foi utilizado a plataforma LabVIEW, um ambiente de programação e criação de interfaces. Para comparação dos resultados obtidos foram utilizados dados coletados em experiências práticas no Laboratório de Qualidade de Energia (LABQUALI), situado no Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônica (CEAMAZON). O software adotou como parte dos resultados das experiências realizadas o fenômeno da ressonância harmônica em série, utilizando equipamentos do laboratório como a fonte de harmônicos, o analisador da FLUKE e o SIMULINK/MATLAB.

2.1. Ressonância harmônica

Harmônicos são tensões ou correntes com uma frequência que é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da alimentação, são geradas por cargas não lineares introduzidas na rede, seja esta residencial ou industrial.

As cargas não-lineares são classificadas em três categorias de acordo com a natureza da distorção harmônica por elas provocadas (IEEE TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATIONS (1996); SILVA (1997):

CATEGORIA 1 - Equipamentos com característica operativa de arcos voltaicos, tais como os fornos a arco, máquinas de solda, iluminação fluorescente e outros. A natureza da distorção da corrente é oriunda da não linearidade do arco voltaico.

CATEGORIA 2 - Equipamentos de núcleo magnético saturado, tais como reatores e transformadores de núcleo saturados. A natureza da distorção da corrente é oriunda da não linearidade do circuito magnético.

CATEGORIA 3 - Equipamentos eletrônicos, tais como inversores, retificadores, UPS, televisores, fornos de microonda, computadores e outros. A natureza da distorção da corrente é oriunda da não linearidade dos componentes eletrônicos.

Os efeitos das Harmônicas podem levar a aquecimentos, por exemplo em motores e geradores elas aumentam o aquecimento de máquinas rotativas, comprometendo o funcionamento do equipamento. O Fenômeno da Ressonância é o responsável por amplificar

as Harmônicas no sistema, conseqüentemente elevando os prejuízos gerados a patamares críticos. Medidas de segurança devem ser realizadas assim que o efeito da Ressonância Harmônica é detectado para que sejam evitadas queimas de equipamentos e explosões.

O conceito de Ressonância parte do pressuposto que todos os corpos possuem uma frequência natural de oscilação, que quando sintonizada com a frequência externa amplificará as oscilações existentes.

A ressonância numa determinada frequência ocorre quando a impedância da fonte de harmônico de um circuito casa com a impedância do sistema ou com parte dele, de modo a igualar suas reatâncias capacitiva e indutiva. Como consequência, a tensão e/ou a corrente assumem valores elevados, amplificando os problemas provocados pelos harmônicos.

Em geral, os equipamentos envolvidos nos problemas de ressonância são os bancos de capacitores utilizados para correção do fator de potência das instalações, os transformadores e os filtros passivos, que utilizam associações de indutores e capacitores. Podem ocorrer também problemas envolvendo as cargas não-lineares e o sistema de energia (ARRILAGA; BRADLEY; BODGER, 1985).

A ressonância pode ser do tipo série ou paralela. Em ambas, as reatâncias capacitiva X_C e indutiva X_L , dos elementos em ressonância, igualam-se, ou seja,

$$X_C = X_L$$

Substituindo as expressões para X_C e X_L na relação acima, chega-se à frequência harmônica h , que provocará a ressonância entre os elementos em questão, ou seja,

$$\frac{1}{h\omega C} = h\omega L \quad (1)$$

$$h^2 \omega^2 LC = 1 \quad (2)$$

$$h = \frac{1}{\omega \sqrt{LC}} \quad (3)$$

Onde:

C – capacitância em Farad;

L – indutância em Henry;

$\omega = 2\pi f$ – frequência angular fundamental em rad/s;

h – frequência harmônica de ressonância.

Na condição de ressonância série, tem-se um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas; na condição de ressonância paralela, ao contrário, tem-se um caminho de alta impedância para as correntes harmônicas.

2.2 A Estrutura do software desenvolvido

Na tela de início (Figura 1) o usuário é questionado sobre o tipo de sistema a ser utilizado, assim como a configuração do resultado final. Dentre as opções disponíveis estão os sistemas em serie e os sistemas em paralelo, para o resultado final o mesmo pode escolher se pretende visualizá-lo com ou sem o fenômeno da ressonância.

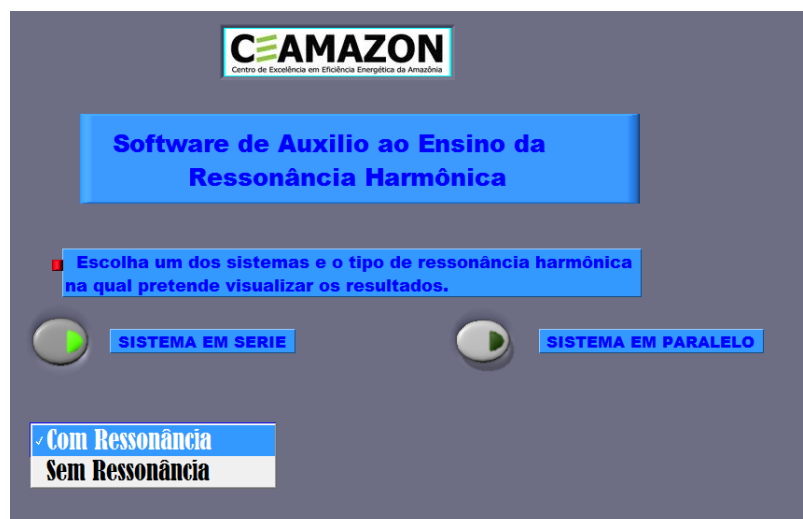


Figura 1: Tela de Início do Software

Dependendo do tipo de sistema escolhido o usuário é direcionado a tela com suas configurações específicas.

2.2.1 Resultados finais sem o fenômeno da ressonância

A tela para esta configuração apresenta um ambiente com circuito propicio a ressonância (Figura 2), mas que não apresentará harmônicos com a mesma frequência de ressonância do sistema.



Figura 2: Opção sem ressonância harmônica

2.2.2 Resultados finais com o fenômeno da ressonância

A tela para esta configuração apresenta um ambiente com circuito propício a ressonância, tendo o usuário que escolher em qual harmônico pretende visualizar o seu comportamento da corrente com o fenômeno de ressonância presente, ou seja, um circuito com valores propícios ao fenômeno. (Figura 3).

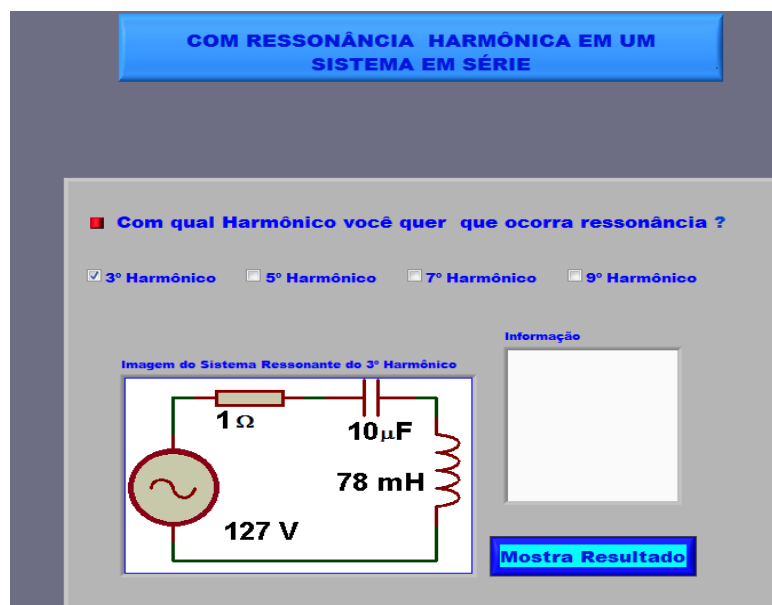


Figura 3: Opção com ressonância harmônica

Para a configuração dos circuitos, foram adotados valores favoráveis a frequências de ressonância para circuitos em serie (Tabela 1).

Tabela 1: Valor de indutores e capacitores pra um fenômeno de ressonância harmônica no sistema em série.

Harmônico	Indutor	Capacitor	Resistor
3°	78 m H	10 μ F	1 Ω
5°	47 m H	6 μ F	1 Ω
7°	24 m H	6 μ F	1 Ω
9°	29 m H	3 μ F	1 Ω

2.3 Obtenção dos resultados

Assim que tem o ambiente configurado de acordo com as suas necessidades o usuário poderá selecionar o botão MOSTRAR RESULTADO, para que uma janela com as formas de onda pertinentes a configuração sejam geradas. Os resultados oferecidos são apenas complementares, logo o usuário deve ter um mínimo de conhecimento sobre o assunto abordado.

2.3.1 Resultados gráficos com ou sem o Fenômeno da Ressonância Harmônica

Quando o fenômeno da Ressonância Harmônica não acontece (Figura 5), gráfico gerado será da forma de onda fundamental (Gráfico branco na Figura 5) na presença de componentes de 3°, 5°, 7° e 9° harmônicos (Gráfico em cores na Figura 5). É observada a diferença de amplitude da corrente fundamental com as correntes harmônicas.

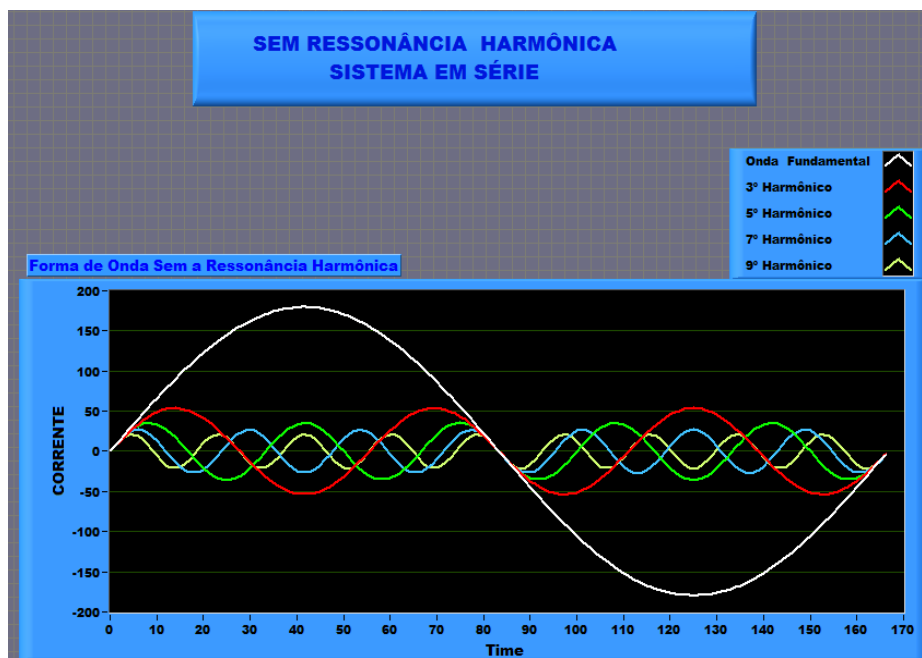


Figura 5: Gráficos quando o Fenômeno da Ressonância Harmônica não acontece

Como resultado o software também pode apresentar o espectro harmônico (figura 6), um gráfico em forma de barra que exhibe a frequência harmônica e seu valor em RMS. Por

exemplo na Figura 6, 127 V dividido por $\sqrt{2}$ é igual a 89,80, sendo apresentado o valor da fundamental no gráfico gerado.

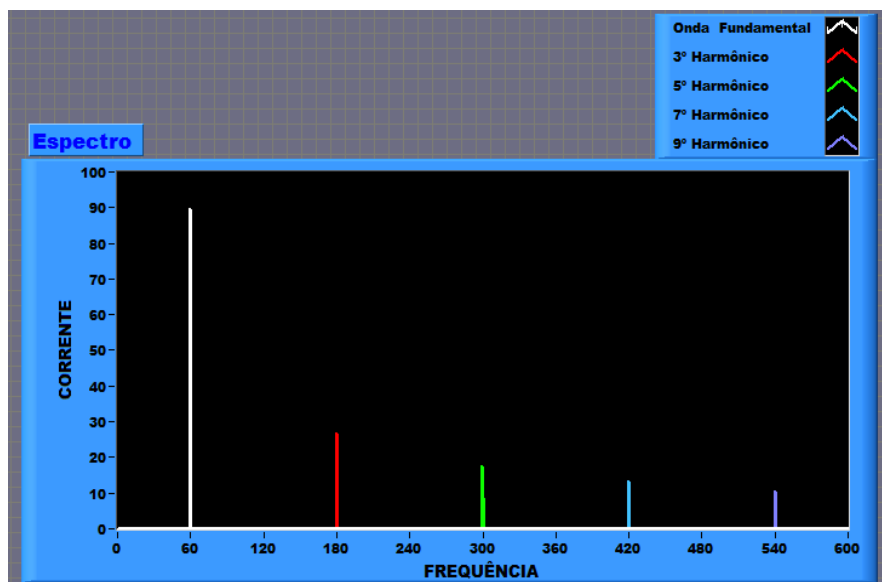


Figura 6: Espectro harmônico sem ressonância

Também é apresentada a sua forma de onda com distorção da corrente harmônica (figura 7).

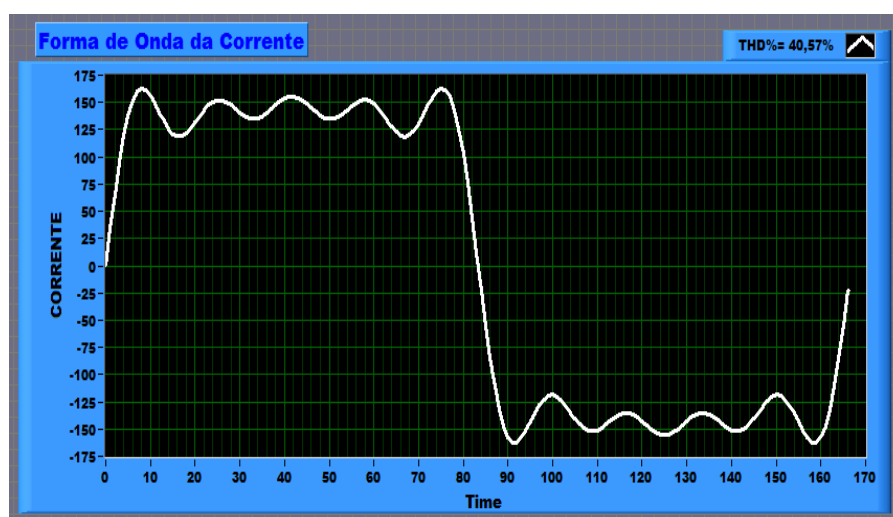


Figura 7: Forma de Onda da Corrente distorcida.

Na Figura 8 é possível observar em seus resultados o gráfico com o fenômeno da ressonância acontecendo no 3º harmônico, é a partir desse momento que o usuário começa a

observar visualmente a diferença da forma de onda com a presença da ressonância, a amplificação é notória e essa amplificação segue nos gráficos seguintes.



Figura 8: 3º Harmônico em ressonância

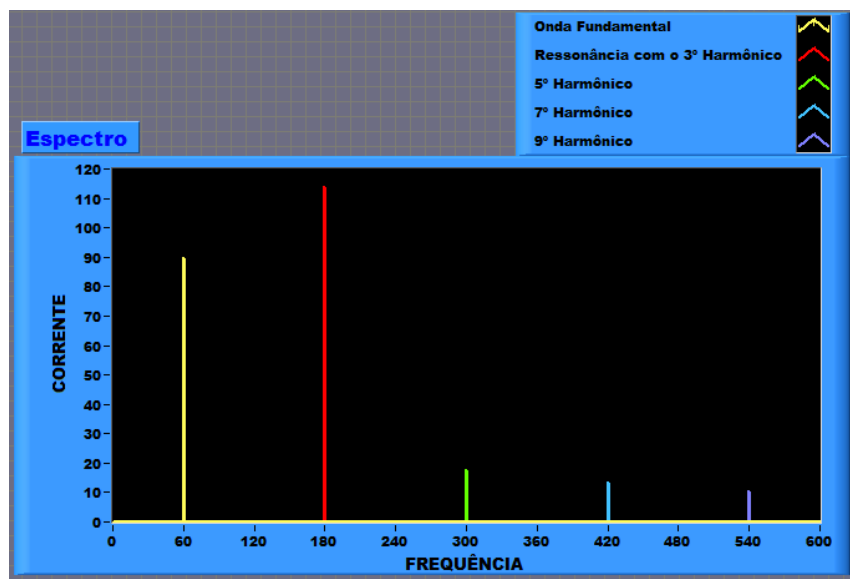


Figura 9: Espectro do 3º Harmônico em ressonância

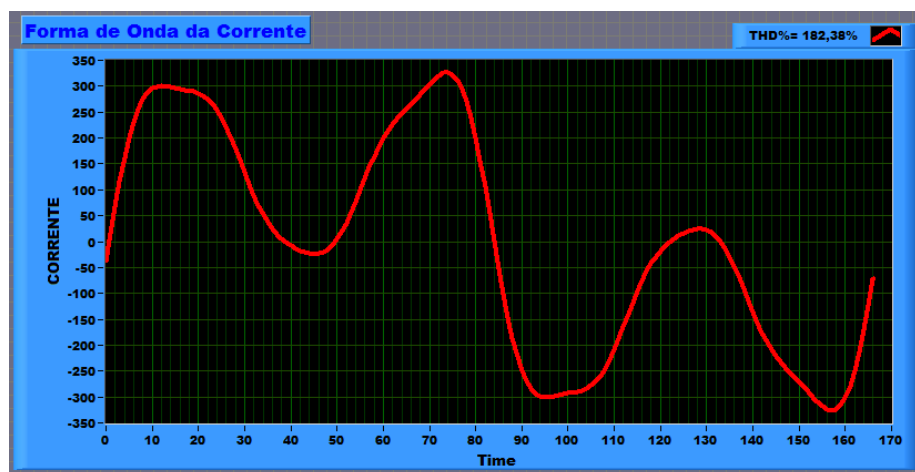


Figura 10: Forma de onda do 3º Harmônico em ressonância

2.4 Pré-Requisitos para o uso do Software

2.4.1 Utilização em sala de aula

O professor que for utilizar em sala de aula precisa repassar a seus alunos o conceito de tensão, apresentando a sua forma senoidal. O programa adota uma tensão de 127V com frequência de 60Hz no sistema em série, sendo considerada como forma de onda fundamental. O software trabalhará inicialmente apenas com o 3º, 5º, 7º e 9º harmônico. Normalmente a magnitude dos componentes harmônicos é menor do que a fundamental, logo será adotado nos sistemas os valores de 30%, 20%, 15% e 12% de tensão harmônica em relação a fundamental.

É importante repassar aos alunos conceitos básicos como as três principais formas de geração de harmônicos e suas consequências nos circuitos elétricos.

No software não foi utilizado o valor RMS, mas sim o valor de pico ou o valor Máximo que a tensão pode ter, o software faz essa conversão direta. Por exemplo, a tensão no sistema em série foi de 127 V, esse foi o valor em RMS “Equação 4”. Apresentando a conversão tanto pra tensão quanto pra corrente “Equação 5”.

$$V_{rms} = \frac{V_{mx}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$I_{rms} = \frac{I_{mx}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de ferramentas digitais em sala de aula abre um grande leque de possibilidades, afastando barreiras e mostrando uma nova percepção aos alunos sobre o tema estudado. Com o desenvolvimento do software voltado ao entendimento da ressonância



harmônica constatou-se a importância de ferramentas visuais em cursos ligados a área de engenharia elétrica, assim como a evolução na possibilidade de colocar nas disciplinas de graduação conteúdos que normalmente só são vistos na pós graduação pela sua complexidade. O software desenvolvido e apresentado neste artigo foi totalmente desenvolvido por alunos de graduação com a intenção de ser utilizado no melhor entendimento do aluno sobre assuntos complexos.

Trazar ferramentas pedagógicas digitais para dentro dos cursos da área de energia tornam as aulas mais dinâmicas, possibilitando ao professor demonstrar a seus alunos um maior numero de exemplos práticos sem necessitar de um grande aparato tecnológico, assim como criar novas práticas em sala de aula.

O Aluno tornando-se ativo na busca do conhecimento utilizando o software passa a observar e entender a frequência harmônica e suas múltiplas que estão circulando nos sistemas elétricos, o que o atrai para a disciplina. Por ter sido desenvolvido com base em experimentos realizados em laboratório o usuário terá acesso aos mesmos resultados obtidos em prática, podendo atrelar novos conceitos e estudar os seus comportamentos, o que não seria permitido em práticas de laboratório por conta da falta ou da dificuldade no manuseio de equipamentos já que os analisadores de energia, que medem as distorções harmônicas são extremamente caros.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Iniciação Científica (PIBIC), no qual permite ao aluno de graduação entrar em contato com grupos de pesquisas, aprimorando o seu conhecimento fora da sala de aula.

Devido ao PIBIC, o assunto Ressonância Harmônica pode ser melhor abordado em cursos na UFPA (Universidade Federal do Pará) e proporcionou a criação do Software para auxílio de professores na abordagem do tema proposto, aprimorando o ambiente docente.

4. REFERÊNCIAS

ARRILAGA; BRADLEY; BODGER, 1985 - Load Characteristics Task Force of the IEEE Working Group on Power System Harmonics. *The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 9, pp. 2555-2563, Sept. 1985.

ENGEMATEC, (Equipamentos Elétricos e Eletrônicos de Potência Ltda), Harmônicos em Sistemas de Potência Entendendo os Fundamentos. Disponível em: <http://www.engematec.com.br/site/downloads/harmonicos_fundamentos.pdf.html> Acesso em: 16 Jun. 2014.

IEEE Task Force on Modeling and Simulation – *Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks*, Part II: Sample Systems and examples. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11 No. 1 pp. 466-474, January 1996.



JESUS, N. C, & OLIVEIRA, H. R. P. M., Amplificação da Distorção Harmônica em Sistema de Distribuição. Disponível em: <http://www.sbqee.com.br/cbqee_2007_pdfs/31590.pdf.html> Acesso em: 10 Jun. 2014.

LEÃO, Ruth P. S. Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potencia. 2011

PEREIRA, Marco Pólo, Ressonância e Ferroressonância em Sistemas Elétricos. Disponível em: <<http://www.google.com.br/Marcos+Ressonancia.html>> Acesso em: 08 Jun. 2014.

SILVA, Rogério Diogne de Souza e, Analise de Definição de Índices de Ressonância Harmônica em Sistemas de Energia Elétrica. Belém- PA 2004.

TOMIM, Marcelo Aroca, Analise de Estabilidade em Regime Permanente de Sistemas Elétricos Susceptíveis a Ressonância Subsíncrona. Maio/2004

SOFTWARE AID TO EDUCATION OF HARMONIC RESONANCE IN ELECTRICAL ENGINEERING COURSES

Abstract: *The harmonics` study is essential in electrical engineering graduation courses, due to their propensity on causing several problems in electrical systems, affecting the performance of various equipments, and causing technical and economical losses on the power grid. The phenomenon of resonance aggravates such problems with harmonics, since they amplify its effects. Professionals linked to the electrical sector must know the causes and consequences of such phenomenon, understanding the behavior of those electric disorders, so that solutions can be created to solve them. The phenomenon of resonance is complex for electrical engineering graduate students` comprehension. This article presents and describes the project of a software to help the understanding of the phenomenon of harmonic resonance, as the ease of its use in classrooms by graduation professors in electrical engineering courses.*

Key-words: *Harmonics in electrical systems, harmonic resonance, software.*