

CONTROLE DE PROCESSOS NO ENSINO DE ELETRÔNICA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Larissa Moura Andrade – lma.encaut@gmail.com

Samuel Fernandes e Silva – samuca.encaut@gmail.com

Marlon José do Carmo – marloncarmo@ieee.org

Ângelo Rocha Oliveira – a.oliveira@ieee.org

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus III

Rua José Peres 558 – Centro

Leopoldina – MG

CEP: 36.7000 - 000

Resumo: O artigo é o resultado de uma experiência, visando uma melhoria no ensino de dispositivos eletrônicos, no curso de Engenharia de Controle e Automação - CEFET-MG campus III, usando o Simulink, uma ferramenta computacional do software MATLAB, utilizada para efetuar modelagens, simulações e análises de sistemas dinâmicos, usando uma interface gráfica, onde o usuário pode construir modelos a partir de diagramas de blocos. Há uma dificuldade de experimentação de circuitos contendo dispositivos semicondutores não controlados e controlados, devido aos altos custos e às dificuldades de montagem. Simulações realizadas num ambiente computacional permitem, a um menor custo, o acesso ao funcionamento sistemático e minucioso dos circuitos de controle na conversão e na transferência de potência elétrica de uma fonte para uma carga, para controlar a variação da tensão de alimentação. A partir de instruções de utilização de ferramentas do Simulink, mostrando passo a passo procedimentos e montagens que visam à aplicação e a análise dos principais conversores, por meio da simulação computacional, o ensino de eletrônica torna-se mais prático e consistente.

Palavras-chave: Simulação computacional, Dispositivos semicondutores, Sistemas dinâmicos.

1 INTRODUÇÃO

As necessidades de controle de potência de cargas industriais e do aprimoramento dos métodos de controle de velocidade de máquinas elétricas vem provocando um maior crescimento nas aplicações da eletrônica de estado sólido, de dispositivos semicondutores em sistemas elétricos de potência. A miniaturização crescente leva-nos a questionar sobre seus limites. Sistemas completos aparecem agora sobre um encapsulamento milhares de vezes menores do que um simples elemento dos circuitos anteriores. As vantagens associadas com os sistemas atuais, quando comparados com circuitos a válvulas dos anos anteriores, são, para a maioria, imediatamente óbvias: menores e leves, nenhuma necessidade de aquecimento ou perda de calor, construção mais robusta e eficiente. A miniaturização dos anos recentes tem resultado em sistemas tão pequenos que o objetivo principal do encapsulamento é fornecer algum meio de manusear o dispositivo e garantir que as conexões mantenham-se adequadamente fixas ao encapsulamento semicondutor. Os limites da miniaturização parecem ser estabelecidos por três fatores: a qualidade do material semicondutor, a técnica de projeto

do circuito e os limites de fabricação e equipamento de processamento (BOYLESTAD & NASHELSKY, 2004). Assim, disciplinas sobre eletrônica tornaram-se comuns nos cursos relativos à área de tecnologia e no ramo da engenharia elétrica. O termo eletrônica de potência vem sendo bastante utilizado desde a década de 60, após a criação do SCR (*silicon controlled rectifier*) pela *General Eletric*. A eletrônica de potência progrediu muito nos últimos anos, com o desenvolvimento dos dispositivos semicondutores de potência que podem chavear altas correntes eficientemente em altas tensões, oferecendo alta confiabilidade. A eletrônica de potência expandiu sua abrangência para diversas aplicações, como controle de iluminação e de aquecimento, fontes reguladas de energia, motores acionadores CC (corrente contínua) ou CA (corrente alternada) de velocidade variável e sistemas de transmissão em alta tensão. Esses dispositivos semicondutores são operados no modo de chaveamento, podendo ser operados em alta frequência, a fim de converter e controlar a energia elétrica com alta eficiência e alta resolução. A perda de potência na chave, em si, é muito pequena, uma vez que, ou a tensão é quase igual a zero quando a chave está ligada, ou a corrente é quase nula quando a chave está desligada (AHMED, 2000).

Para garantir uma operação em níveis elevados de tensão ou corrente e melhorar a confiabilidade da associação série e paralela de alguns tipos de chaves semicondutoras de potência, pode-se recorrer à associação de conversores estáticos ou de células de comutação. Estas opções podem garantir um equilíbrio seguro de potência entre as chaves das estruturas e/ou uma possibilidade de operação multinível. Um conversor estático pode ser definido como um sistema constituído por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores) e elementos ativos (semicondutores de potência) para o controle do fluxo de energia elétrica entre dois ou mais sistemas elétricos (BARBI, 2000).

Devido à sua grande aceitação no meio acadêmico e por conter uma biblioteca desenvolvida especialmente para sistemas de potência (*SymPowerSystems*), o aplicativo *Simulink*, uma extensão do *software* MATLAB, que permite desenvolver e analisar sistemas dinâmicos por meio de diagramas de blocos que representam modelos matemáticos com funções específicas, tornou-se uma ferramenta ideal para o estudo da eletrônica industrial. O *SymPowerSystems* emprega análise por meio de variáveis de estado para modelagem e solução de equações em sistemas elétricos e eletromecânicos, e é formado por um conjunto de bibliotecas contendo diversos componentes de sistemas de potência para serem utilizados no próprio *Simulink*, tais como elementos RLC concentrados, cargas não-lineares, modelos de máquinas elétricas, componentes de eletrônica de potência, fontes controladas, etc. (FREITAS & FRANÇA, 2005).

Este trabalho apresenta um experimento de montagem no *Simulink* com a intenção de melhorar o conhecimento teórico associado ao funcionamento de sistemas eletrônicos que utilizam dispositivos semicondutores, na disciplina obrigatória “Dispositivos Eletrônicos”, do curso de engenharia de Controle e Automação (CEFET-MG/campus III). As instruções aqui apresentadas foram elaboradas com uma grande preocupação didática, detalhadas, visando uma montagem perfeita dos circuitos no *Simulink*. A explanação teórica ou introdução de cada experimento é bastante opulenta, e a montagem dos diagramas de blocos, no *Simulink*, é realizada passo a passo, permitindo ao aluno menor possibilidade de erro no desenvolvimento do experimento. Ao final da montagem, uma análise é feita, para que os alunos possam, a partir da utilização das respostas obtidas na simulação, desenvolverem um raciocínio analítico e crítico.

2 SIMULAÇÃO DE ALGUNS IMPORTANTES CONVERSORES MODELADOS NO SIMULINK

O *Simulink* é usado para simular sistemas usando uma interface gráfica de usuário para você interagir com blocos que representam elementos dinâmicos, com dados de entrada e saída. A simulação envolve a integração numérica dos sinais ao longo do tempo, a qual é executada por um conjunto de equações diferenciais ordinárias (MATSUMOTO, 2002). O *Simulink* possui bibliotecas de blocos a partir das quais podem ser feitas cópias de subsistemas, de fontes (*sources*) e dispositivos de visualização (*sinks*), além de blocos usados para representar sistemas lineares, não lineares e discretos. O *Simulink* também oferece um conjunto de opções de métodos numéricos para resolução de equações diferenciais, cujos parâmetros são configurados na janela *Simulation Parameters*. Para a simulação de diagramas de blocos desenvolvidos no *SymPowerSystems*, o método de integração mais eficiente é baseado no método Range-Kutta, com passo variável (DABNEY & HARMAN, 1998).

Os retificadores monofásicos controlados apresentam grande quantidade de ondulação CA em sua tensão de saída CC e são limitados pela capacidade de potência da fonte monofásica. Quando se exigem altos níveis de potência, os retificadores trifásicos controlados são os preferidos porque fornecem tensão média CC aumentada na saída, bem como uma componente CA reduzida de ondulação, é quando os diodos nos circuitos retificadores trifásicos são substituídos por SCR's (*Silicon Controlled Rectifier*), diodos controlados por pulso. Esses circuitos passam a ser completamente controláveis e a tensão média de saída pode variar com o controle do acionamento das entradas para as portas do SCR, de maneira apropriada.

Para obtenção de corrente contínua em pequena escala, como na alimentação de equipamentos eletrônicos, a conversão se faz por meio dos circuitos retificadores, que em muitos casos começam a substituir os conversores eletromecânicos (motor-gerador) até para elevadas potências, devido ao alto rendimento que apresentam. Existem vários conversores que podem ser simulados no MATLAB, aqui apresentamos um exemplo, para aprendizagem de como simular e modelar esses sistemas. Para cada conversor estático monofásico estudado, existe um valor de tensão média ou um valor de tensão eficaz de saída, conforme mostrado na "Tabela 1".

Tabela 1: Tensão média na carga, em função do tipo de conversor estático monofásico.

Conversor estático	Carga	Tensão média
Retificadores controlados de meia-onda	Resistiva	$V_{Omed} = \frac{V_p}{\sqrt{2\pi}} (1 + \cos\theta)$
Retificadores controlados de meia-onda	Indutiva	$V_{Omed} = \frac{V_p}{2\pi} (\cos\theta - \cos\beta)$
Retificadores controlados de onda completa	Resistiva	$V_{Omed} = \frac{V_p}{\pi} (1 + \cos\theta)$
Retificadores controlados de onda completa	Indutiva	$V_{Omed} = \frac{V_p}{\pi} (\cos\theta - \cos\beta)$
Retificador não controlado de meia onda	Indutiva	$V_{Omed} = \frac{V_p}{2\pi} (1 - \cos\beta)$

V_{Omed} – tensão média na carga ou tensão média de saída.

V_p – tensão de pico ou tensão máxima de entrada.

θ – ângulo de disparo dos tiristores T1 e T2, em radianos ou graus.

β – ângulo de condução, em radianos ou graus.

2.1 Retificador monofásico não-controlados de meia-onda com carga indutiva

Quando o diodo é empregado no processo de retificação com carga indutiva, ligação de uma fonte CA para uma carga CC, convertendo a tensão alternada de uma fonte em tensão contínua, o diodo é denominado retificador. Sua potência e seu valor máximo de corrente são normalmente muito maiores que os diodos empregados em computadores e/ou sistemas de comunicação. A tensão contínua obtida, não é pura, pois contém uma componente alternada denominada ondulação, sobreposta ao nível médio CC. Os vários tipos de retificadores existentes, embora forneçam uma tensão CC, diferem quanto à ondulação na saída, ao nível médio de tensão e à eficiência. As características de controle dos circuitos retificadores podem ser colocadas em três categorias: não controlado, semicontrolado e totalmente controlado. O circuito retificador não controlado contém apenas diodo, fornecendo uma tensão CC com valor fixo para uma carga, em relação à tensão de alimentação. Nos circuitos totalmente controlados, todos os elementos são tiristores (ou transistores de potência), sendo a tensão CC variável na saída. O retificador semicontrolado, no entanto, contém uma unificação de tiristores e diodos que evitam tensões reversas na carga, mas que também permitem o ajuste do nível da tensão CC na carga.

As formas de onda são desenhadas considerando desprezível a queda de tensão no diodo, quando em condução, isto é, o diodo conduz como uma chave fechada quando a tensão no anodo é mais positiva que no catodo, e pára de conduzir quando sua corrente cai à zero, agindo como uma chave aberta. O tempo de entrada em condução e bloqueio do diodo, de apenas uns poucos microssegundos, pode ser considerado instantâneo em relação ao tempo de meio ciclo de uma alimentação de 60 Hz. A “Figura 1” então mostra as formas de onda relativas à carga RL, sendo v a tensão da fonte, v_o e i_o a tensão e a corrente da carga, respectivamente, e v_D a tensão no diodo D.

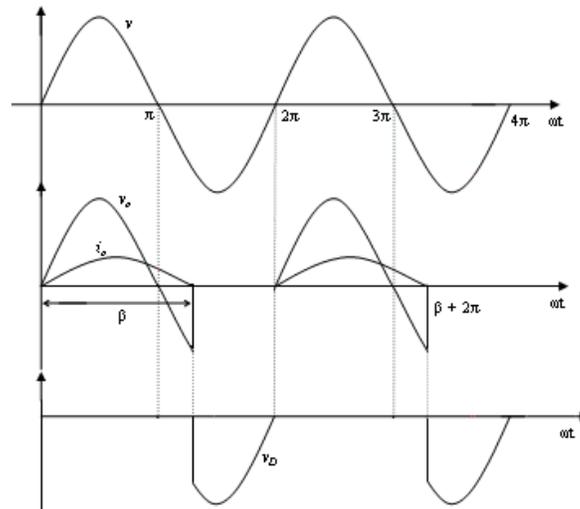


Figura 1 – Formas de onda em um retificador monofásico de meia onda com carga RL.

Aqui intitularemos todos os passos necessários para a montagem para simulação do circuito retificador monofásico não controlado de meia onda com carga indutiva.

Procedimento utilizando a versão MATLAB 10:

- 1) Entrar com o comando *Simulink* no *prompt* do MATLAB.
- 2) Selecionar *New... Model* do *File* menu.
- 3) Na janela inicial do Simulink, chamada *Simulink Library Browser*, abrir a biblioteca *SimPowerSystems*.
- 4) Abrir a biblioteca *Electrical Sources*, arrastar o bloco representativo de uma fonte de tensão senoidal, chamado *AC Voltage Source*. Clicar duas vezes no bloco *AC Voltage Source*, para abrir a janela de parâmetros. Especificar os parâmetros conforme mostra a “Figura 2”.

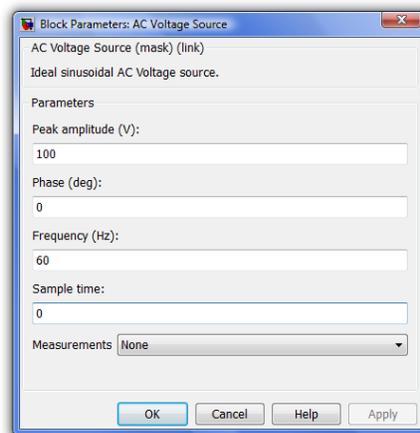


Figura 2 – Janela de parâmetros do bloco *AC Voltage Source*.

- 5) Abrir a biblioteca *Elements*, arrastar o bloco *Series RLC Branch*. Abrir a janela de parâmetros e escrever os novos valores de resistência, indutância e capacitância, conforme a “Figura 3”. A capacitância é excluída quando digitado *inf*, tornando-a infinita fazendo com que a reatância capacitiva gere um circuito aberto.

Conforme demonstrado pela “Figura 3”, na especificação do tipo de componente, *Branch type* em *parameters*, é selecionado o resistor e o indutor separados, para que assim seja possível a ligação dos componentes no circuito.

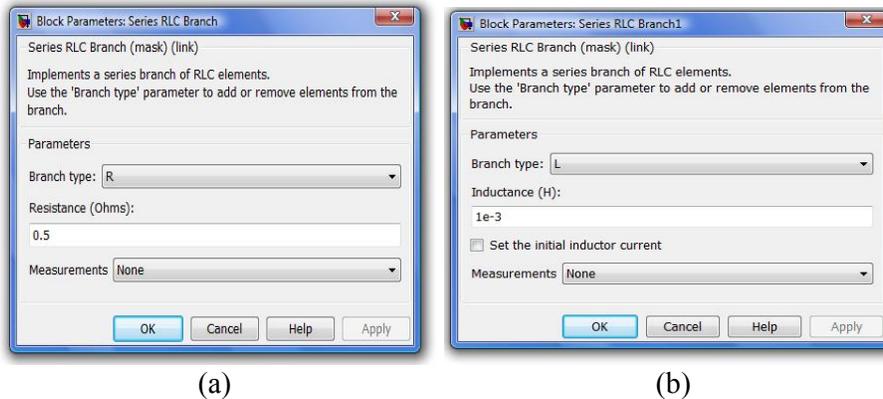


Figura 3 – Janela de parâmetros do bloco *Series RLC Branch*: (a) Resistor (b) Indutor.

- 6) Abrir a biblioteca *Power Electronics*, arrastar dois blocos *Diode*. Abrir a janela de parâmetros e especificar os diodos, de acordo com a “Figura 4”.

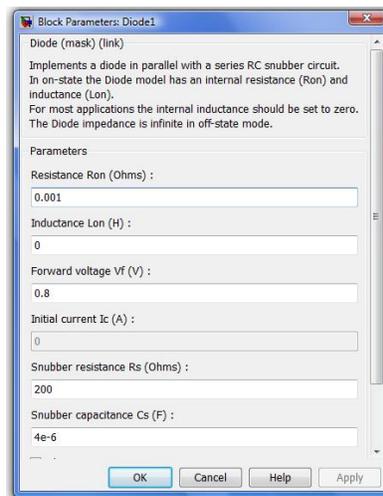


Figura 4 – Janela de parâmetros dos dois blocos *Diode*.

O circuito apresenta duas etapas de funcionamentos diferentes. A primeira etapa ocorre durante o semiciclo positivo da tensão v . O *Diode1* conduz a corrente da carga, e o *Diode2* encontra-se bloqueado, pois se encontra polarizado reversamente. A segunda etapa do funcionamento ocorre durante o semiciclo negativo da tensão v . O *Diode1* encontra-se bloqueado, pois está reversamente polarizado. A corrente de carga i_o circula livremente, por ação da indutância L , pelo diodo de comutação *Diode2* e pela carga RL .

- 7) Continuando na biblioteca *Power Electronics*, arrastar o bloco *Ideal Switch*. Abrir a janela de parâmetros e especificar a chave, conforme a “Figura 5”.
- 8) Na biblioteca *Simulink*, clicar em *Sources*. Arrastar o bloco *Step* e especificá-lo de acordo com a “Figura 6”.

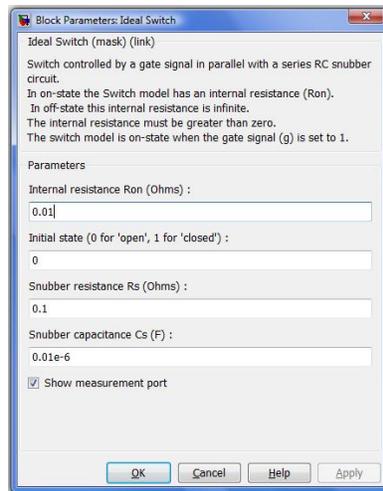


Figura 5 – Janela de parâmetros do bloco *Ideal Switch*.

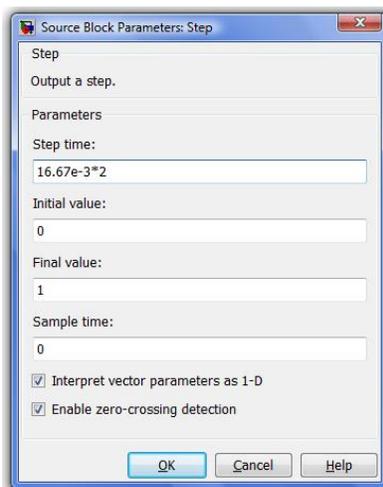


Figura 6 – Janela de parâmetros do bloco *Step*.

- 9) Conectar os blocos *AC Voltage Source*, *RLC Branch*, *Diode1*, *Diode2*, *Ideal Switch*, conforme a “Figura 7”.

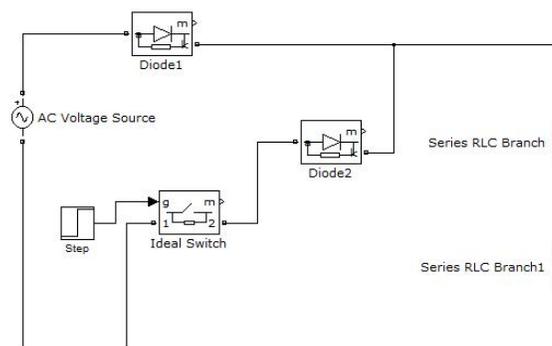


Figura 7 - Retificador monofásico de meia onda, com carga RL e diodo de circulação.

- 10) Abrir a biblioteca *Elements*, arrastar um bloco *Ground*.
- 11) Abrir a biblioteca *SimPowerSystems*, clicar na janela *Measurements*, arrastar quatro blocos *Voltage Measurement* e um bloco *Current Measurement*.
- 12) Na biblioteca *Simulink*, clicar na janela *Sink*, arrastar dois blocos *Scope* e quatro blocos *Display*.
- 13) Na biblioteca *Simulink*, clicar na janela *Commonly Used Blocks* arrastar um bloco *Mux*.
- 14) Abrir a biblioteca *Extra Library*, clicar na janela *Discrete Measurements*. Arrastar um bloco *Discrete RMS Value* e um bloco *Discrete Mean Value*.
- 15) Na biblioteca *SimPowerSystem*, arrastar um bloco *Powergui*.
- 16) Conectar os blocos de medição ao diagrama parcial (“Figura 7”), conforme mostra a “Figura 8”.

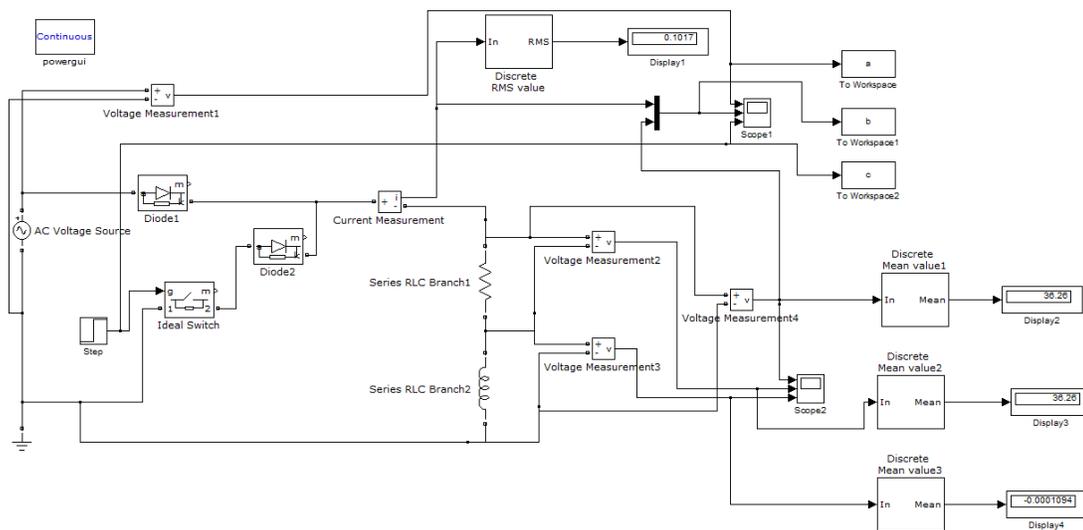


Figura 8 – Diagrama do retificador monofásico de meia onda, com carga RL.

- 17) Clicar em *Simulation* e selecionar *Simulation Parameters*. Especificar a janela de acordo com a “Figura 9”.

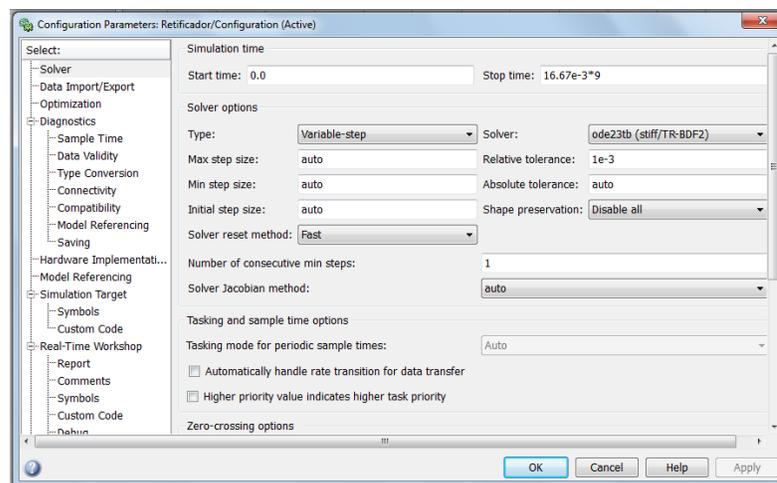


Figura 9 – Janela *Simulation Parameters* para especificação da simulação.

As simulações foram feitas, e como resultado foram geradas as formas de onda apresentadas na “Figura 10”.

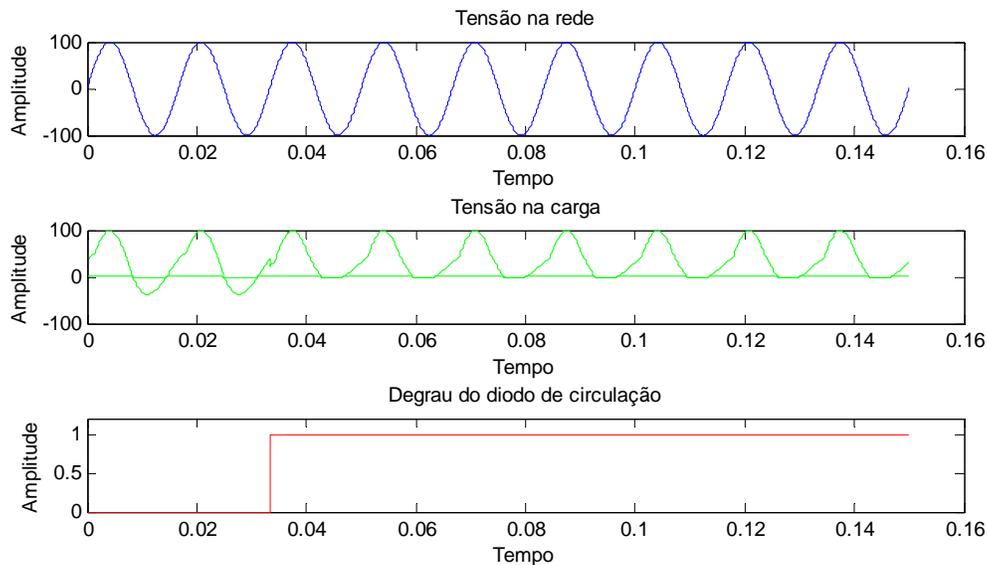


Figura 10 – Formas de onda mostradas pelo bloco *Scope1* (Tensão na rede, tensão na carga e o degrau do diodo de circulação).

Para a especificação inicial preestabelecida, as formas de onda da tensão da fonte ou tensão de entrada (v_i), do sinal de controle *Step* da chave ideal (*Switch Ideal*), da tensão de saída ou tensão na carga (v_o) e da corrente (i_o) da carga, observadas pelo bloco *Scope*, são mostradas na “Figura 10”. Pode ser observado que o sinal entrada, o degrau, nos dois primeiros ciclos da tensão de entrada v_i , possui valor zero. Nesta situação, o bloco *Switch Ideal* está desabilitado, ou seja, a chave está aberta e, portanto, o diodo de comutação (*Diode2*), também está desabilitado. Com o diodo de comutação desabilitado, a tensão na carga v_o assume valores instantâneos negativos (tensão reversa na carga). No entanto, após o segundo ciclo da tensão v_i , o sinal de controle degrau habilita a chave a conduzir e o diodo de comutação passa a atuar no circuito, permitindo que a tensão reversa na carga seja eliminada.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresenta modelagem de conversores estáticos de potência, no ambiente *Simulink/MATLAB*. Considerando a dificuldade de implementação de circuitos contendo dispositivos semicondutores de potência não controlados (diodos) e controlados (tiristores e transistores de potência), devido aos altos custos e às dificuldades de montagem de circuitos eletrônicos de controle, normalmente microprocessados, necessários ao disparo dos dispositivos controlados, experimentos montados em ambiente computacional permitem, a um custo muito baixo, o acesso ao funcionamento minucioso dos circuitos de força e de controle de conversores de potência, sendo possível monitorar correntes e tensões de todos os seus componentes internos. O detalhe do modelo desenvolvido foi apresentado, com o intuito de ajudar pesquisadores, professores e alunos, que atuam na área da eletrônica industrial, a

realizar a montagem de outros conversores de potência de forma crítica e criativa, tendo como base o modelo citado.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao MEC/SESu, FNDE, CAPES, FAPEMIG, Fundação CEFETMINAS e CEFET-MG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, A. Eletrônica de Potência, 1ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

BARBI, I. Eletrônica de Potência. 3ª ed. Florianópolis: Editora do Autor, 2000.

BOYLESTAD, R.L. & NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos, 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

DABNEY, J.B. e HARMAN, T.L. Mastering Simulink 2: Dynamic Simulation for MATLAB. New Jersey, Prentice-Hall, 1998.

MATSUMOTO, E.Y. Simulink 5: Fundamentos. São Paulo: Érica, 2002.

POMÍLIO, J.A. (Outubro/2006). Eletrônica de Potência (Apostila). Disponível em: <www.dsce.fee.unicamp/~antenor/elpot.html> Acesso em: 12 mai. 2011.

PROCESS CONTROL IN THE TEACHING OF ELECTRONICS MODELING

Abstract: *The article is the result of an experiment aimed at improving the teaching of electronic devices in the course of Control Engineering and Automation - CEFET MG-III campus, using Simulink, a software tool MATLAB software, used to perform modeling, simulations and analysis of dynamic systems using a graphical interface where the user can build models from block diagrams. There is a difficulty in testing of circuits containing semiconductor devices uncontrolled and controlled, due to high costs and difficulties of assembly. Simulations allow a computing environment, at a lower cost, access to systematic and thorough operation of control circuits in the conversion and transfer of electrical power from a source to a load, to control the variation in supply voltage. The instructions for use from the Simulink tool, showing step by step procedures and assemblies aimed at application and analysis of the main converters, by means of computer simulation, the teaching of electronics becomes more practical and consistent.*

Keywords: *Simulink, Semiconductor devices, dynamical systems.*