



UMA AULA MOTIVADORA PARA OS TEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA USANDO RECURSO TECNOLÓGICO MODESTO

Ernesto Ruppert Filho - e-mail: ruppert@fee.unicamp.br

Marcelo G. Villalva - e-mail: mvillalv@dsce.fee.unicamp.br

Departamento de Sistemas e Controle de Energia (DSCE) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Cidade Universitária Zeferino Vaz – Distrito de Barão Geraldo - CP 6101
CEP 13083-970 - Campinas - São Paulo

***Resumo:** Para muitos estudantes que freqüentam cursos de Engenharia Elétrica no Brasil, principalmente para aqueles que trabalham para se manterem na escola, o estudo fora do tempo de aula é um limitante importante. O professor precisa se esmerar no aproveitamento eficiente do tempo da aula no sentido de proporcionar ao estudante a oportunidade do mesmo aprender o assunto da aula no espaço da aula. Muitas vezes alguns cálculos e a construção de gráficos são fundamentais para o entendimento completo do assunto em desenvolvimento na aula, mas são deixados para o estudante fazer após a aula por falta de recurso computacional, já que nem sempre são cálculos elementares, prejudicando o seu aprendizado durante essa aula. Apresenta-se neste trabalho um problema de Eletrônica de Potência que é equacionado e resolvido em sala de aula com o auxílio de uma simples calculadora eletrônica científica com capacidade gráfica visual, que nos dias de hoje é um recurso computacional modesto, visando o entendimento completo do problema durante a aula sem que fiquem tarefas relativas ao entendimento básico do assunto para serem realizadas fora da aula. A calculadora eletrônica com capacidade gráfica visual pode ser um importante meio facilitador do aprendizado do aluno quando não se dispõe de computador na sala de aula.*

***Palavras-chave:** Ensino de Engenharia Elétrica, Aproveitamento da aula, Calculadora Eletrônica, Eletrônica de Potência.*

1. INTRODUÇÃO

Novos cursos de Engenharia Elétrica foram criados e se iniciaram nos últimos anos no Brasil, atendendo ao aumento da demanda de pessoas aspirando por um curso universitário nessa área do conhecimento humano. A maioria deles funciona em período noturno onde a maior parte dos seus estudantes, trabalhando o dia todo, tem pouco tempo para estudar e para realizar tarefas em casa. Nesses cursos há uma mescla de estudantes jovens, recém-saídos do ensino médio, com estudantes mais velhos, que já terminaram há alguns anos ou até mesmo há muitos anos o ensino médio e que apresentam dificuldades maiores para enfrentar os desafios de estudar os conteúdos do curso de Engenharia Elétrica, que são pesados.

Com isso a aula torna-se, praticamente, o único espaço para o seu aprendizado mais intensivo e requer do professor um perfeito aproveitamento desse tempo, não só passando ao estudante o chamado conhecimento passivo, que via de regra está nos livros e apostilas, mas



principalmente fazendo-o ativamente através da apresentação de problemas que despertem nele o interesse pelo assunto e o façam procurar tempo para dedicar-se mais fora da aula.

Muitas vezes o estudante não estuda um determinado assunto porque não o entendeu na aula onde ele foi apresentado e não dispõe de tempo suficiente para aprendê-lo sozinho. É fundamental que o professor dê ao estudante a oportunidade de trabalhar ativamente em sala de aula, minimizando o ensino passivo que nunca o atrai, maximizando o ensino ativo através do uso de todos os recursos possíveis para mostrar ao estudante que o assunto em questão, além de importante, é também muito interessante e atrativo.

Mesmo nos cursos diurnos, onde o estudante em geral é jovem e dispõe de tempo suficiente para estudar fora da aula, é necessário que o professor aproveite o tempo de aula ativamente, passando problemas para serem resolvidos em sala de aula, complementando os ensinamentos passivos necessários. É importante que os professores não se esqueçam de que os jovens que ingressam no ensino superior já assistem televisão há mais de quinze anos, brincam com jogos eletrônicos há outros tantos anos e tornaram-se indivíduos de raciocínio e de reação rápidos, porém mais resistentes à reflexão. Os problemas passados para serem resolvidos em sala de aula, principalmente utilizando instrumentos com os quais o jovem já esteja acostumado, como o computador ou a calculadora eletrônica, satisfazem à sua rapidez de raciocínio para dominar o instrumento, não os afastando das aulas, e também lhes dão tempo para aprenderem a refletir sobre o assunto em estudo.

Neste trabalho apresenta-se um problema de Eletrônica de Potência bastante comum na indústria, que é o de acionamento de um motor de corrente contínua através de um conversor eletrônico monofásico ca-cc totalmente controlado. O problema é resolvido através de seu equacionamento matemático, passo a passo, com o auxílio de uma simples calculadora científica com capacidade gráfica visual. Durante uma aula de 2 horas onde a operação do conversor acionando o motor é discutida, as equações são escritas e o estudante pode, a partir delas, realizar os cálculos necessários, com os dados numéricos oferecidos, obter e analisar os resultados na sua pequena calculadora eletrônica que ele, invariavelmente, porta orgulhoso desde o dia em que ingressou no curso superior.

Devido ao avanço da tecnologia digital os computadores pessoais evoluíram muito ficando cada vez mais rápidos e acessíveis às pessoas. Com isso desenvolveram-se muitos programas computacionais dedicados (softwares) de todas as naturezas, nas mais diversas áreas do conhecimento humano. Hoje a maioria dos estudantes tem contato com o computador e resolvem ou tentam resolver seus problemas usando-o e, no futuro, ainda um pouco distante em alguns países, mas bem próximo em outros, estudantes de qualquer tipo de engenharia deverão ter um computador à sua frente durante a maioria das aulas senão de todas.

Especificamente na área de Engenharia Elétrica diversos softwares surgiram que hoje são muito úteis e absolutamente necessários para o trabalho do engenheiro. Entretanto é importante lembrar que um software, por melhor que seja o seu desempenho e sua interface com o usuário, é uma caixa fechada com interior inacessível, em geral, de modo que os resultados que produz devem ser analisados cuidadosamente antes de serem aceitos. Para usá-lo corretamente e ter certeza de sua validade é necessário que o profissional tenha recebido uma adequada formação básica profissional.

É importante que o professor de cada disciplina avalie o momento adequado, a partir do qual, o estudante possa utilizar um software disponível para os assuntos daquela disciplina sem que sejam abertas lacunas em sua formação profissional, devido à falsa impressão de aprendizado consciente que um software mal utilizado pode causar.



Com a popularização do computador os métodos matemáticos aproximados, as tabelas, e os ábacos que antigamente eram muito utilizados, deram lugar à aplicação de processos numéricos sofisticados e ao uso de simuladores e de softwares importantes cujo uso pelo estudante deve ser muito incentivado, porque é com eles que o profissional tornar-se-á mais produtivo para enfrentar a grande competição pela qualidade e produtividade que encontrará em sua vida profissional.

Na sala de aula geralmente o estudante não dispõe de computador e muitas vezes é necessário que ele execute cálculos e construa gráficos, naqueles exatos momentos da aula, para que entenda o assunto em discussão. Na maioria das vezes essa atividade é deixada, pelo professor, para ser realizada em casa ou é solicitado que o estudante utilize determinado software, fora da aula, para verificar aquele assunto, coisa que, provavelmente o estudante não fará ou que somente uns poucos o farão.

Como o professor tem a função de transmitir seus conhecimentos a todos os alunos e não só a uma parte deles a calculadora eletrônica científica com capacidade gráfica, que é um recurso computacional bastante modesto nos dias de hoje, pode ser muito útil e pode ser bem explorada nesses momentos importantes da aula com muito boa receptividade e resposta vindas do aluno.

2. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Na maioria dos programas dos cursos de Engenharia Elétrica, tanto no Brasil como no exterior, existe pelo menos uma disciplina de Eletrônica de Potência com a finalidade de mostrar como operam os diversos tipos de chaves semicondutoras existentes, como se deu o seu desenvolvimento tecnológico que elas têm tido desde 1960 até o momento e também de apresentar as configurações básicas, a operação e as principais técnicas de controle dos quatro importantes conversores eletrônicos de potência, extensivamente utilizados na indústria nos dias de hoje no condicionamento da energia elétrica. Esses são os conversores ca-cc (retificadores e inversores), os conversores cc-cc (recortadores ou choppers), os conversores ca-ca (controladores de tensão alternada ou gradadores) e os conversores cc-ca (inversores de frequência).

A maioria dos livros didáticos escritos nessa área, tanto no Brasil como no exterior, apresenta esses conversores de maneira muito simplificada, alimentando apenas carga resistiva ou usando um tratamento excessivamente gráfico e superficial para mostrar como os mesmos atuam com outros tipos de carga, principalmente com a carga indutiva, que é usual na indústria. A maioria deles, ao contrário do que fazem importantes livros como MOHAN *et al* (1995) e RASHID (1988), apresenta um conteúdo matemático insuficiente para que os estudantes possam adquirir um entendimento consciente do funcionamento dos conversores para poderem explorá-los adequadamente.

A disciplina teórica de Eletrônica de Potência do curso de Engenharia Elétrica da FEEC/UNICAMP vem sendo desenvolvida com base nesses dois livros, principalmente em RASHID (1995), que é o seu livro texto há mais de cinco anos. Nessa disciplina o estudante recebe um conjunto de assuntos ajustado aos objetivos já mencionados anteriormente, mas também um conteúdo introdutório relacionado às áreas de Qualidade de Energia Elétrica e de Interferência Eletromagnética ligado à presença de harmônicos em quantidade considerável nas correntes elétricas chaveadas resultantes da operação dos conversores eletrônicos de potência.

O uso dos softwares como MATLAB/SIMULINK/SIMPOWERSYSTEMS, PSPICE e outros é bastante incentivado na realização de tarefas fora do tempo de aula pelo fato de exigirem computadores que não existem nas salas de aulas.

3. ESTUDO DE UM PROBLEMA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Considere-se um motor de corrente contínua com as seguintes características nominais: 1 cv, 230 V, 500 rpm, 4,1 A de corrente de armadura e os seguintes parâmetros elétricos: resistência elétrica e indutância do enrolamento de armadura com valores respectivamente de $7,56 \Omega$ e de 55 mH. O motor é alimentado pela armadura por um conversor eletrônico de potência ca-cc, monofásico, totalmente controlado (retificador/inversor de tensão), cujas chaves semicondutoras são tiristores do tipo SCR que são chaveadas uma vez a cada semiperíodo da onda senoidal de tensão de alimentação cujo valor eficaz é de 380 V e a frequência de 60 Hz, conforme mostrado na Figura 1. O motor opera sob corrente de campo constante.

Deseja-se estudar a corrente elétrica de entrada do conversor (corrente na fonte), que é a corrente elétrica que circula pelo sistema de energia elétrica que o alimenta que, não sendo senoidal, apresentará componentes harmônicos prejudiciais ao sistema de energia elétrica e ao próprio sistema em estudo. Para obter a sua expressão analítica é necessário determinar a expressão analítica da corrente elétrica de carga do conversor (corrente de saída), que é a corrente elétrica que circula no enrolamento de armadura do motor.

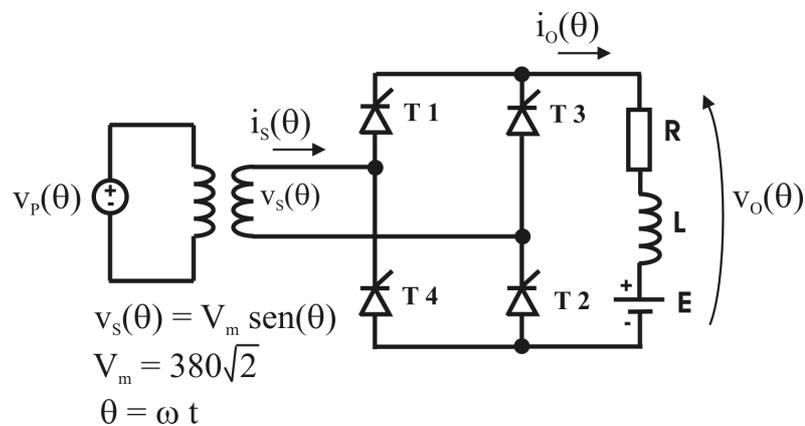


Figura 1: Retificador monofásico alimentando um motor de corrente contínua.

A resolução deste problema começa por uma exposição rápida sobre a operação do referido conversor eletrônico de potência, que já foi discutido em aula anterior, mostrando que os tiristores conduzem aos pares (T_1, T_2) e (T_3, T_4) e comutam naturalmente (devido à carga), ou seja, um par deixa de conduzir quando cessa sua corrente elétrica, para então o outro par iniciar a condução. Conseqüentemente pode-se ter dois tipos de condução da corrente de carga: a condução contínua e a condução descontínua.

A condução contínua ocorre quando a corrente elétrica na carga, $i_o(\theta)$, permanece estritamente positiva durante todo o intervalo de tempo decorrido entre o disparo de (T_1, T_2), num dado ângulo α , e o disparo de (T_3, T_4) que ocorrerá no instante $(\pi + \alpha)$, conforme se vê na Figura 2a, podendo ela, eventualmente, anular-se somente nos instantes α e $(\pi + \alpha)$.

A condução descontínua ocorre quando a corrente elétrica na carga permanece estritamente positiva dentro de um intervalo de tempo (α, β) , com $\beta < (\pi + \alpha)$, anulando-se durante o intervalo de tempo $[\beta, \pi + \alpha]$, como mostra a Figura 3a.

A Figura 2b e a Figura 3b mostram, para os casos de condução contínua e descontínua, respectivamente, a corrente elétrica de entrada (corrente elétrica nos enrolamentos do transformador de entrada e no sistema de energia elétrica) $i_s(\theta)$, que é obtida da corrente de carga simplesmente pela inversão de seu sinal durante a condução das chaves semicondutoras (T_3, T_4).

No caso de condução contínua a tensão alternada da fonte fica aplicada diretamente à carga durante todo o tempo. A equação diferencial (1) pode ser escrita e é válida entre α e $(\pi + \alpha)$ nesse modo de condução.

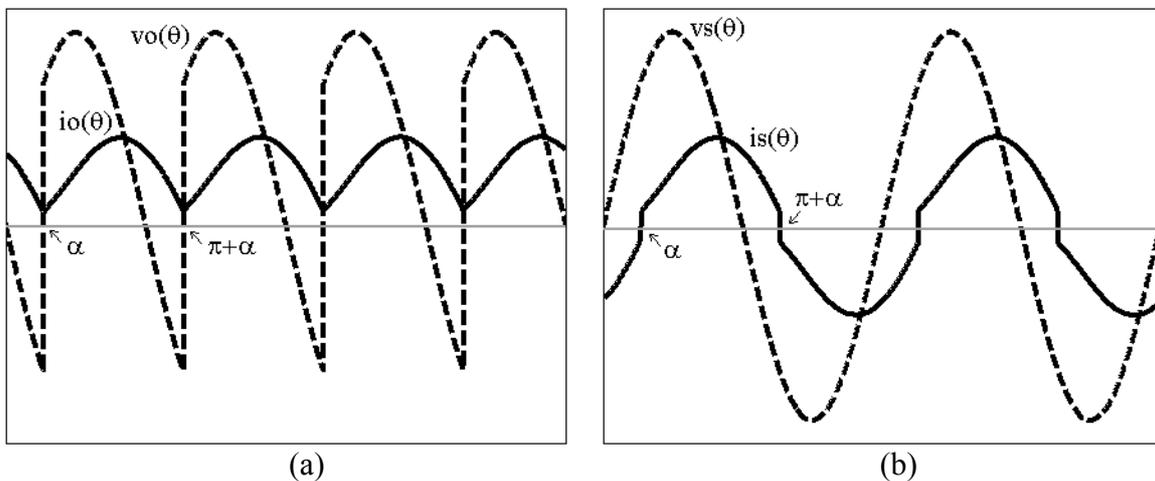


Figura 2: Tensões e correntes na carga (a) e na fonte (b) com condução contínua.

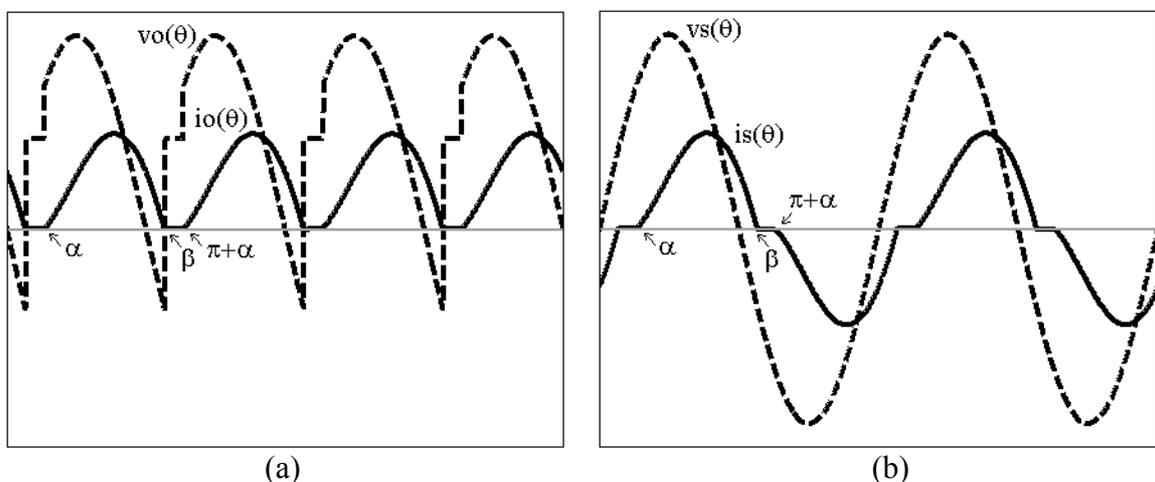


Figura 3: Tensões e correntes na carga (a) e na fonte (b) com condução descontínua.

$$L \cdot \frac{di_o(\theta)}{d\theta} + R \cdot i_o(\theta) = V_m \cdot \text{sen}(\theta) - E \quad (1)$$

A solução da equação diferencial (1), que é a expressão analítica da corrente elétrica na carga, é dada por (2).

$$i_o(\theta) = A \cdot e^{-\theta/\tan\phi} + \frac{V_m}{Z} \cdot \text{sen}(\theta - \phi) - \frac{E}{R} \quad (2)$$

com $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, $\phi = \tan^{-1}(\omega L / R)$ e $E = \bar{V}_o - R \cdot \bar{I}_o$, sendo \bar{V}_o a tensão média na armadura do motor e \bar{I}_o a corrente média.

Nos instantes α e $(\pi + \alpha)$ a corrente elétrica na carga, $i_o(\theta)$, resultante da solução de (1), assume o mesmo valor I . O uso dessa condição e das expressões (3) e (4) permite determinar o valor da constante A que aparece em (2) de modo que a corrente elétrica na carga fica determinada analiticamente em (5), em função apenas dos parâmetros e grandezas conhecidas do problema proposto e do ângulo de disparo dos tiristores α . Esse ângulo é determinado pelo valor médio da tensão na carga, mostrada na Figura 2a, através da equação (6). Usando-se os dados do problema proposto calcula-se o valor do ângulo α (7) e determina-se a expressão final da corrente elétrica na carga, sob condição de condução contínua, mostrada na expressão (8).

$$i_o(\alpha) = I = A \cdot e^{-\alpha/\tan\phi} + \frac{V_m}{Z} \cdot \text{sen}(\alpha - \phi) - \frac{E}{R} \quad (3)$$

$$i_o(\pi + \alpha) = I = A \cdot e^{-(\pi+\alpha)/\tan\phi} + \frac{V_m}{Z} \cdot \text{sen}(\pi + \alpha - \phi) - \frac{E}{R} \quad (4)$$

Igualando-se (3) e (4) obtém-se:

$$A = \frac{2 \cdot V_m \cdot \text{sen}(\alpha - \phi) \cdot e^{\alpha/\tan\phi}}{Z \cdot (e^{-\pi/\tan\phi} - 1)}$$

Dessa forma tem-se:

$$i_o(\theta) = \frac{2 \cdot V_m \cdot \text{sen}(\alpha - \phi)}{Z \cdot (e^{-\pi/\tan\phi} - 1)} \cdot e^{-(\theta-\alpha)/\tan\phi} + \frac{V_m}{Z} \cdot \text{sen}(\theta - \phi) - \frac{E}{R} \quad (5)$$

A tensão média na carga, \bar{V}_o , é dada pela expressão (6).

$$\bar{V}_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \cdot \text{sen}(\theta) \cdot d\theta = \frac{2 \cdot V_m}{\pi} \cdot \cos \alpha \quad (6)$$



Com $\bar{V}_o = 230\text{V}$ (dado do problema) encontra-se o valor de α :

$$\cos \alpha = \frac{\pi \cdot \bar{V}_o}{2 \cdot V_m} = 0,672 \Rightarrow \alpha = 0,834 \text{ rad} \quad (7)$$

Usando-se os valores numéricos dados no problema tem-se ainda: $Z = 22,07 \Omega$, $\phi = 1,221 \text{ rad}$ e $E = 199,004 \text{ V}$. Agora é possível reescrever a equação (5) com valores numéricos:

$$i_o(\theta) = 26,938 \cdot e^{-0,365(\theta-0,834)} + 24,35 \cdot \text{sen}(\theta - 1,221) - 26,323 \quad (8)$$

A expressão (8) é válida no intervalo de tempo $(\alpha, \pi + \alpha) = (0,834; 3,9756)$.

Neste momento o gráfico da corrente elétrica na carga, $i_o(\theta)$, em função do ângulo θ , pode ser obtido usando-se uma calculadora eletrônica científica com capacidade gráfica visual, como mostra a Figura 4. Observa-se nessa figura que a corrente elétrica $i_o(\theta)$, que deveria se apresentar estritamente positiva, porque foi suposto inicialmente que a condução seria contínua, apresenta trechos onde ela é negativa. Isso significa que, com os dados do problema, a hipótese de condução contínua feita inicialmente está equivocada. É necessário então analisar a situação de condução descontínua que deverá ocorrer neste caso proposto.

Os gráficos das Figuras 2 e 3 foram elaborados usando o software Matlab para que se tenha uma visão mais completa das conduções contínua e descontínua. O estudante, durante a aula, vê no visor da calculadora apenas a parte referente ao intervalo de tempo de validade da função da qual ele está obtendo o gráfico, como mostrado na Figura 4. Essa figura foi obtida, para a elaboração deste artigo, usando um simulador em computador da operação de uma calculadora HP. Entretanto o estudante não perde a generalidade porque, olhando para o visor da calculadora, pode manualmente desenhar os pedaços de gráfico como os das Figuras 2 e 3.

Em condução descontínua a corrente elétrica na carga terá valores nulos nos instantes α e β , ambos desconhecidos porque a expressão (6) não vale mais para esse tipo de condução de corrente de carga tendo em vista que a tensão na carga não será mais a tensão da fonte durante o intervalo de tempo $(\alpha, \pi + \alpha)$, conforme mostrado na Figura 3a. Usando-se a condição mostrada em (9) e a solução da equação diferencial do circuito elétrico, mostrada em (2), obtém-se a expressão geral da corrente elétrica da carga no intervalo (α, β) mostrada em (11), já com os valores numéricos do problema substituindo as variáveis e parâmetros.

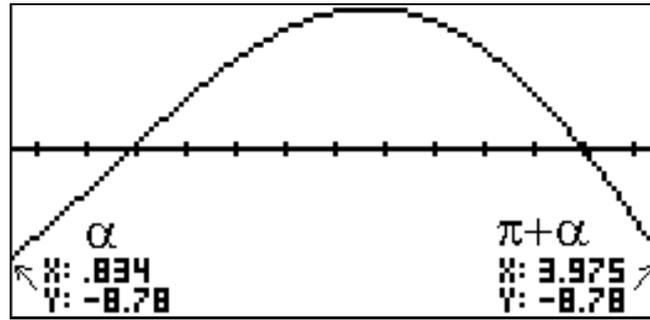


Figura 4: Corrente de carga com hipótese de condução contínua. Gráfico obtido com uma calculadora científica.

$$i_o(\alpha) = 0 = A \cdot e^{-\alpha/\tan\phi} + \frac{V_m}{Z} \cdot \text{sen}(\alpha - \phi) - \frac{E}{R} \quad (9)$$

$$A = \left[-\frac{V_m}{Z} \cdot \text{sen}(\alpha - \phi) + \frac{E}{R} \right] \cdot e^{\alpha/\tan\phi} \quad (10)$$

$$i_o(\theta) = [-24,35 \cdot \text{sen}(\alpha - 1,221) + 26,323] \cdot e^{-0,365(\theta - \alpha)} + 24,35 \cdot \text{sen}(\theta - 1,221) - 26,323 \quad (11)$$

A expressão (11) é válida no intervalo de tempo (α, β) , com α e β desconhecidos. No intervalo de tempo $[\beta, (\pi + \alpha)]$ a corrente elétrica na carga será nula.

Para visualizar essa corrente elétrica através de um gráfico é necessário determinar os valores de α e de β . Para isso pode-se utilizar o seguinte algoritmo: a) estima-se um valor de α inicial (chute inicial), calcula-se a expressão (11) usando esse α ; b) constrói-se, usando a calculadora, o gráfico $[i_o(\theta) \times \theta]$; c) verifica-se no visor da calculadora o valor de β para o qual $i_o(\beta) = 0$; d) calcula-se o valor médio de $i_o(\theta)$, \bar{I}_o , usando-se os valores de α e de β , a expressão (12) e a calculadora eletrônica. Esse valor, para o problema em questão, deve ser de 4,1; e) repete-se o procedimento até a convergência de \bar{I}_o para 4,1.

É preciso observar que esse é um processo rápido porque após duas iterações já se tem uma boa idéia da solução do problema. Os estudantes se empolgam muito com a realização desses cálculos e muitas vezes implementam soluções matemáticas até melhores do que esta aqui apresentada, utilizando-se de outros recursos que cada tipo de calculadora apresenta. Para o caso em análise uma boa aproximação da solução exata pode ser $\alpha = 1,565$ rad, $\beta = 3,556$ rad e $\bar{I}_o = 4,13$ A. A expressão analítica da corrente elétrica na carga pode então ser escrita (13) e seu gráfico, que é o mesmo da Figura 3a, com α e β assumindo os valores acima mencionados, pode ser obtido na calculadora.

$$\bar{I}_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o(\theta) \cdot d\theta = 4,13 \quad (12)$$

com $i_o(\theta)$ dado por (11) com os valor numérico de α substituído tem-se:

$$i_o(\theta) = 18,111 \cdot e^{-0,365(\theta-1,565)} + 24,35 \cdot \text{sen}(\theta-1,221) - 26,323 \quad (13)$$

A expressão (13) vale no intervalo $[\alpha, \beta] = [1,565; 3,556]$.

Neste momento a corrente elétrica na fonte também fica determinada pelas expressões (14) e pela Figura 3b.

$$\begin{aligned} i_s(\theta) &= i_o(\theta) \text{ para } (\alpha \leq \theta \leq \beta) \\ i_s(\theta) &= 0 \text{ para } (\beta \leq \theta \leq \pi + \alpha) \\ i_s(\theta) &= -i_o(\theta - \pi) \text{ para } (\pi + \alpha \leq \theta \leq \pi + \beta) \\ i_s(\theta) &= 0 \text{ para } (\pi + \beta \leq \theta \leq 2\pi + \alpha) \end{aligned} \quad (14)$$

Calcula-se também o valor eficaz da corrente elétrica de entrada $i_s(\theta)$, I_s , bem como o valor eficaz da primeira harmônica dessa corrente, I_{S1} , usando-se as expressões (15) e (16) a (21), como apresentado em RASHID (1988), respectivamente.

$$I_s = \left\{ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o^2(\theta) \cdot d\theta \right\}^{1/2} = 5,722 \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\beta} i_o(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta - \int_{\pi+\alpha}^{\pi+\beta} i_o(\theta - \pi) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \right] = -6,345 \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\beta} i_o(\theta) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta - \int_{\pi+\alpha}^{\pi+\beta} i_o(\theta - \pi) \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \right] = 3,985 \quad (17)$$

$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = 7,493 \quad (18)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}(a_1/b_1) = -1,010 \text{ e } \cos(\phi_1) = 0,532 \quad (19)$$

$$i_{S1}(\theta) = c_1 \cdot \text{sen}(\theta - \phi_1) = 7,493 \cdot \text{sen}(\theta + 1,010) \quad (20)$$

O valor eficaz de i_{S1} é:

$$I_{S1} = c_1 / \sqrt{2} = 5,298 \text{ A} \quad (21)$$

O valor eficaz de $i_o(\theta)$, I_o , é igual ao valor eficaz de $i_s(\theta)$, de modo que a potência ativa consumida pela carga, P_o , pode ser calculada como se vê em (22). A potência ativa na carga



pode também ser calculada por (23). Em (24) observa-se que a potência consumida pela carga é transportada pela primeira harmônica da corrente de entrada, P_{s1} .

$$P_o = E \cdot \bar{I}_o + R \cdot I_o^2 = 1069,47 \text{ W} \quad (22)$$

$$P_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_o(\theta) \cdot i_o(\theta) \cdot d\theta = 1070,70 \text{ W} \quad (23)$$

$$P_{s1} = V_s \cdot I_{s1} \cdot \cos \phi_1 = 1071,04 \text{ W} \quad (24)$$

Os resultados apresentados pelas expressões (22), (23) e (24) foram obtidos com uma calculadora científica capaz de realizar integrais. As pequenas discrepâncias entre os resultados devem-se exclusivamente aos arredondamentos feitos nas casas decimais.

Calcula-se também o fator harmônico (FH) da corrente elétrica de entrada do conversor que é dado pela expressão (25).

$$FH = \left[\left(\frac{I_s}{I_{s1}} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} = 0,408 \quad (25)$$

O fator harmônico ideal deveria ser nulo, considerando-se que se não houvesse harmônicas em $i_s(\theta)$ os valores eficazes I_s e I_{s1} seriam iguais. O professor pode aproveitar a oportunidade desse resultado para introduzir alguns conceitos de qualidade de energia elétrica e de interferência eletromagnética relacionados com conteúdo harmônico da corrente elétrica de entrada, mostrando os prejuízos que as harmônicas de corrente podem causar ao sistema de energia elétrica, em termos de perdas e de desempenho, quando circulam por equipamentos como condutores elétricos, motores elétricos, geradores elétricos, transformadores, capacitores, relés, reatores, lâmpadas, medidores, cargas eletrônicas como computadores de uso pessoal e de sistemas como os de automação e outros. Pode ainda aproveitar a oportunidade para, em algumas aulas subseqüentes, discutir alguns aspectos referentes às normas que tratam de compatibilidade eletromagnética como a CEI 60801 e a CEI 61000, que são normas da IEC (International Electrotechnical Commission), e outras.

A potência aparente na entrada, S_s , pode ser calculada por:

$$S_s = V_s \cdot I_s = 2174,36 \text{ VA} \quad (26)$$

O fator de potência do conjunto conversor e motor é dado por:

$$FP = \frac{P_s}{S_s} = \frac{P_o}{S_s} = 0,492 \quad (27)$$

Isso mostra que o aproveitamento do transformador de entrada, que deverá ter capacidade para 2174,36 VA será utilizado num circuito elétrico cuja potência ativa é sensivelmente mais baixa. Tanto o conteúdo harmônico da corrente de entrada como o baixo aproveitamento do transformador sugerem que o conversor deva apresentar filtragem tanto no



lado da fonte como no lado da carga para que se tenha na entrada uma corrente elétrica o mais senoidal possível e na carga tanto corrente elétrica como tensão o mais constante possível.

Esse assunto pode ser apresentado em aulas subseqüentes para introduzir os conceitos sobre filtragem e os filtros que podem ser usados bem como para discutir outras técnicas de controle do conversor como a modulação em largura de pulso que por si só já realiza uma filtragem ativa tanto na entrada como na saída do conversor eletrônico de potência.

Para todos os conversores apresentados na disciplina propõe-se pelo menos dois problemas para serem resolvidos com a calculadora em sala de aula que abrangem o conhecimento básico fundamental sobre cada um deles. Em geral os recursos da calculadora utilizados são as operações entre funções de uma variável, a integração de funções de uma variável, a solução de equações algébricas de uma variável, as operações normais e os recursos gráficos, todos já existentes em hardware ou em software na calculadora. Entretanto em cada semestre diversos estudantes se destacam elaborando programas capazes de resolverem problemas iterativamente que tornam as soluções procuradas muito rápidas.

4. RESULTADOS

A introdução de problemas resolvidos com o auxílio da calculadora eletrônica científica com capacidade gráfica visual durante as aulas da disciplina de Eletrônica de Potência trouxe grandes benefícios para a disciplina sob vários aspectos que podem ser destacados: a) o interesse do estudante pela disciplina aumentou consideravelmente; b) a sua assiduidade às aulas beira a casa dos 100% atualmente; c) a interatividade entre os estudantes durante as aulas é surpreendente com todos trabalhando no sentido de entender o problema perfeitamente para resolvê-lo computacionalmente usando calculadora da melhor maneira possível; d) mesmo os estudantes mais preguiçosos bem como os menos preparados são puxados pelos outros, dado o interesse que o grupo todo passa a apresentar para resolver os problemas; e) o aprendizado é muito maior e isso pode ser comprovado pelos resultados obtidos pelos estudantes nas diversas provas da disciplina antes e depois da introdução do uso da calculadora eletrônica e pela facilidade que o professor terá para lecionar a disciplina a partir da metade do curso para a frente: em cada aula, após algumas explicações sobre o novo assunto e a colocação do problema, quase que nada mais há para o professor fazer. Os estudantes já fazem tudo porque estão entendendo os assuntos do curso e estão motivados para realizarem os trabalhos. Cabe ao professor apenas orientar e corrigir rumos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É provável que o mesmo comportamento acima relatado ocorreria se houvesse computadores pessoais para todos os estudantes durante a aula, entretanto é interessante ressaltar a especial paixão que os estudantes tem pela sua calculadora. Dada a vontade imensa que eles tem de utilizá-la fica a dúvida se o computador pessoal causaria neles, de fato, o mesmo efeito que a calculadora causa.

O principal efeito do uso da calculadora na aula é que para calcular com a calculadora o estudante precisa utilizar os conhecimentos que ali estão em exposição. Entretanto o mais importante é que o estudante passa a se interessar pelo curso e qualquer ser humano que se interesse por algum assunto é capaz de aprender muito ele.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MOHAN, N.; UNDERLAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics – Converters, Applications, and Design**. EUA: John Wiley & Sons, Inc, 1995.

RASHID, M. **Power Electronics – Circuits, Devices, and Applications**. EUA: Prentice Hall, 1988.

A MOTIVATING CLASS FOR THE POWER QUALITY AND ELETROMAGNETIC COMPACTIBILITY SUBJECTS USING A MODEST TECHNOLOGICAL RESOURCE

Abstract: *Most of the students attending Electrical Engineering courses in Brazil need to work to carry on their courses so that the study out of the classroom could be a tremendous limitation for them. The Faculty needs to improve the teaching time efficiency so as to provide the opportunity of learning the subject of the class during the class time to the students. Many times some calculations and plots are essentials for the complete understanding of the class subject but they are usually left to be done after the class due to the absence of the calculation resources in the classroom, disturbing the student learning during the class time. It is presented in this paper a Power Electronics problem for which the mathematical equations are written and solved aided by a single scientific electronic calculator with visual graphic capacity that nowadays can be considered as a modest computing resource aiming to the complete understanding of the problem solution during the class time avoiding tasks related to the subject basic understanding to be done out of the class time. The scientific electronic calculator with visual graphic capacity can be a very important way to make the student learn more easy when a personal computer is not available in the class room.*

Keywords: *Electrical engineering teaching, Class efficiency, Electronic calculator, Power Electronics.*