

## UTILIZAÇÃO DO SIMULINK/MATLAB NO ENSINO EXPERIMENTAL DE ELETRÔNICA INDUSTRIAL

C.M.C. Brito

Núcleo de Pesquisa em Eletromecânica e Qualidade de Energia – CEFET-PI/UNED-Floriano  
Rua Francisco Urquiza Machado, 462 Meladão CEP 64.800-000 Florianópolis-PI  
E-mail: marzo\_claudio@hotmail.com

### RESUMO

O artigo é o resultado de uma experiência pioneira na Unidade de Ensino Descentralizada de Florianópolis: a utilização de uma ferramenta computacional para ensino experimental de eletrônica industrial, no Curso Técnico em Eletromecânica. O Simulink é um aplicativo de interface gráfica do programa MATLAB que permite desenvolver e analisar sistemas dinâmicos por meio de diagramas de blocos que representam modelos matemáticos com funções específicas. A dificuldade de implementação de circuitos contendo dispositivos semicondutores de potência não-controlados (diodos) e controlados (tiristores e transistores de potência) é frequente em cursos de eletrônica industrial, devido aos altos custos e às dificuldades de montagem de circuitos eletrônicos de controle, normalmente microprocessados, para a geração de pulsos de gatilho, necessários ao disparo dos dispositivos controlados. Muitos conversores, frequentemente utilizados na indústria para o controle de máquinas elétricas, tais como inversores de frequência e chaves de partida estática *soft-starter*, têm um alto custo e não proporcionam, por causa das limitações existentes de acesso aos componentes constituintes do equipamento, uma verificação aprofundada do seu princípio de funcionamento. 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. As máquinas elétricas, representadas por blocos no Simulink, são facilmente especificadas, monitoradas e conectadas a conversores modelados. A partir de um Guia Básico do Simulink e Guias de Experimentos Didáticos, elaborados para a realização de experiências utilizando a simulação computacional, os quais mostram, passo a passo, procedimentos de montagens que visam a aplicação dos principais dispositivos semicondutores de potência, os alunos podem realizar a montagem dos experimentos e a análise de respostas, por meio de um questionário referente a cada atividade experimental.

**PALAVRAS-CHAVE:** eletrônica industrial; simulação dinâmica; Simulink.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de controle ou modulação de potência de cargas industriais e do aprimoramento dos métodos de controle de velocidade de máquinas elétricas vem provocando uma maior aplicação de dispositivos semicondutores em sistemas elétricos de potência, desde os anos 1960. Os dispositivos semicondutores de potência, como diodo, tiristor, triac e transistor de potência, são usados em aplicações industriais como dispositivos de chaveamento. Uma vez que as fontes de alimentação são tipicamente de valor constante, sejam elas CA ou CC, caso seja preciso variar a tensão aplicada sobre uma carga, é necessário o emprego de algum dispositivo que seja capaz de controlar a quantidade de energia transferida. A maneira mais simples e eficiente de controlar elevados valores de potência é por meio de chaves. Obviamente que o chaveamento implica sinais de tensão descontínuos sobre uma determinada carga. No entanto, devido à presença de armazenadores de energia em quase todas as aplicações, a própria carga atua como filtro, extraindo o valor médio da tensão da tensão instantânea aplicada sobre ela. Como uma chave ideal apresenta apenas os estados de condução (quando a tensão sobre ela é nula) e de bloqueio (quando a corrente por ela é nula), não existe dissipação de potência na chave, garantindo a eficiência energética do arranjo (Pomílio, 2006). A possibilidade de regulação de tensão por meio de chaveamento, sem dissipação de potência considerável, permite a substituição de atuadores lineares (reostatos) por conversores estáticos de potência controlados. Os atuadores lineares, colocados em série com a fonte e a carga, provocam uma queda de tensão proporcional à sua impedância, nos terminais da carga, com o inconveniente da dissipação de energia na resistência série. Já 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). Algumas aplicações de conversores estáticos podem ser citadas: fontes chaveadas, controle de motores de corrente contínua, controle de motores de corrente alternada, alimentação de emergência (*no-breaks*), carregadores de bateria, filtros ativos de potência, compensadores estáticos de potência reativa, etc.

A partir dos anos 1970, com o intuito de elevar a produtividade, reduzindo as perdas de energia envolvidas em um processo de produção de bens, os acionamentos de máquinas, até então baseados em princípios eletromecânicos, começaram a ser substituídos por dispositivos baseados na eletrônica de potência ou eletrônica industrial, os quais permitem a regulação de velocidade e de conjugado de uma máquina com uma considerável economia de energia (Brito, 2005). Na década de 1990, por exemplo, o uso de acionamento eletrônico em motores de indução representava cerca de 10 a 20% dos acionamentos utilizados, devendo crescer entre 50 e 60% no ano de 2010 (Sarmiento e Estrada, 1996). A grande maioria dos acionamentos é feita por meio da utilização de conversores abaixadores de tensão, ou seja, aqueles nos quais a tensão média aplicada à carga é menor do que a tensão aplicada ao conversor. Diferentemente do que ocorre com as fontes chaveadas, não existe a preocupação da filtragem da tensão antes de aplicá-la à carga; no entanto a corrente é filtrada pela indutância da carga. Quando se trata de realizar um acionamento controlado, os conversores e sistemas de controle, para uma máquina CA, são mais sofisticados e complexos do que aqueles utilizados para uma máquina CC. Por isso, a decisão de utilizar ou não um acionamento eletrônico deve envolver o custo global, e não somente o custo da máquina. Entretanto, o custo de conversores e circuitos eletrônicos de controle vem diminuindo ao longo dos anos.

Muitos conversores, utilizados na indústria para o controle de máquinas elétricas, tais como inversores de frequência e chaves de partida estática *soft-starter*, têm um alto custo e não proporcionam, por causa das limitações existentes de acesso aos componentes constituintes do equipamento, uma verificação aprofundada do seu princípio de funcionamento. 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. Devido à sua grande aceitação no meio acadêmico e à presença de uma biblioteca desenvolvida especialmente para sistemas de potência (*SymPowerSystems*), o aplicativo Simulink, uma extensão do programa MATLAB, que permite desenvolver e analisar sistemas dinâmicos por meio de diagramas de blocos que representam modelos matemáticos com funções específicas, é uma ferramenta poderosa para o estudo da eletrônica industrial. Um sistema dinâmico é aquele cuja saída muda ao longo do tempo. 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 ser utilizado no próprio Simulink ou em interação com algum sinal gerado por um programa elaborado no MATLAB (arquivos .m). O conjunto de bibliotecas do *SimPowerSystems* é bastante completo, fornecendo modelos de diversos componentes de rede, tais como elementos RLC concentrados, cargas não-lineares, diversos modelos de máquinas elétricas, componentes de eletrônica de potência, fontes controladas, etc. (Freitas e França, 2005).

Este artigo apresenta experimentos montados no Simulink com o intuito de aprofundar o conhecimento teórico associado ao funcionamento de conversores que utilizam dispositivos semicondutores de potência, na disciplina Eletrônica Industrial, da Unidade de Ensino Descentralizada de Florianópolis (CEFET-PI/UNED-Florianópolis). Os Guias de Experimento foram elaborados com uma elevada preocupação didática, e vêm acompanhados de um outro guia, mais abrangente, para utilização do aplicativo, intitulado Guia Básico do Simulink. A explanação teórica ou introdução de cada experimento é bastante rica, e a montagem dos diagramas de bloco, no Simulink, é realizada passo a passo, permitindo ao aluno uma menor possibilidade de erro no desenvolvimento do experimento. Ao final de cada montagem, algumas questões são abordadas, para que o aluno possa, a partir da utilização das respostas obtidas na simulação, desenvolver um raciocínio analítico e crítico.

## 2. FUNCIONAMENTO DOS CONVERSORES ESTÁTICOS MODELADOS

Os Guias de Experimento do Laboratório de Eletrônica Industrial do Curso Técnico em Eletromecânica da UNED-Florianópolis/CEFET-PI estão sendo elaborados com os seguintes objetivos básicos: a) verificar como ocorre o disparo dos dispositivos semicondutores de potência; b) analisar as formas de onda de tensão e de corrente na carga controlada; c) estudar os conversores de potência convencionais (retificadores não-controlados e controlados); d) aplicar os conversores de potência no acionamento em velocidade variável de máquinas elétricas CC e CA. Os principais conversores apresentados neste artigo são os seguintes: 1) Retificador de meia onda controlado, com carga resistiva; 2) Chave estática CA; 3) Retificador monofásico de onda completa controlado e semicontrolado; 4) Acionamento em velocidade variável de um motor CC.

O retificador é um circuito que faz a ligação de uma fonte CA para uma carga CC, ou seja, converte a tensão alternada de uma fonte em tensão contínua. A tensão contínua, assim obtida, não é pura, como a de uma bateria, pois contém uma componente alternada chamada ondulação ou *ripple*, sobreposta ao nível médio CC. Os vários retificadores existentes, embora forneçam uma tensão CC, diferem quanto ao *ripple* 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 fixa 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 contém uma mistura de tiristores e diodo que evita tensões reversas na carga, mas que também permite o ajuste do nível da tensão CC na carga.

### 2.1. Retificador de Meia Onda Controlado, com Carga Resistiva

O tiristor SCR (*silicon controlled rectifier* – retificador controlado de silício) é um dispositivo de três terminais, chamados anodo (A), catodo (K) e gatilho (G). O SCR é um diodo, mas controlado. Para um tiristor iniciar sua condução, duas condições devem ser satisfeitas: 1) o anodo deve ser positivo em relação ao catodo; 2) uma corrente, na ordem de 50 mA, deve fluir pelo terminal de gatilho por pelo menos uns poucos microssegundos. Após iniciada a condução, o gatilho perde sua função. A condução somente será interrompida (tiristor bloqueado) quando a corrente de anodo atingir o valor zero, no caso ideal, ou ficar abaixo de um valor chamado corrente de manutenção, no caso real. A corrente de manutenção é, em geral, menor que 1% da corrente nominal do tiristor. Um circuito retificador de meia onda controlado a tiristor SCR (T), com carga resistiva (R), é mostrado na Figura 1.

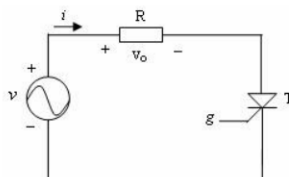


Figura 1 – Retificador de meia onda controlado, com carga resistiva.

O tiristor está diretamente polarizado em todos os semiciclos positivos da tensão senoidal de alimentação  $v$ . Um pulso é aplicado ao gatilho  $g$  no ângulo  $\theta$ , conforme mostra a Figura 2. Este ângulo é conhecido como *ângulo de disparo* do tiristor. A corrente no tiristor se torna zero em  $\omega t = \pi, 3\pi, \dots$ , e o tiristor conduz de  $\theta$  a  $\pi$ , de  $(\theta + 2\pi)$  a  $3\pi$ , etc. Durante o intervalo em que o tiristor conduz, conhecido por intervalo de condução, a tensão na carga resistiva é igual à tensão da fonte,  $v_o = v$ .

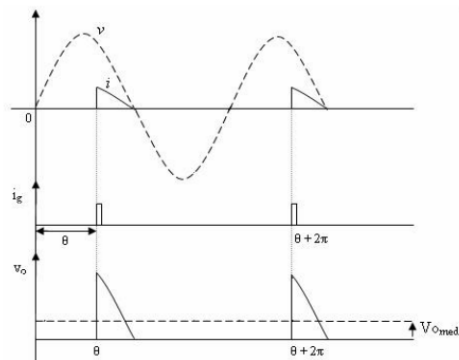


Figura 2 – Formas de onda do circuito retificador controlado.

O ângulo de gatilho pode ser modificado de zero a  $\pi$ . Pode ser observado que, para  $\theta = 0^\circ$ , a tensão média atinge seu valor máximo, e que é o mesmo valor obtido em um circuito retificador de meia onda não controlado (a diodo). Logo, se o tiristor for disparado em  $\theta = 0^\circ$ , ele se comporta como um diodo, desde que a tensão entre anodo e catodo seja positiva.

## 2.2. Chave Estática CA

Uma chave estática CA é composta de dois tiristores ( $T_1$  e  $T_2$ ) conectados em antiparalelo, conforme mostra a Figura 3, de tal forma que a corrente possa fluir em ambas as direções.

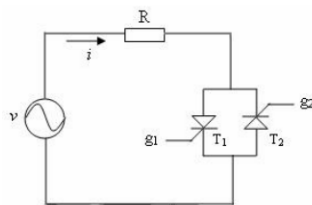


Figura 3 – Chave estática CA.

A corrente que circula pela carga resistiva  $R$  pode ser controlada pela variação do ângulo de fase dos gatilhos  $g_1$  e  $g_2$ . Se os pulsos dos gatilhos estiverem sincronizados com a frequência da rede, uma corrente CA maior ou menor circulará pela carga e, conseqüentemente, um controle de tensão será realizado sobre o resistor  $R$ . A Figura 4 mostra como fica a forma de onda da corrente no resistor  $R$  após o disparo dos tiristores. Pode ser observado que os ângulos de disparo dos tiristores estão defasados de  $180^\circ$ . Se os disparos dos gatilhos  $g_1$  e  $g_2$  ocorrem nos ângulos  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , respectivamente, a chave estática ficará na posição *fechada*. Por outro lado, se nenhum dos gatilhos é disparado, então a chave estará na posição *aberta*.

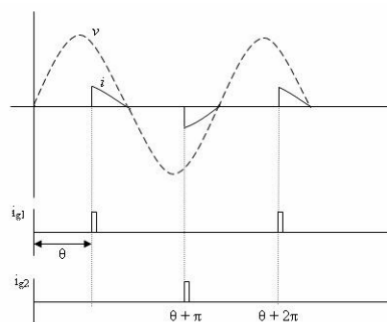


Figura 4 – Formas de onda da tensão de alimentação  $v$ , corrente na carga resistiva  $i$  e as correntes de gatilho  $i_{g1}$  e  $i_{g2}$  da chave estática CA.

### 2.3. Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado e Semicontrolado

No retificador monofásico de onda completa totalmente controlado, mostrado na Figura 5, a condução não ocorre até que os tiristores sejam disparados e, para haver circulação de corrente, os tiristores  $T_1$  e  $T_2$  têm de ser disparados simultaneamente, pelo mesmo gatilho  $g_1$ , no semiciclo positivo; da mesma forma, os tiristores  $T_3$  e  $T_4$  são disparados simultaneamente, no semiciclo negativo, pelo mesmo gatilho  $g_2$ , defasado  $180^\circ$  de  $g_1$ . A Figura 6a apresenta as formas de onda do retificador, com carga resistiva. Pode ser observado que os gatilhos dos tiristores  $T_1$  e  $T_2$  ( $g_1$  e  $g_2$ , respectivamente) são os mesmos; da mesma forma, os gatilhos dos tiristores  $T_3$  e  $T_4$  ( $g_3$  e  $g_4$ , respectivamente) também são iguais. Para cargas fracamente indutivas, com baixos valores de reatância indutiva, em relação à resistência, as formas de onda da tensão e da corrente na carga têm o formato mostrado na Figura 6b. Para cargas altamente indutivas, com elevados valores de reatância indutiva, em relação à resistência, a corrente  $i_o$  se torna uma curva com valor praticamente constante. Para motores CC, os quais são cargas muito indutivas, o controle da tensão de armadura é praticamente realizado com uma corrente  $i_o$  constante. Para cargas indutivas, uma tensão reversa aparecerá nos terminais da carga. A eliminação da tensão reversa na carga é feita por meio de um diodo roda-livre, colocado em paralelo com a carga.

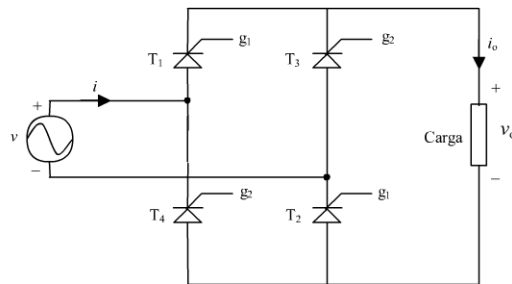


Figura 5 – Retificador monofásico de onda completa totalmente controlado.

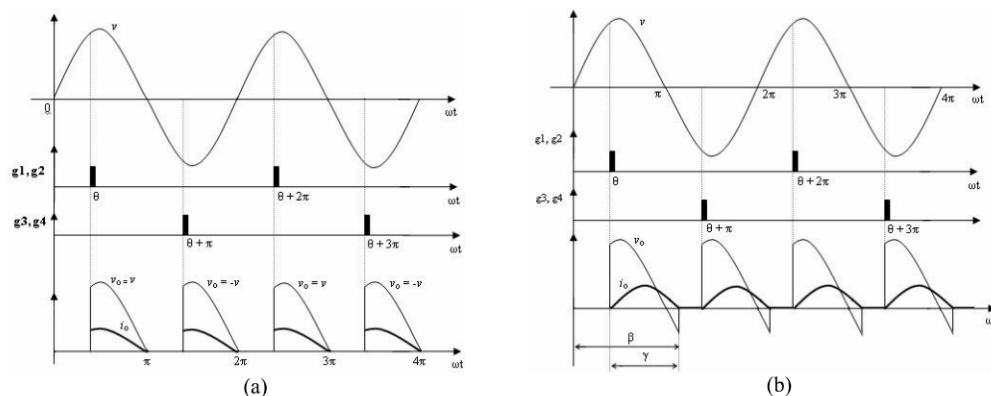


Figura 6 – Formas de onda de retificador monofásico de onda completa controlado a tiristor para carga resistiva e carga indutiva  
(b). Legenda:  $\theta$  – ângulo de disparo dos tiristores  $T_1$  e  $T_2$ ;  $\beta$  – ângulo de extinção dos tiristores;  $\gamma$  – ângulo de condução.

É possível controlar a tensão média CC na carga usando apenas dois tiristores ( $T_1$  e  $T_2$ ) e dois diodos ( $D_1$  e  $D_2$ ). Os tiristores  $T_2$  e  $T_4$ , na Figura 5, são substituídos pelos dois diodos. Praticamente não há diferença entre as formas de onda observadas em um retificador totalmente controlado com diodo-roda-livre e o retificador semicontrolado. O mais importante a observar é que a tensão na carga nunca fica negativa, independentemente do tipo de carga.

### 2.4. Acionamento em Velocidade Variável de um Motor CC

A velocidade de um motor CC pode ser controlada ajustando-se a corrente de campo, a tensão nos terminais da armadura ou a resistência do circuito de armadura. As configurações mais utilizadas para o acionamento em velocidade variável de um motor CC são mostradas na Figura 7 (Lander, 1996).

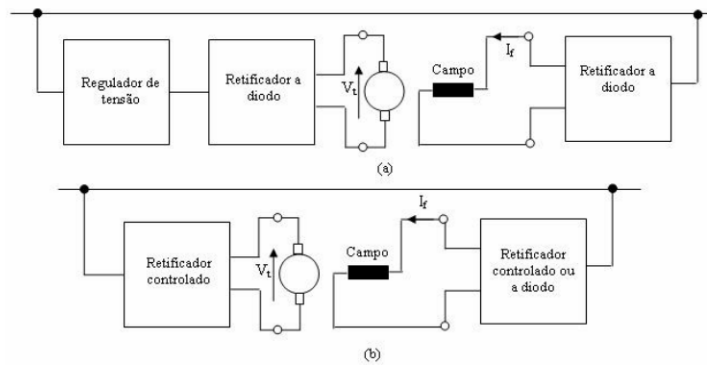


Figura 7 – Acionamentos básicos de velocidade variável de um motor CC. (a) Ajuste da tensão por meio do regulador para o retificador a diodos; (b) Ajuste da tensão por meio do retificador controlado.

Na Figura 7a, um retificador a diodos é utilizado em conjunto com um regulador de tensão. O regulador de tensão pode ser um transformador de relação variável ou um divisor de tensão resistivo (reostato). O controle do regulador de tensão controla a tensão de armadura e, portanto, a velocidade. Em geral, o campo é alimentado com sua tensão nominal, por meio de um retificador a diodos, de tal maneira que o fluxo no campo seja mantido constante. O arranjo mostrado na Figura 7b, em que um retificador controlado é utilizado para alimentar a armadura do motor, é o mais usual. Qualquer configuração de retificadores pode ser utilizada. A velocidade do motor é determinada por meio de sua tensão média de armadura, logo é dependente do ângulo de disparo do retificador. Se necessário, o enrolamento de campo pode ser alimentado por meio de um retificador controlado.

Para cada conversor estático estudado, existe um valor de tensão média ou um valor de tensão eficaz de saída que depende do ângulo de disparo dos tiristores, conforme mostra a Tabela 1.

TABELA I  
Tensão média na carga, em função do tipo de conversor estático

Conversor estático	Carga	Tensão média ( $V_{Omed}$ ) / Tensão eficaz ( $V_{Orms}$ )
1) Retificador de meia onda controlado	Resistiva	$V_{Omed} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos\theta)$
2) Chave estática CA	Resistiva	$V_{Orms} = 0,4V_m \sqrt{\pi - \theta + \frac{1}{2}\sin 2\theta}$
3) Retificador monofásico de meia onda não-controlado	Indutiva	$V_{Omed} = \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos\phi)$
4) Retificador monofásico de meia onda controlado	Indutiva	$V_{Omed} = \frac{V_m}{2\pi} (\cos\phi - \cos\phi')$
5) Retificador monofásico de meia onda controlado, com diodo roda-livre	Indutiva	$V_{Omed} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos\phi)$
6) Retificador monofásico de onda completa	Resistiva	$V_{Omed} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos\phi)$
7) Retificador monofásico de onda completa	Indutiva	$V_{Omed} = \frac{V_m}{\pi} (\cos\phi - \cos\phi')$

$\theta$  – ângulo de disparo inicial dos tiristores;  $\phi$  – ângulo de extinção

### 3. SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES ESTÁTICOS MODELADOS NO SIMULINK

O ambiente do Simulink é composto basicamente de dois componentes: 1) bibliotecas de blocos; 2) editor de diagrama de blocos (ambiente no qual os blocos são inseridos). Um bloco representa um elemento do sistema dinâmico, com dados de entrada e saída, cujo comportamento é simulado pelo Simulink. Os valores de saída dos blocos (*outputs*) são genericamente chamados de sinais. A simulação de modelos de sistemas dinâmicos envolve a integração numérica dos sinais ao longo do tempo, a qual é executada por um conjunto de equações diferenciais ordinárias (ODE: *Ordinary Differential Equations*) (Matsumoto, 2002). O Simulink oferece um conjunto de opções de *solvers* (métodos numéricos para resolução de equações diferenciais), cujas preferências são configuradas na janela *Simulation Parameters*. Para a simulação utilizando conversores estáticos, o método de integração mais eficiente é o ode23tb (baseado no método Range-Kutta), com passo variável (Dabney e Harman, 1998).

### 3.1. Retificador de Meia Onda Controlado, com Carga Resistiva

O diagrama de blocos de um retificador de meia onda controlado, com carga resistiva, é mostrado na Figura 8. O bloco *AC Voltage Source* apresenta uma amplitude de 100 V. O resistor de  $10\ \Omega$  é um bloco *Series RLC Branch* com a indutância e a capacitância eliminadas ( $L = 0$  e  $C = \text{inf}$ , respectivamente). O símbolo *inf* significa “infinito”; no caso da capacitância, é o mesmo que reatância capacitiva igual a zero. O bloco *Discrete Mean Value* mede o valor médio da tensão na carga. A Figura 9 mostra a janela de parâmetros dos blocos *Thyristor*, *Pulse Generator* e a janela dos parâmetros de simulação (*Simulation Parameters*). O bloco *Thyristor* contém um *snubber* Rs-Cs que pode ser colocado em paralelo com o tiristor. Um *snubber* é um circuito de auxílio à comutação que tem a finalidade de evitar que taxas de variação de tensão ( $dv/dt$ ) e de corrente ( $di/dt$ ), no pequeno intervalo de tempo envolvido no chaveamento de dispositivos semicondutores, possam afetar severamente o funcionamento destes mesmos dispositivos, ou seja, são circuitos de amortecimento que reduzem os efeitos nocivos de altas taxas  $di/dt$  e  $dv/dt$ , levando-as a valores abaixo dos especificados nominalmente. Os altos valores de corrente ocorrem no instante em que o dispositivo semicondutor passa a conduzir, enquanto os altos valores de tensão surgem quando o dispositivo é bloqueado. Ao ser estabelecido valor *inf* para a resistência Rs, conforme mostra a Figura 9a, o *snubber* é eliminado. Em geral, o *snubber* é eliminado, nas simulações, para evitar uma interferência no circuito, quando a chave estiver bloqueada. O bloco *Pulse Generator*, na Figura 9b, está selecionado para um ângulo inicial de  $90^\circ$  (convertido para segundos), com um período de 16,67 ms ( $2\pi$  radianos, na frequência de 60 Hz). Pode ser observado, na janela de parâmetros de simulação (Figura 9c), que o tempo de simulação é de 4 ciclos e o método de integração escolhido é o 23tb. No Simulink, o símbolo “e” equivale a 10. Então, lê-se  $16.67\text{e-}3$  s como sendo 16,67 ms. As formas de onda da tensão de alimentação ( $v_i$ ), gatilho do tiristor ( $g$ ), tensão de saída na carga ( $v_o$ ) e tensão no tiristor ( $v_{th}$ ) são mostradas na Figura 10.

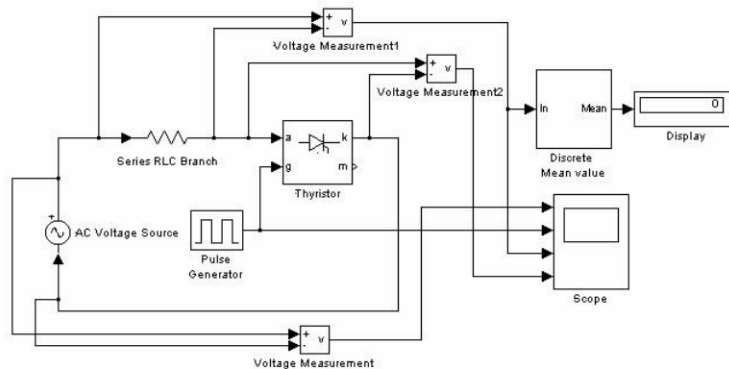


Figura 8 - Retificador monofásico de meia onda controlado a tiristor SCR, com carga resistiva.

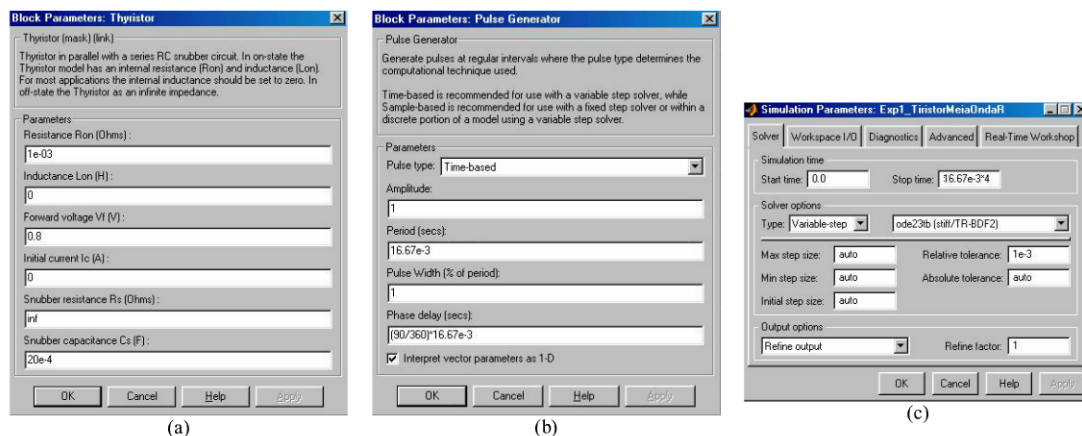


Figura 9 – Janelas de parâmetros dos blocos *Thyristor* (a) e *Pulse Generator* (b) e do menu *Simulation Parameters* (c).

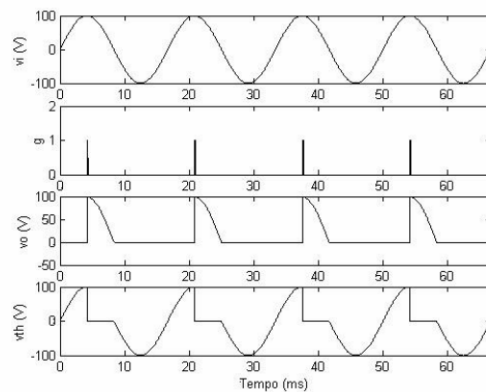


Figura 10 – Formas de onda para o retificador de meia onda controlado, com carga resistiva. Legenda:  $v_i$  – tensão de entrada ou tensão da fonte;  $g$  – gatilho do tiristor;  $v_o$  – tensão na carga;  $v_{th}$  – tensão no tiristor.

Pode ser observado, na Figura 10, que somente após o primeiro disparo do tiristor, em  $90^\circ$ , é que o dispositivo entra em condução e a tensão na carga  $v_o$  assume a mesma forma da tensão da fonte. Em  $180^\circ$ , a tensão atinge o valor instantâneo igual a zero. Como a carga é resistiva, a corrente está em fase com a tensão e, portanto, também é zero, logo o tiristor é bloqueado. Enquanto o tiristor estiver bloqueado, a tensão na carga é nula. Somente haverá nova condução no semiciclo positivo da tensão seguinte, quando ocorre um novo disparo, defasado  $360^\circ$  do anterior. Pode ser observado que, enquanto o tiristor está bloqueado, existe uma tensão reversa em seus terminais, a qual atinge um valor máximo igual à amplitude da senóide. Outro aspecto importante: a tensão CA de entrada é convertida em uma tensão CC de saída. Logo, o retificador de meia onda controlado, com carga resistiva, é um conversor CA-CC. Para o ângulo de disparo de  $90^\circ$ , o *display* mede um valor de tensão médio igual a 15,66 V. Se for comparado ao valor obtido pela expressão na primeira linha da Tabela 1, igual a 15,91 V, pode ser considerado um valor bastante aceitável. No Guia de Experimento que contém o retificador de meia onda controlado, algumas questões são propostas ao final do desenvolvimento das montagens, para melhor fixação do aprendizado: 1) O que ocorre com a tensão média no resistor ( $V_{o_{med}}$ ), em função da variação do ângulo de disparo? 2) Compare os valores da tensão média do resistor ( $V_{o_{med}}$ ) obtidos na simulação, para os ângulos de  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , com os valores obtidos pela expressão teórica; 3) Explique o comportamento do tiristor, para um ângulo de disparo  $\theta = 0^\circ$ ; 4) Explique o que ocorre com a tensão média do resistor ( $V_{o_{med}}$ ) para o ângulo de disparo  $\theta = 180^\circ$ .

### 3.2. Chave Estática CA

O diagrama de blocos para a simulação da chave estática CA é mostrado na Figura 11. O valor eficaz da tensão da fonte é 100 V. Os tiristores possuem a mesma especificação da Figura 9a. O bloco *Pulse Generator 1* possui a mesma especificação apresentada na Figura 9b; o bloco *Pulse Generator 2* apresenta um ângulo de defasagem de 180 em relação ao *Pulse Generator 1* - *Phase delay (secs)*:  $(90/360)*16.67e-3 + (180/360)*16.67e-3$ . O bloco *Discrete RMS* mede valores rms de tensão na fonte e na carga.

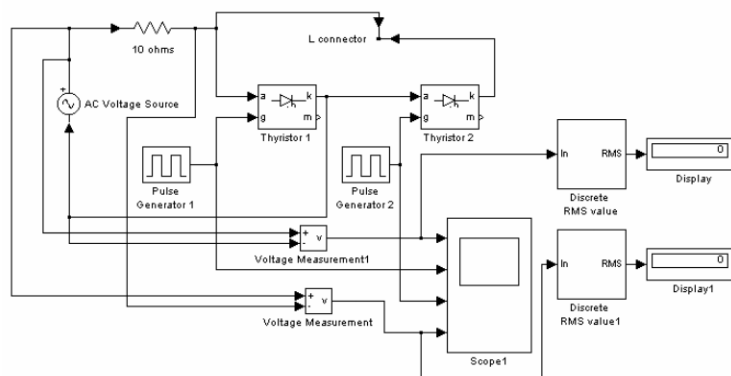


Figura 11 – Diagrama de blocos para simulação da chave estática CA.



Para a especificação inicial dos ângulos de gatilho ( $g_1 = 90^\circ$  e  $g_2 = 90^\circ + 180^\circ$ ), a forma de onda da tensão da fonte ou tensão de entrada,  $v_i$ , dos gatilhos  $g_1$  e  $g_2$  e da tensão do resistor ou tensão de saída,  $v_o$ , observadas no bloco *Scope*, são mostradas na Figura 12.

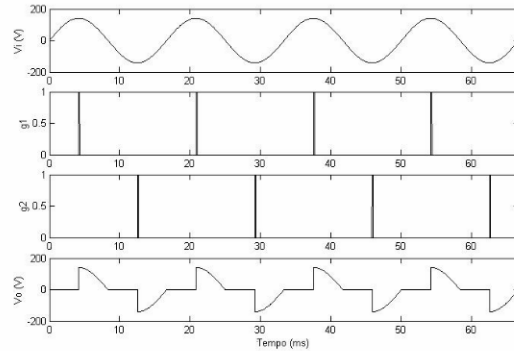


Figura 12 – Chave estática CA: formas de ondas mostradas pelo bloco *Scope*, para a especificação inicial dos ângulos de gatilho. Legenda:  $v_i$  – tensão de entrada;  $g_1$  – gatilho do tiristor 1;  $g_2$  – gatilho do tiristor 2;  $v_o$  – tensão de saída na carga.

Na chave estática CA, o gatilho do tiristor  $T_1$  ( $g_1$ ) habilita o dispositivo a conduzir no semiciclo positivo da tensão de entrada. O gatilho do tiristor  $T_2$  ( $g_2$ ) habilita o dispositivo a conduzir no semiciclo negativo da tensão de entrada. Por isso, a tensão de saída ( $v_o$ ) é uma tensão CA variável. Logo, a chave CA funciona como um conversor CA-CA. Para o ângulo inicial de  $90^\circ$ , a tensão rms de saída é 69,91 V. o Valor teórico esperado, de acordo com a expressão na Tabela 1, é de 70,9 V. Algumas questões a abordar, ao final do experimento: 1) O que ocorre com a tensão eficaz ou rms no resistor, em função da variação do ângulo de disparo? 2) Explique o que ocorre com a tensão de saída ( $V_{o_{rms}}$ ) no resistor para o ângulo de disparo  $\theta = 180^\circ$ . O tiristor se comporta como uma chave aberta ou fechada? 3) Anule os gatilhos  $g_1$  e  $g_2$  (amplitude zero). Verifique a tensão de saída  $V_{o_{rms}}$ . O tiristor se comporta como uma chave aberta ou fechada?

### 3.3. Retificador Monofásico de Onda Completa Controlado, com Carga Indutiva

A Figura 13 mostra o diagrama de blocos do retificador monofásico de onda completa controlado, com carga indutiva (bloco *Series RLC Branch*:  $R = 1$ ;  $L = 1e-3$ ;  $C = \text{inf}$ ). Para a especificação inicial preestabelecida ( $\theta = 90^\circ$ ), as formas de onda da tensão da fonte ou tensão de entrada ( $v_i$ ), dos sinais de gatilho  $g_1$  e  $g_2$ , do sinal de controle *Step* ( $g_s$ ) 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 14.

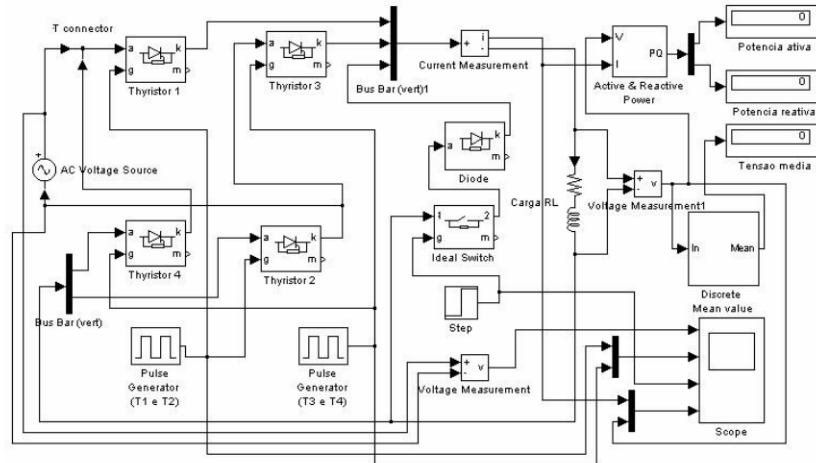


Figura 13 – Diagrama de blocos do retificador monofásico de onda completa controlado, com carga indutiva.

Os blocos *Pulse Generator* ( $T_1$  e  $T_2$ ) e *Pulse Generator* ( $T_3$  e  $T_4$ ) estão defasados de  $180^\circ$ , conforme mostram os seus gatilhos ( $g_1$  e  $g_2$ , respectivamente), na Figura 14. Pode ser observado que o sinal  $g_s$ , 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 (*Diode*), também está desabilitado. Com o diodo roda-livre desabilitado, a tensão na carga  $v_o$  assume valores instantâneos negativos (tensão reversa na carga). No entanto, após o 2º ciclo da tensão  $v_i$ , o sinal de controle  $g_s$  habilita a chave a conduzir e o diodo roda-livre passa a atuar no circuito, permitindo que a tensão reversa na carga seja eliminada.

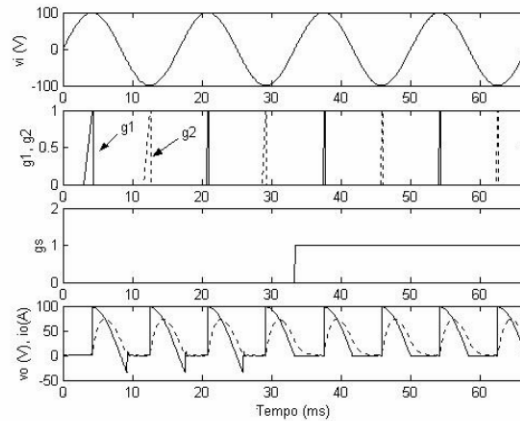


Figura 14 – Formas de onda do diagrama da Figura 13, mostradas pelo bloco *Scope*. Legenda:  $v_i$  – tensão de entrada;  $g_1$  – gatilho do tiristor 1;  $g_2$  – gatilho do tiristor 2;  $v_o$  – tensão de saída na carga;  $i_o$  – corrente na carga.

### 3.4. Acionamento em Velocidade Variável de um Motor CC

3.4.1. Acionamento por meio de um regulador de tensão. O diagrama de blocos para acionamento em velocidade variável de um motor CC com um regulador de tensão é mostrado na Figura 15. Um bloco foi criado para funcionar como um regulador de tensão. Para criar um bloco no Simulink, basta clicar em *Select all* do *Edit* menu, após a criação do diagrama a ser transformado em bloco, e depois clicar em *Create subsystem*. Um bloco novo será criado, e o nome poderá ser estabelecido. Ao novo bloco foi dado o nome de *Motor CC Step Starter*, pois a geração do sinal de alimentação do motor foi feita por meio do somatório de blocos *Step*, conforme mostra a Figura 16. O terminal de leitura  $m$  do motor CC apresenta a seguinte sequência de parâmetros: velocidade angular do motor ( $\omega_m$ ), corrente de armadura ( $I_a$ ), corrente de campo ( $I_f$ ) e torque eletromagnético ( $T_e$ ). O bloco *Gain 1* relaciona o torque da carga ( $T_L$ ) e velocidade angular ( $\omega_m$ ) do motor ( $T_L = 0,23\omega_m$ ), enquanto o *Gain 2* converte o sinal de velocidade de radiano por segundo em rotações por minuto. O circuito de campo do motor (terminais F+ e F-) é alimentado por uma fonte CC de 240 V.

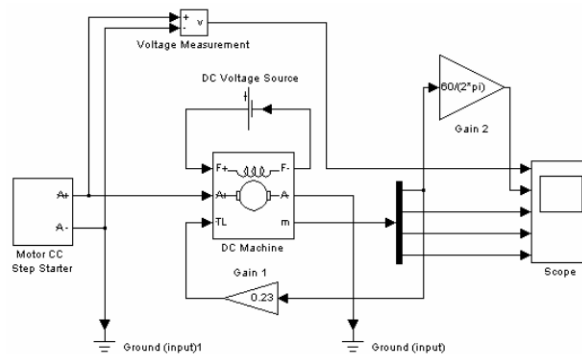


Figura 15 – Diagrama de blocos para acionamento em velocidade variável de um motor CC.

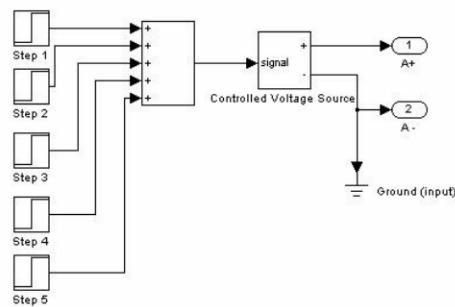


Figura 16 – Regulador de tensão por meio de somatório de blocos *Step*.

No diagrama da Figura 16, o sinal de saída do bloco somatório (chamado *Sum*, encontrado no item *Math* da biblioteca *Simulink*) passa pelo bloco *Controlled Voltage Source*. A finalidade deste bloco é transformar um sinal de controle, gerado pelo *Sum*, em um sinal de potência independente a alimentar os terminais da armadura do motor. A Figura 17 mostra o sinal gerado pelo bloco criado *Motor CC Step Starter*. Inicialmente a tensão do regulador começa com 48 V, e sofre um acréscimo de mais 48 V, de um em um segundo, chegando, no instante de 4 s, ao valor final de alimentação do motor (240 V).

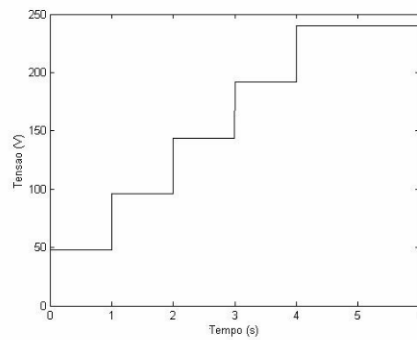


Figura 17 – Forma de onda gerada por um regulador de tensão formado por blocos *Step*.

Para a especificação inicial preestabelecida, as formas de onda da tensão nos terminais da armadura ( $v_t$ ), corrente de armadura ( $i_a$ ), velocidade (rpm), corrente de campo ( $i_f$ ) e torque eletromagnético ( $T_e$ ) são mostradas na Figura 18.

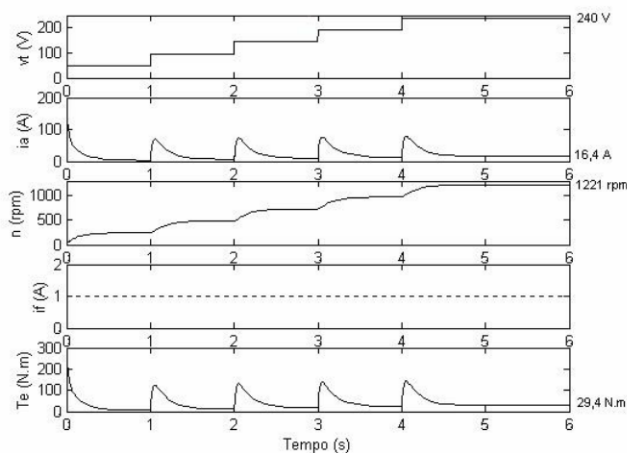


Figura 18 – Formas de onda, mostradas pelo bloco *Scope*, do diagrama de blocos da Figura 23.

Pode ser observado, na Figura 18, que a velocidade acompanha, de forma suave, o aumento progressivo da tensão nos terminais da armadura. No instante em que a tensão muda de nível, ocorre um aumento na corrente de armadura e, conseqüentemente, no torque eletromagnético do motor. No entanto, uma vez que o motor começa a acelerar e aumentar a sua velocidade, a tensão induzida na armadura aumenta e corrente de armadura começa a sofrer uma redução, mas buscando um valor de regime permanente um pouco acima do anterior. A corrente de campo mantém-se sempre constante, uma que a fonte que alimenta o enrolamento de campo é constante.

3.4.2. Acionamento com retificador semicontrolado. Nesta montagem, há a necessidade da criação de um bloco gerador de pulso com ângulo inicial variável, para que haja uma variação no ângulo de disparo dos tiristores de um retificador de onda completa semicontrolado. O diagrama de blocos para o acionamento do motor CC com retificador de onda completa semicontrolado é mostrado na Figura 19. O bloco gerado *Variable Pulse Generator* é mostrado em detalhe na Figura 20.

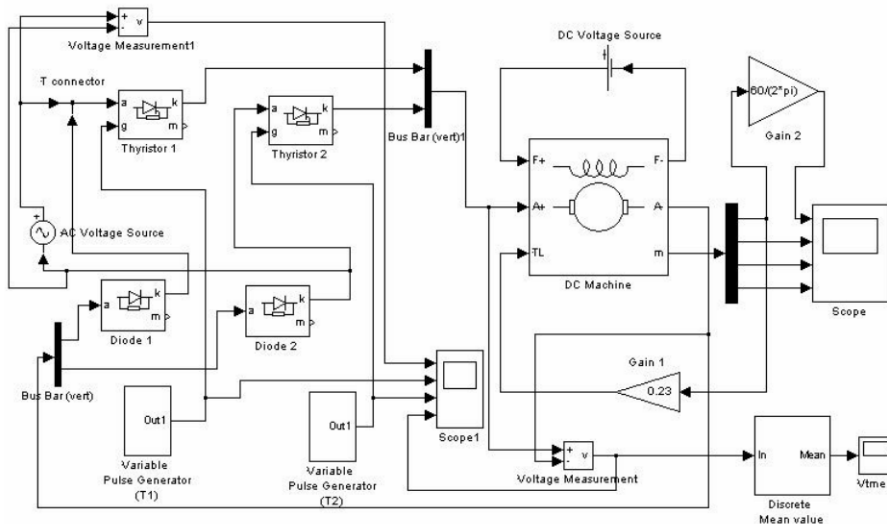


Figura 19 - Diagramas de bloco do acionamento com retificador semicontrolado.

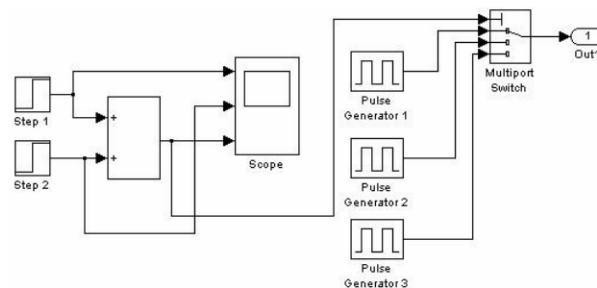


Figura 20 - Bloco criado *Variable Pulse Generator* (T1 e T2).

Considerando que, em um retificador de onda completa semicontrolado, a tensão média na carga ou tensão média de saída ( $V_{o_{med}}$ ) é determinada da mesma forma que em um retificador monofásico de onda completa (item 6 da Tabela 1), para uma tensão final no motor de 240 V, com um ângulo de disparo de  $0^\circ$ , a tensão eficaz de entrada será igual a 266,7 V.

As Tabelas 2 e 3 mostram as especificações iniciais dos outros blocos *Pulse Generator* (T1) e *Pulse Generator* (T2) utilizados nos diagramas das Figuras 19 e 20. A diferença entre os dois blocos está nos ângulos iniciais de fase dos três blocos *Pulse Generator*, defasados de  $180^\circ$ . Cada bloco *Pulse Generator* (T1 ou T2) sofrerá uma mudança de ângulo de fase inicial (*Phase delay*), de acordo com o estado de controle da chave seletora (bloco *Multipoint Switch*). A Figura 21 mostra o controle da chave seletora (*Multipoint Switch*). O bloco *Multipoint Switch* permite a passagem do sinal pela primeira porta caso o estado do sinal de controle seja 1; se o sinal de controle for 2, a segunda porta é

ativada, e assim sucessivamente. O sinal de controle da chave é o sinal *Step 1 + Step 2*. Pode ser observado que de dois em dois ciclos ocorre uma mudança de estado, por isso o sinal de saída da porta apresentará uma mudança em relação ao ângulo de disparo dos tiristores  $T_1$  e  $T_2$ .

TABELA II  
Especificação do bloco *Pulse Generator (T1)*

PULSE GENERATOR (T1)			
Blocos Step			
	Step 1	Step 2	
Step time	16.67e-3*2	16.67e-3*4	
Initial value	0	1	
Final value	1	2	
Blocos Pulse Generator			
	Pulse Generator 1	Pulse Generator 2	Pulse Generator 3
Amplitude	1	1	1
Period	16.67e-3	16.67e-3	16.67e-3
Pulse width (%)	1	1	1
Phase delay (secs)	(120/360)*16.67e-3	(60/360)*16.67e-3	(0/360)*16.67e-3

TABELA III  
Especificação do bloco *Pulse Generator (T2)*

PULSE GENERATOR (T2)			
Blocos Step			
	Step 1		Step 2
Step time	16.67e-3*2		16.67e-3*4
Initial value	0		1
Final value	1		2
Blocos Pulse Generator			
	Pulse Generator 1	Pulse Generator 2	Pulse Generator 3
Amplitude	1	1	1
Period	16.67e-3	16.67e-3	16.67e-3
Pulse width (%)	1	1	1
Phase delay (secs)	(120/360)*16.67e-3 + (180/360)*16.67e-3	(60/360)*16.67e-3 + (180/360)*16.67e-3	(0/360)*16.67e-3 + (180/360)*16.67e-3

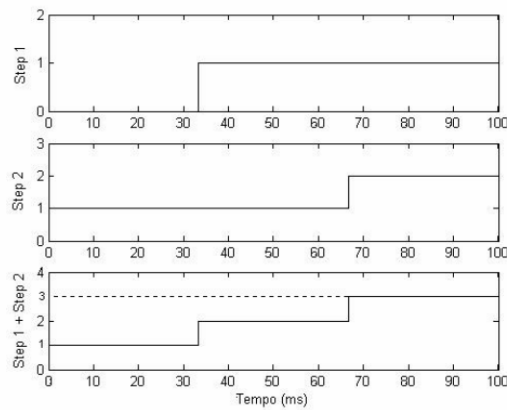


Figura 21 - Controle da chave seletora (*Multiport Switch*).

A Figura 22 mostra as formas de onda da tensão de nos terminais do motor CC ( $v_i$ ), dos gatilhos ( $g_1$  e  $g_2$ ) e da tensão nos terminais de armadura ( $v_r$ ), para as especificações dos blocos *Pulse Generator T1* e *T2* das Tabelas 2 e 3. Pode ser observado que, de dois em dois ciclos, ocorrerá uma mudança na tensão de alimentação do motor CC. A Figura 22 apresenta a tensão nos terminais do motor CC para uma modificação realizada nos tempos dos blocos *Pulse Generator*, conforme mostra a Tabela 4. Todos os outros parâmetros foram mantidos iguais, somente o tempo de mudança de estado dos blocos *Step* foram modificados. O tempo de simulação também foi alterado, conforme observação na Tabela 4.

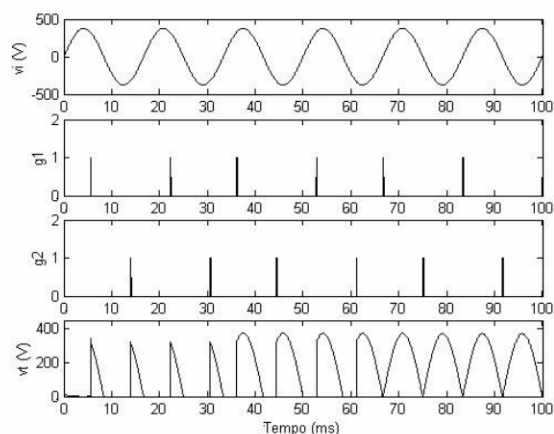


Figura 22 - Tensão nos terminais do motor CC para uma mudança do ângulo de disparo de 2 em 2 ciclos.

TABELA IV  
Modificação nos tempos de mudança de estado dos blocos *Pulse Generator T1* e *T2*

PULSE GENERATOR (T1) e PULSE GENERATOR (T2)		
Blocos <i>Step</i>		
	<i>Step 1</i>	<i>Step 2</i>
<i>Step time</i>	16.67e-3*60	16.67e-3*120

Observação: *Simulation Parameters: Stop Time = 16.67\*250*

A Figura 23 mostra as formas de onda da tensão média nos terminais da armadura do motor CC ( $V_{med}$ ), a corrente de armadura ( $i_a$ ), velocidade do motor ( $n$ ), corrente de campo ( $i_f$ ) e torque eletromagnético ( $T_e$ ) produzido pela máquina. Pode ser observado que a tensão média nos terminais do motor varia de um em um segundo, e possui três etapas, sendo que, na etapa final, atinge o valor nominal de funcionamento da máquina, 240 V. Diferentemente do acionamento mostrado na Figura 18, com 5 níveis de tensão, o acionamento da Figura 23 possui somente 3 níveis de tensão, para facilitação da montagem. No entanto, para um aumento do número de níveis de tensão, basta que sejam acrescentados novos blocos *Pulse Generator*, com diferentes ângulos de fase, no bloco criado *Variable Pulse Generator* (Figura 20).

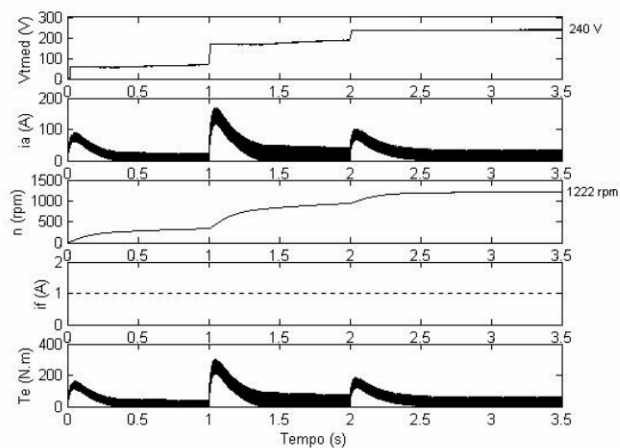


Figura 23 – Formas de onda mostradas pelo bloco *Scope* do diagrama de blocos da Figura 27, com as especificações da Tabela 4.

#### 4. RESUMO

Este artigo apresentou várias modelagens de conversores estáticos de potência, no ambiente Simulink/MATLAB, que estão sendo utilizadas como experimentos no Laboratório de Eletrônica Industrial da Unidade de Ensino Descentralizada de Florianópolis (CEFET-PI/UNED-Florianópolis). A utilização do Simulink permite aos estudantes o desenvolvimento, de forma bastante simples, de modelos capazes de simular com grande precisão o desempenho de dispositivos semicondutores de potência e dos conversores nos quais esses dispositivos são utilizados. 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. Os detalhes dos modelos desenvolvidos e questionamentos de funcionamento, buscando uma interpretação adequada das formas de onda obtidas, foram apresentados com o intuito de ajudar pesquisadores, professores e alunos que atuam na área da eletrônica industrial a realizar a montagem de alguns conversores de potência de forma crítica e criativa.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BRITO, C.M.C. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica no Desempenho de um Motor de Indução Trifásico e de seu Sistema de Acionamento sob Afundamentos de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, 2005.

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

FREITAS, W. e FRANÇA, A.M. **Modelagem e Análise Dinâmica de Dispositivos DSTATCOM Usando o SYMPOWERSYSTEMS para MATLAB/SIMULINK**. Revista Controle & Automação, v.16, n.2, Abril/Maio/Junho, p.187-199, 2005

LANDER, C.W. **Eletrônica Industrial: Teoria e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1996

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](http://www.dsce.fee.unicamp/~antenor/elpot.html)

SARMIENTO, H.G. e ESTRADA, E. **Voltage Sag Study in na Industry with Adjustable-Speed Drives**, IEEE Industry Applications Magazine, v.2, n.1, Jan/Feb, p.16-19, 1996