

UMA ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR NO ENSINO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Claudionor F. Nascimento¹; Azauri A. O. Júnior²; Alessandro Goedtel³; Ivan N. Silva²; Paulo J. A. Serni¹

¹ UNESP-FEB, Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01
CEP : 17033 360, Bauru, SP
{claudionor_fr, paulojas}@feb.unesp.br

² EESC-USP, Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Trabalhador São-carlense, 400
CEP : 13566 560 , São Carlos, SP
{azaaurijr, insilva}@sel.eesc.usp.br

³ UTFPR-CP, Departamento de Eletrotécnica
Av. Alberto Carazzai, 1640
CEP : 86300 000 , Cornélio Procópio, PR
agoedtel@utfpr.edu.br

Resumo: *O artigo apresenta um estudo teórico e experimental sobre o conteúdo harmônico da corrente de circuitos não-lineares amplamente utilizados no aprendizado de Eletrônica de Potência. A Eletrônica de Potência é uma disciplina que possibilita ao aluno uma visão multidisciplinar e, desta forma, fornece ao mesmo a oportunidade de aplicar grande parte da teoria aprendida durante os primeiros anos do curso de engenharia elétrica. Além disso, nesse trabalho, o aluno pode verificar a correlação entre a matemática (análise de Fourier) e alguns aspectos experimentais dessa disciplina. Para solidificar os conhecimentos propostos e demonstrar a aplicação sugerida são apresentados resultados de simulação e experimentais.*

Palavras-chave: *Eletrônica de potência, Ensino de engenharia, Harmônicos*

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização de equipamentos e dispositivos baseados em conversores estáticos desperta a atenção para a área de engenharia elétrica denominada Eletrônica de Potência. Portanto, no ensino da graduação, a disciplina Eletrônica de Potência desempenha um papel muito importante na formação dos futuros cientistas e engenheiros, pois ela trata de um tema continuamente examinado por vários especialistas com o objetivo de desenvolver um melhor ambiente para o seu aprendizado (CHU et al., 2008; MESE, 2006; RIBEIRO et al., 2002). A disciplina Eletrônica de Potência tem caráter científico-tecnológico, envolvendo um conhecimento multidisciplinar, nas áreas de: controle automático, eletrônica, sistemas de potência, entre outras (OLIVEIRA Jr et al., 2005). Este enfoque dá condições para que o aluno aplique praticamente todos os conhecimentos adquiridos em disciplinas anteriores. Dessa forma, esta visão ampliada e multidisciplinar cria inúmeras possibilidades de

discussões envolvendo os vários assuntos relacionados com a disciplina de Eletrônica de Potência, o que certamente motiva o aluno a participar de forma mais ativa durante as aulas.

O estudo da Eletrônica de Potência possibilita ao aluno um entendimento das características de funcionamento das principais cargas não-lineares, as quais causam problemas significativos de distorção harmônica para o sistema elétrico em ambientes industriais, residenciais e comerciais, o que resulta na piora da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) (NASCIMENTO et al., 2006). A QEE é um tema atual e de relevante importância na formação dos futuros engenheiros.

Vários tipos de cargas apresentam um comportamento teórico bem conhecido, tal como o retificador de onda completa. No entanto, algumas cargas são sujeitas à intervenção humana e podem apresentar incertezas nas suas formas de onda de corrente. Este problema pode causar um aumento no custo computacional quando métodos convencionais são utilizados na compensação sob estas incertezas. Este é o caso do controlador CA, o qual é amplamente utilizado em residências, salas de seminários e prédios comerciais, principalmente no controle de luminosidade e de pequenos ventiladores (NASCIMENTO, 2007).

Neste artigo, é proposto um estudo teórico do conteúdo harmônico de cargas não-lineares comuns ao dia-a-dia dos estudantes, acompanhado de resultados de simulações e ensaios experimentais, possibilitando, portanto, uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos neste problema atual. Essa compreensão pode despertar um maior interesse no assunto e conseqüentemente aumentar a qualidade no ensino e na pesquisa. Dessa forma, este artigo tem como objetivo contribuir para o processo de construção do conhecimento dos alunos do curso de engenharia elétrica.

Para que os estudantes possam por meio de simulações, validar a teoria envolvida nos problemas desta área, é utilizado um software de grande aplicação no ensino de engenharia (Matlab/Simulink), assim como é realizada a montagem de uma bancada experimental acoplada a um sistema de aquisição de dados (LabView), também amplamente utilizado.

Portanto, a organização deste trabalho é a seguinte: Na Seção 2, serão apresentados os conceitos básicos sobre a análise matemática para o tratamento do conteúdo harmônico e os aspectos relacionados à QEE. Na Seção 3, será apresentada a bancada de testes a qual serve a diversos propósitos, tais como educacionais e de pesquisa. Na Seção 4, os princípios do controlador CA serão relatados. Na Seção 5, o retificador de onda completa será estudado. Na Seção 6, o comportamento das duas cargas funcionando juntas será apresentado. Finalmente, as conclusões deste trabalho serão descritas na Seção 7.

2. ANÁLISE MATEMÁTICA

A análise de Fourier tem como objetivo converter uma forma de onda no domínio do tempo em seus componentes no domínio da frequência. A série de Fourier é um caso particular da transformada de Fourier. Geralmente os fundamentos da série de Fourier são apresentados aos alunos de engenharia elétrica nas disciplinas que tratam de circuitos elétricos, isto é, o enfoque é dado na representação do sinal periódico em uma série de Fourier. Por outro lado, a Eletrônica de Potência prioriza a análise de sinais gerados pelo chaveamento dos semicondutores, o qual gera harmônicos de tensão e/ou corrente.

Sendo assim, seja uma função periódica $x(t)$ com período fundamental T_0 (frequência angular $\omega=2\pi f_0$) e representada como uma série de Fourier em:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

Os coeficientes a_n e b_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) desta série podem ser calculados por:

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \cos(2\pi f_0 t) dt \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \sin(2\pi f_0 t) dt \quad (3)$$

Na forma vetorial tem-se:

$$A_n \angle \phi_n = a_n + jb_n \quad (4)$$

onde as amplitudes e ângulos de fase são dados por:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5)$$

$$\phi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (6)$$

Para dados amostrados é utilizada a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform - DFT*), que é uma modificação da transformada de Fourier. A DFT é dada por:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (7)$$

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad (8)$$

As funções no domínio do tempo e frequência são assumidas como funções periódicas com N amostras por período.

Reescrevendo a equação (7) e considerando $W = e^{-j2\pi/N}$, tem-se a matriz:

$$[X(k)] = \frac{1}{N} [W^{kn}] [x(t_n)] \quad (9)$$

O cálculo de N componentes de frequência com base em N amostras, portanto, requer um total de N^2 multiplicações complexas para executar a equação (7). Para grandes valores de N , o tempo computacional para executar N^2 multiplicações complexas da DFT pode se tornar proibitiva. Portanto, é utilizada a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*). A FFT utiliza as similaridades de muitos elementos da matriz $[W^{kn}]$ e produz os mesmos componentes de frequência usando somente multiplicações $(N/2)\log_2 N$ para executar a equação (9) (NASCIMENTO, 2007). Existem cursos que ensinam os conceitos sobre um processador digital de sinais funcionando como um analisador de espectro, conforme proposto por SANSALONI et al. (2007), que possibilita a aplicação dos conceitos sobre a FFT.

3. A BANCADA DE TESTES

Para levantar os dados experimentais é utilizada uma bancada de testes no laboratório. Esta bancada tem como finalidade obter os dados de tensão e corrente de um controlador CA comercial (*dimmer*), alimentando um conjunto de três lâmpadas incandescentes de 100 W

(220 V) cada e de um retificador monofásico em ponte completa com filtro capacitivo de 470 μF e carga resistiva de 730 Ω . Os dados foram coletados pela placa de aquisição NI-DAQ USB 6009 (National Instruments) e o *software* usado é o LabView.

Os sensores Hall da bancada são usados em diversas aplicações industriais. Para a medida de corrente também são usados os *shunts* e os dispositivos baseados na Lei de Faraday-Lenz.

Na primeira alternativa, os *shunts* são elementos resistivos e termicamente estáveis dentro de sua faixa de operação. Entretanto, estes elementos aparecem como uma carga ao circuito e tem perda de calor por efeito Joule, além da inexistência de isolamento galvânico.

Na segunda alternativa, as medidas de corrente pelo princípio da indução eletromagnética têm como seus principais representantes os Transformadores de Corrente (TC) e alicates amperímetros. Nestes equipamentos há a desvantagem de medirem apenas a corrente alternada, pois conforme foi postulado por Faraday-Lenz, a tensão induzida numa bobina de N espiras depende da variação de fluxo por intervalo de tempo. Há somente fluxo eletromagnético alternado se a corrente também for alternada. Justifica-se desta forma o uso dos sensores Hall na medida de corrente neste trabalho. Há também o aspecto de tendência de miniaturização dos componentes conseguido pelos fabricantes de sensores Hall.

Optou-se neste trabalho pelo uso de sensores Hall da marca LEM, os quais já foram usados com sucesso no trabalho de NASCIMENTO (2007) por apresentarem baixo ruído, ampla faixa de resposta em frequência e classe de precisão inferior a 1%.

Usa-se nesta bancada de ensaios o sensor LAH – 25 NP com corrente nominal de 25 A eficaz e classe de precisão de 0,3%. A saída da corrente é de 0-25 mA eficaz. A tecnologia usada neste sensor prevê realimentação do sinal de saída com a entrada através de um amplificador operacional e dois transistores em *push-pull*. A Figura 1 ilustra esta tecnologia.

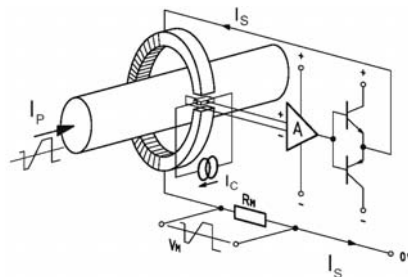


Figura 1 - Sensor Hall de corrente com realimentação do sinal de saída.

Deve-se condicionar a saída do sensor Hall adotado, pois ele tem saída em corrente enquanto a placa de aquisição de dados tem entrada em tensão. Dessa forma, acrescenta-se uma carga resistiva à saída do sensor Hall de forma a ter o sinal de tensão adequado à placa de aquisição. A Figura 2 ilustra esta configuração.

Na Figura 2, I_1 é a corrente primária, I_2 é a corrente secundária (ou de saída) e φ é a relação entre a corrente de primário e secundário.

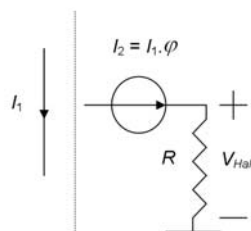


Figura 2 - Transformação de corrente em tensão.

Neste caso φ tem a relação 1/1000, ou seja, para cada Ampere na entrada tem-se 1 mA na saída. O resistor R é escolhido com o valor de 100 Ω conforme faixa sugerida pelo fabricante. Neste valor, tem-se também uma relação de 1/10 entre corrente I_1 e V_{Hall} .

Desta forma, a tensão eficaz de saída é de 2,5 V ou 3,536 Vp (pico). A placa de aquisição escolhida para este trabalho funciona com tensões de +/- 10 Vpp. Opta-se então por inserir um amplificador operacional de ganho dois com conseqüente aumento da resolução do sinal de saída. A Figura 3 ilustra o condicionamento proposto para o sensor Hall de corrente.

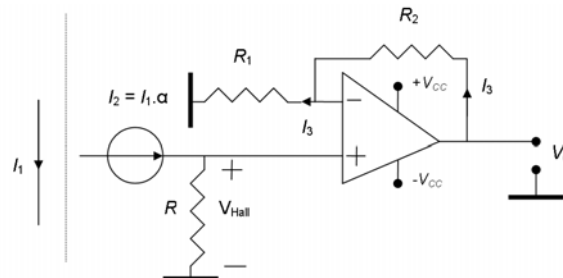


Figura 3 - Condicionamento de sinal do sensor Hall.

Além da medida de corrente há a necessidade de medidas de tensão no circuito em questão. Tais medidas são realizadas com um sensor Hall de tensão que também é produzido pela LEM.

O princípio de funcionamento é o mesmo do Hall de corrente, diferindo apenas que se deve transformar o sinal de tensão em corrente através da adição de um resistor externo R_1 conforme a Figura 4, a qual ilustra o diagrama de conexão elétrica do sensor Hall de tensão. Na Figura 4, o resistor R_M representa a resistência de carga e I_S a fonte de corrente regulada pela variação de tensão dos terminais +HT e -HT.

A taxa de conversão é de 1:2,5; ou seja, para cada miliampere na entrada tem-se 2,5 mA na saída. As características do LV-20P constam do manual do componente. Deve ser observado que a saída tem a mesma escala (0-25 mA) do sensor Hall de corrente. Desta forma, utiliza-se o mesmo esquema de condicionamento de sinal do transdutor de corrente.

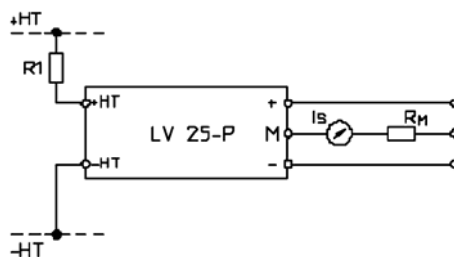


Figura 4 - Diagrama de conexão elétrica.

Neste trabalho, a tensão e corrente monofásica são medidas por tais sensores. A Figura 5 ilustra a aplicação destes sensores no barramento de um quadro de comando.

A bancada de testes da Figura 6 foi escolhida em razão da sua simplicidade na forma construtiva. Ela pode ser reproduzida em outros laboratórios, inclusive com a substituição de seus equipamentos, dispositivos e sensores por outros de menor custo. O circuito montado, apresentado na Figura 6, foi projetado de tal forma que garanta a segurança do aluno durante o levantamento dos dados. As curvas de corrente e tensão obtidas na prática tem como objetivo servir para a comparação com os resultados obtidos na simulação, o que motiva os estudantes a aprenderem ativamente (BELHOT et al., 2001; CHU et al., 2008).

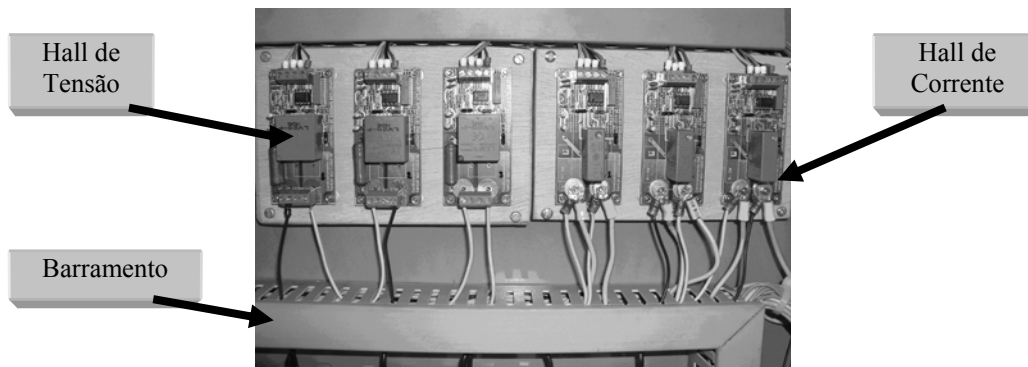


Figura 5 - Diagrama de conexão interna ao quadro de comando.

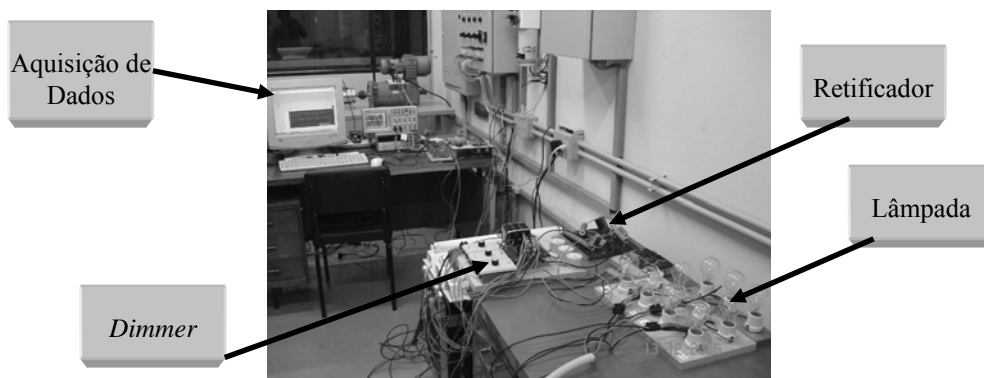


Figura 6 - Bancada de testes.

Para validação dos modelos matemáticos são utilizadas ferramentas computacionais. Assim na simulação e apresentação dos resultados coletados na bancada de ensaios foi usado o programa Matlab/Simulink. É importante salientar que existem softwares similares ao Matlab, os quais são de baixo custo e até gratuitos. Existem duas alternativas: o Scilab e o GNU Octave. Ambos são bem parecidos com o Matlab, estão disponíveis tanto para o sistema Linux como para o Windows e, são programas *open source* de livre distribuição.

4. O CONTROLADOR CA

A análise de um circuito eletrônico passa pelo conhecimento dos componentes semicondutores do mesmo. As disciplinas de eletrônica básica, geralmente, têm como objetivo demonstrar o funcionamento linear dos dispositivos semicondutores e circuitos eletrônicos, se preocupando pouco com as aplicações envolvendo chaves semicondutoras. No entanto, na Eletrônica de Potência, os dispositivos semicondutores utilizam o conceito de chave aberta (corrente igual à zero) e chave fechada (tensão igual à zero) para controlar o fluxo de energia sem perdas.

O controlador CA apresentado na Figura 7 representa uma carga não-linear para a fonte de tensão. É formada por uma chave semicondutora (TRIAC A), uma fonte de tensão senoidal $\{v_s(t)\}$, um circuito de disparo e um conjunto de lâmpadas incandescentes que possuem um comportamento resistivo (carga R_L). As amplitudes e fases dos componentes harmônicos desse sistema variam tanto com o ângulo de disparo do TRIAC quanto com o comportamento da resistência R_L do conjunto de lâmpadas, o qual é variável com a temperatura. A Figura 8 apresenta a forma de onda distorcida de tensão $\{v_L(t)\}$ aplicada à carga R_L do controlador CA, para um ângulo de disparo $\alpha' = 90^\circ$.

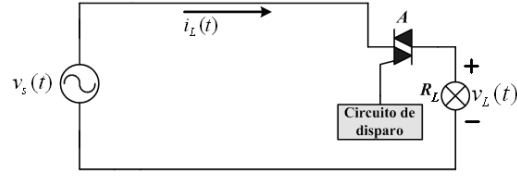


Figura 7 - Sistema com um controlador CA.

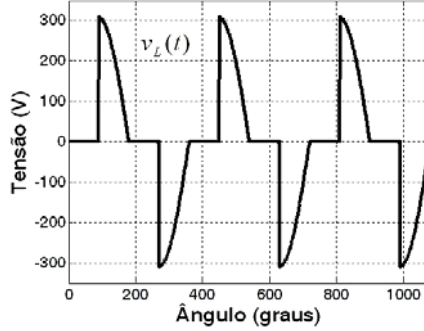


Figura 8 - Forma de onda distorcida da tensão aplicada às lâmpadas.

A série de Fourier da tensão, onde V é a tensão de pico da fonte, calculada até o n -ésimo harmônico (n ímpar), aplicada à carga é descrita como segue:

$$v_L(t) = \frac{V}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} [\cos 2\alpha' - 1] \cos \omega t + \frac{1}{2} [\sin 2\alpha' + 2\pi - 2\alpha'] \sin \omega t + \sum_{n=3}^{\infty} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha' - \cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha' - \cos(n-1)\pi}{n-1} \right] \cos n\omega t + \sum_{n=3}^{\infty} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha'}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha'}{n-1} \right] \sin n\omega t \right\} \quad (10)$$

A representação da corrente de carga $i_L(t)$ é obtida usando a tensão $v_L(t)$ aplicada à resistência R_L , como mostra a equação (11).

$$i_L(t) = \frac{v_L(t)}{R_L} \quad (11)$$

A resistência total das lâmpadas varia com a temperatura e, conseqüentemente, com a tensão RMS (*Root Mean Square*), que por sua vez varia com o ângulo de disparo α' do TRIAC, conforme a equação (12). A Figura 9 apresenta o comportamento da tensão RMS e da resistência das lâmpadas. A tensão RMS pode ser determinada aproximadamente por meio da amplitude da tensão harmônica $\{V_n\}$ na carga, conforme a equação (12).

$$V_{RMS} = V \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\alpha'}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha'}{4\pi}} \cong \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{V_n^2}{2}} \quad (12)$$

A amplitude do n -ésimo componente harmônico de corrente $\{I_n\}$ é dada por:

$$I_n = \frac{V_n}{R_L} \quad (13)$$

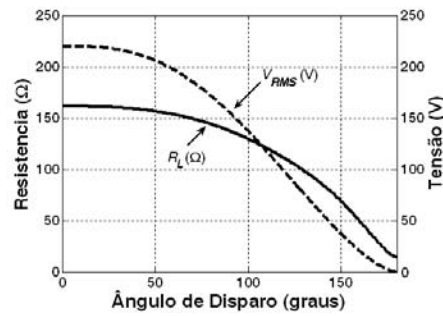


Figura 9 - Variação da tensão RMS e de R_L com o ângulo de disparo.

A variação das amplitudes do componente fundamental e dos cinco primeiros componentes harmônicos da carga do sistema é apresentada na Figura 10. Acima de 150° todas as amplitudes se aproximam do valor do componente fundamental elevando a distorção, mas com menor impacto no sistema devido às suas pequenas amplitudes.

A Figura 11 mostra a corrente e a tensão de alimentação de um controlador CA, levantados de forma experimental. O ângulo de disparo é ajustado para $\alpha = 54^\circ$. Nessa mesma condição de funcionamento foram levantadas por simulação as curvas da Figura 12.

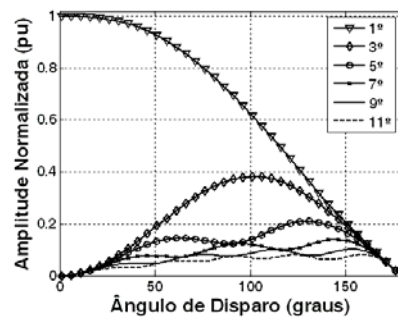


Figura 10 - Variação das amplitudes de corrente.

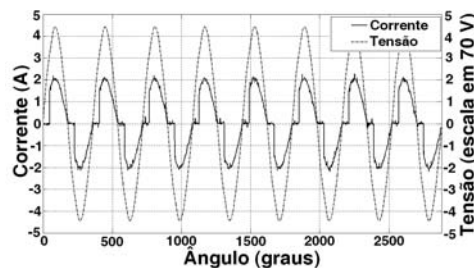


Figura 11 - Tensão da fonte e corrente do controlador (experimental).

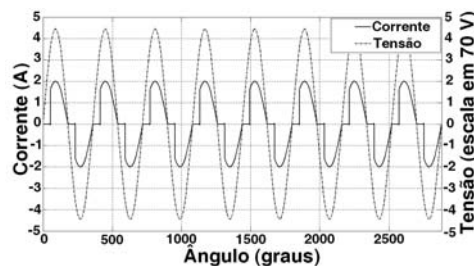


Figura 12 - Tensão da fonte e corrente do controlador (simulação).

Nas Figuras 13 e 14 são apresentados os espectros harmônicos da corrente drenada da fonte com $\alpha' = 54^\circ$, os quais são obtidos por experimento e simulação, respectivamente.

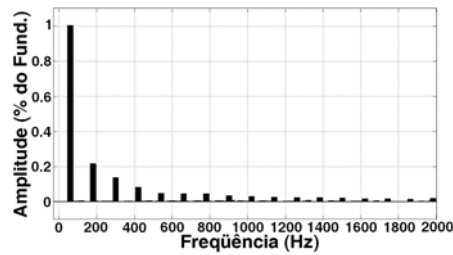


Figura 13 - Conteúdo harmônico do controlador (experimental).

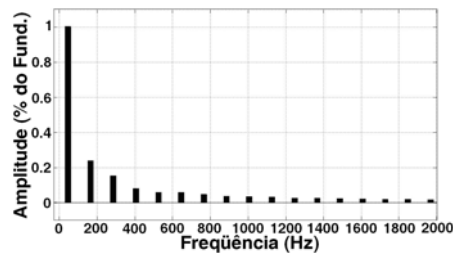


Figura 14 - Conteúdo harmônico do controlador (simulação).

5. O RETIFICADOR MONOFÁSICO

Um retificador de onda completa é definido nas disciplinas básicas de eletrônica do curso de engenharia elétrica. Geralmente, são apresentadas as características de condução dos diodos, mas sem a preocupação com os problemas relacionados com os harmônicos gerados. Nesta seção, o enfoque é na caracterização do retificador como uma fonte de distorção.

O circuito clássico de um retificador monofásico de onda completa é formado por uma ponte de diodos, uma carga resistiva e um filtro capacitivo de alisamento, conforme apresentado na Figura 15. Tal tipo de circuito é muito utilizado em razão da sua simplicidade. No entanto, este retificador drena uma corrente pulsante com alto conteúdo harmônico (NASCIMENTO, 2007). A Figura 16 ilustra o circuito equivalente.

O funcionamento básico de um retificador está ilustrado na Figura 17. A tensão retificada de saída $\{v_D(t)\}$ é praticamente contínua em virtude da presença do capacitor de filtro.

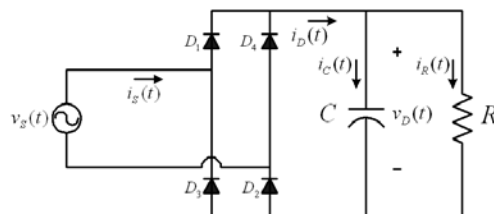


Figura 15 - Circuito do retificador monofásico de onda completa.

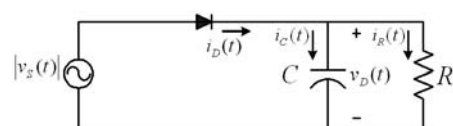


Figura 16 - Circuito equivalente do retificador.

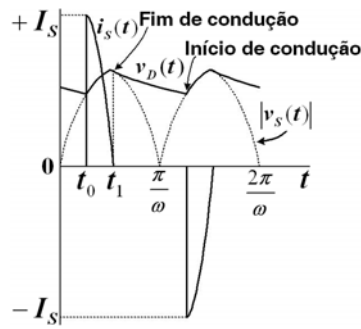


Figura 17 - Corrente da fonte e tensão de saída do retificador.

No retificador ideal, o capacitor carrega-se com a tensão de entrada quando os diodos estão conduzindo, portanto, $v_D = |v_S|$. Quando a tensão $|v_S|$ se tornar menor do que a tensão armazenada no capacitor, em t_1 , os diodos bloqueiam e a corrente de saída é fornecida pelo capacitor que começa a se descarregar, de acordo com a constante de tempo τ ($\tau = RC$), até que a tensão de entrada $|v_S|$ se torne novamente maior, em t_0 , recarregando o capacitor.

Do instante de tempo t_1 , em que os diodos são bloqueados, é obtido o ângulo do fim de condução dos diodos $\beta = \omega t_1$, definido na equação (14). Já do instante t_0 é determinado o início de condução dos diodos $\alpha = \omega t_0$ da equação (15).

$$\beta = \omega t_1 = \arctg(-RC\omega) \quad (14)$$

$$\alpha = \omega t_0 = \arcsen(\sen(\omega t_1) e^{-[(\pi + \omega t_0 - \omega t_1)/(RC\omega)]}) \quad (15)$$

As curvas de α e β são ilustradas na Figura 18. O capacitor é mantido em $1000 \mu\text{F}$ e varia-se o resistor de 100Ω a 1500Ω . Com o aumento da constante de tempo τ há um estreitamento no pulso de corrente drenado pelo retificador e, conseqüentemente, a piora no conteúdo harmônico da corrente drenada, como mostra as Figuras 19 e 20.

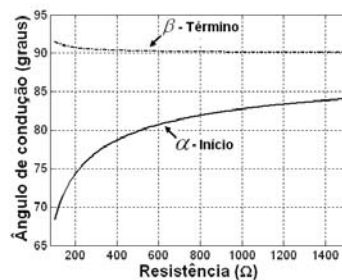


Figura 18 - Variação do início e término de condução dos diodos.

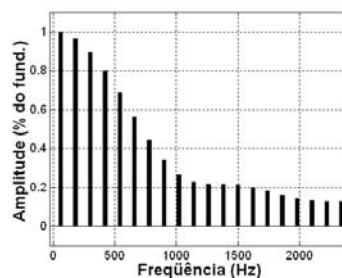


Figura 19 - Conteúdo harmônico da corrente para a constante de tempo τ de baixo valor.

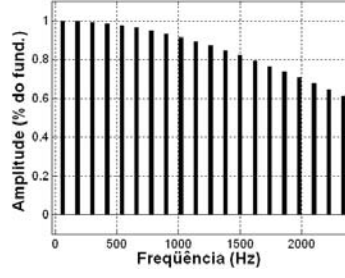


Figura 20 - Conteúdo harmônico da corrente para a constante de tempo τ de alto valor.

Após os cálculos necessários obtêm-se a série de Fourier (n ímpar) da equação (16), considerando o efeito da resistência $\{R_2\}$ presente na saída da fonte do sistema.

$$\begin{aligned}
 i_L(t) = & \frac{2}{\pi} \left\{ \left[\frac{C_2}{k_5^2 + 1} \left[e^{-k_5 \beta} [-k_5 \cos(\beta) - \text{sen}(\beta)] - e^{-k_5 \alpha} [-k_5 \cos(\alpha) - \text{sen}(\alpha)] \right] + \right. \right. \\
 & \frac{k_3}{4} [\cos(2\alpha) - \cos(2\beta)] + \frac{k_4}{4} [\text{sen}(2\beta) - \text{sen}(2\alpha) + 2\beta - 2\alpha] \left. \right] \cos(\omega t) + \\
 & \left[\frac{C_2}{k_5^2 + 1} \left[e^{-k_5 \beta} [-k_5 \text{sen}(\beta) - \cos(\beta)] - e^{-k_5 \alpha} [-k_5 \text{sen}(\alpha) - \cos(\alpha)] \right] + \right. \\
 & \frac{k_4}{4} [\cos(2\alpha) - \cos(2\beta)] + \frac{k_3}{4} [\text{sen}(2\alpha) - \text{sen}(2\beta) + 2\beta - 2\alpha] \left. \right] \text{sen}(\omega t) + \\
 & \sum_{n=3}^{\infty} \left[\frac{C_2}{k_5^2 + n^2} \left[e^{-k_5 \beta} [-k_5 \cos(n\beta) - n \text{sen}(n\beta)] - \right. \right. \\
 & e^{-k_5 \alpha} [-k_5 \cos(n\alpha) - n \text{sen}(n\alpha)] \left. \right] + \\
 & \frac{k_3}{2} \left(\frac{\cos(n+1)\alpha - \cos(n+1)\beta}{(n+1)} + \frac{\cos(n-1)\beta - \cos(n-1)\alpha}{(n-1)} \right) + \\
 & \frac{k_4}{2} \left(\frac{\text{sen}(n+1)\beta - \text{sen}(n+1)\alpha}{(n+1)} + \frac{\text{sen}(n-1)\beta - \text{sen}(n-1)\alpha}{(n-1)} \right) \left. \right] \cos(n\omega t) + \\
 & \sum_{n=3}^{\infty} \left[\frac{C_2}{k_5^2 + n^2} \left[e^{-k_5 \beta} [-k_5 \text{sen}(n\beta) - n \cos(n\beta)] - \right. \right. \\
 & e^{-k_5 \alpha} [-k_5 \text{sen}(n\alpha) - n \cos(n\alpha)] \left. \right] + \\
 & \frac{k_4}{2} \left(\frac{\cos(n+1)\alpha - \cos(n+1)\beta}{(n+1)} + \frac{\cos(n-1)\alpha - \cos(n-1)\beta}{(n-1)} \right) + \\
 & \left. \frac{k_3}{2} \left(\frac{\text{sen}(n+1)\alpha - \text{sen}(n+1)\beta}{(n+1)} + \frac{\text{sen}(n-1)\beta - \text{sen}(n-1)\alpha}{(n-1)} \right) \right] \text{sen}(n\omega t) \left. \right\}
 \end{aligned} \tag{16}$$

onde:

$$C_2 = e^{-k_1 t_0} [k_3 \text{sen}(\omega t_0) + k_4 \cos(\omega t_0)] \tag{17}$$

$$k_1 = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R} \right) \tag{18}$$

$$k_2 = \frac{V}{R_2 C} \tag{19}$$

$$k_3 = \frac{1}{R_2} \left(V - \frac{k_1 k_2}{k_1^2 + \omega^2} \right) \tag{20}$$

$$k_4 = \frac{1}{R_2} \left(\frac{\omega k_2}{k_1^2 + \omega^2} \right) \quad (21)$$

$$k_5 = \left(\frac{k_1}{\omega} \right) \quad (22)$$

Comparando a forma de onda do retificador da Figura 21 com a da Figura 22, verifica-se que o modelo matemático do circuito proposto neste artigo obteve êxito em relação à amplitude do sinal, à forma de onda e aos ângulos α e β .

Na Figura 23 são ilustradas as amplitudes dos componentes da corrente experimental. Elas possuem as mesmas características das amplitudes de simulação mostradas na Figura 24.

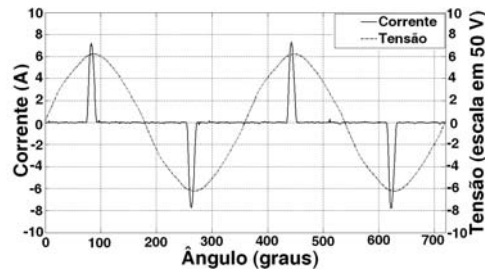


Figura 21 - Tensão e corrente do retificador (experimental).

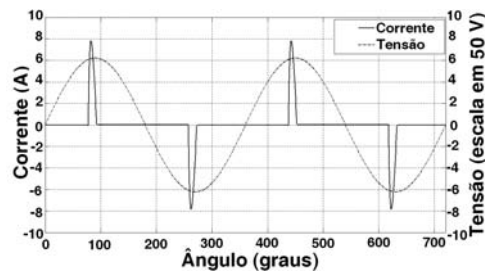


Figura 22 - Tensão e corrente do retificador (simulação).

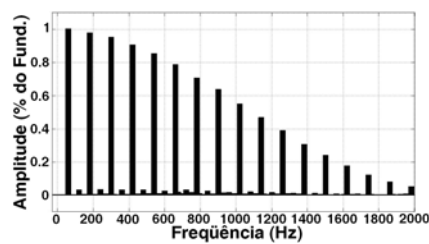


Figura 23 - Conteúdo harmônico do retificador (experimental).

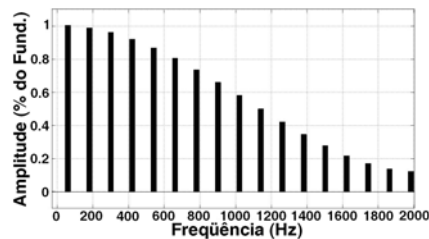


Figura 24 - Conteúdo harmônico do retificador (simulação).

6. A CORRENTE RESULTANTE

Nesta seção as correntes do controlador CA e do retificador são somadas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) do sistema $\{i_s(t) = i_L(t) = i_{L1}(t) + i_{L2}(t)\}$, conforme a Figura 25.

Os resultados desta seção possibilitam ao aluno analisar o problema de QEE no PAC. Assim, após alguns estudos extras, a possível solução para tal problema pode ser alcançada.

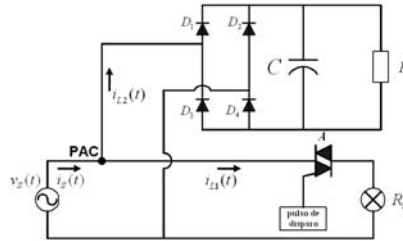


Figura 25 - Sistema com um controlador CA e um retificador conectados ao PAC.

A corrente $i_L(t)$ das cargas e a tensão $v_s(t)$, no PAC, são mostradas na Figura 26.

O comportamento característico do componente fundamental e dos cinco primeiros componentes harmônicos da corrente de carga total no PAC é mostrado na Figura 27.

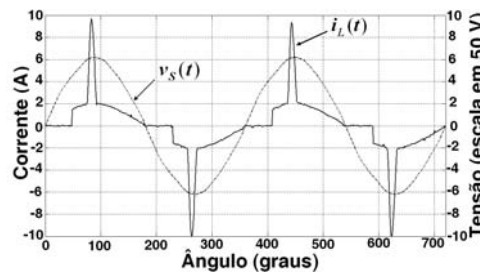


Figura 26 - Corrente de carga $i_L(t)$ no PAC do sistema (experimental).

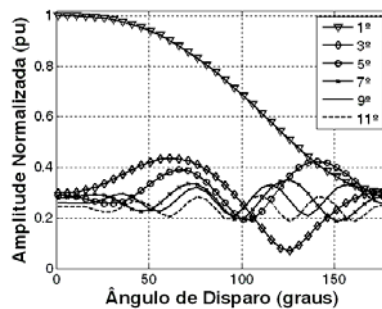


Figura 27 - Variação das amplitudes de corrente no PAC (simulação).

A distorção harmônica é quantificada pelo parâmetro Distorção Harmônica Total (*Total Harmonic Distortion - THD*). A *THD* de corrente pode ser representada pela equação (23).

Para NASCIMENTO (2007), a potência reativa gerada pela carga não-linear causa o Fator de Deslocamento (*FD*) do sistema ($\cos\theta_1$). Já a *THD* é responsável pelo Fator de Distorção (*FDist*). Assim, o fator de potência (*FP*) pode ser calculado com a equação (24).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (23)$$

$$FP = FDist.FD = \frac{1}{\sqrt{1+(THD)^2}} \cos \theta_1 \quad (24)$$

As características da *THD* das cargas estudadas são mostradas na Figura 28. A *THD* do retificador é constante (251%), mas a *THD* do controlador CA varia exponencialmente. A *THD* no PAC sai de 76% e cresce exponencialmente até o ângulo de 78°, chegando a 113%. Após este ângulo, a *THD* cai para 92% no ângulo de 90°, e em seguida o seu valor começa a subir até chegar ao patamar da *THD* do retificador.

A Figura 29 apresenta o *FP* das cargas. O *FP* do retificador é constante (0,3677). Já o *FP* do controlador CA inicialmente tem um valor unitário que diminui com o aumento do ângulo de disparo. A curva do *FP* no PAC apresenta uma variação nos mesmos ângulos de disparo da *THD*, mas se torna constante quando atinge o valor do retificador.

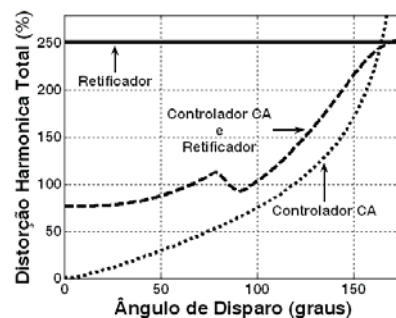


Figura 28 - *THD* das correntes (simulação).

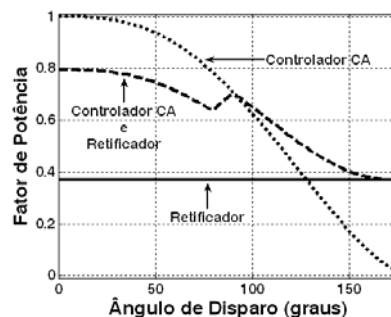


Figura 29 - *FP* das cargas (simulação).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados os conceitos básicos sobre o controlador CA, o retificador e a análise matemática destas cargas encontradas vastamente na indústria, comércio e residências. Na utilização do trinômio cálculo, simulação e experimentação estão contempladas etapas fundamentais no processo de aprendizado, conferindo desta maneira um melhor aproveitamento do ensino da Eletrônica de Potência para os alunos de graduação em engenharia elétrica. Há também aspectos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica cujos efeitos são sentidos em toda a rede de distribuição.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte da CNPq (142128/2005-8 e 142326/2005-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELHOT, R. V.; FIGUEIREDO, R. S.; MALAVÉ, C. O uso da simulação no ensino de engenharia. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 29, 2001, Porto Alegre. **CD-ROM**. Porto Alegre: ABENGE, 2001.
- CHU, R. H.; LU, D. D. –C.; SATHIAKUMAR, S. Project-based lab teaching for power electronics and drives. **IEEE Transactions on Education**. New York, NY, v. 51, n. 1, p. 108-113, 2008.
- MESE, E. Project-oriented adjustable speed motor drive course for undergraduate curricula. **IEEE Transactions on Education**. New York, NY, v. 49, n. 2, p. 236-246, 2006.
- NASCIMENTO, C. F. **Determinação do conteúdo harmônico de corrente baseada em redes neurais artificiais para cargas não-lineares monofásicas**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- NASCIMENTO, C. F.; OLIVEIRA JR, A. A.; GOEDTEL, A.; SILVA, I. N. Compensation current of active power filter generated by artificial neural network approach. In: 32nd ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 32, 2006, Paris. **Anais**. Paris: IEEE IES, 2006, p. 4392-4397.
- OLIVEIRA JR, A. A.; NASCIMENTO, C. F.; CICHY, E. C. C.; MONTEIRO, J. R. B. A.; AGUIAR, M. L. Introducing the learning of active power filters using the software Matlab-Simulink. In: 36th IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE (PESC/PEEW), 36, 2005, Recife. **Anais**. Recife: IEEE PELS, 2005, p. 108-113.
- RIBEIRO, L. R. C.; BELHOT, R. V. A gestão da qualidade e o ensino de engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia - ABENGE**. Brasília DF, v. 21, n. 2, p. 17-25, 2002.
- SANSALONI, T. et al. FFT spectrum analyser project for teaching digital signal processing. **IEEE Transactions on Education**. New York, NY, v. 50, n. 3, p. 229-235, 2007.

A MULTIDISCIPLINARY APPROACH IN POWER ELECTRONIC TEACHING

Abstract: *The article provides a theoretical and experimental study on the current harmonic content of non-linear circuits widely used in Power Electronics learning. The Power Electronics is a discipline based on multidisciplinary vision and, thus, it provides the student an opportunity to apply the theory learned during the first years of the engineering course. Besides, in this work, the student can verify the correlation among the mathematics (Fourier analysis) and some experimental aspects of the discipline. To solidify the proposed knowledge and to demonstrate the suggested application simulation and experimental results are presented.*

Key-words: *Power electronics, Engineering education, Harmonics*