

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MÉTODOS DE PARTIDA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO NO SIMULINK/MATLAB

Claudio Marzo Cavalcanti de BRITO

Núcleo de Pesquisa em Eletromecânica e Qualidade de Energia – NUPEQ

CEFET-PI / UNED-Floriano

Rua Francisco Urquiza Machado, 462 – Meladão – Florianópolis-PI – 64.800-000

e-mail: marzo_claudio@hotmail.com

RESUMO

Este artigo apresenta a modelagem computacional de métodos de partida de um motor de indução trifásico, no aplicativo Simulink do MATLAB. Considerando a dificuldade de analisar, na prática, o comportamento eletrodinâmico do motor na partida, a simulação permite visualizar as suas curvas de corrente, torque e velocidade, em regimes transitório e permanente, e, desta forma, verificar o melhor método para a condição de carga especificada. Em geral, motores de indução trifásicos de baixa potência são diretamente conectados à rede e os de média e grande potência possuem dispositivos que, conectados entre a rede e o motor, permitem uma redução temporária da tensão aplicada aos seus terminais, limitando a corrente de partida. Os principais métodos de partida de motores de indução trifásicos são: a) partida direta; b) partida estrela-triângulo; c) chave compensadora; d) chave de partida estática *soft-starter*. Somente o primeiro método não reduz corrente de partida. A chave de partida estática *soft-starter*, diferentemente dos demais métodos, que utilizam contadores, é uma chave a tiristores. A grande vantagem do Simulink é que as máquinas elétricas, representadas por blocos, são facilmente especificadas, monitoradas e conectadas às chaves modeladas, e sua análise pode ser feita tanto em regime transitório como em regime permanente.

Palavras-chave: motor de indução trifásico, métodos de partida, simulação dinâmica.

1. INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) é o mais utilizado de todas as máquinas rotativas que transformam energia elétrica em energia mecânica, respondendo por mais de 90% das cargas motoras instaladas nas indústrias. O seu elevado emprego deve-se ao fato de possuir vantagens consideráveis em relação aos demais motores: maior robustez, baixo custo, facilidade na manutenção e simplicidade de controle (FALCONE, 1995). O torque eletromagnético produzido no motor de indução é o resultado da interação entre o fluxo produzido pelo estator e a corrente induzida no rotor. Inicialmente, para vencer a inércia do rotor, a corrente do motor tende a ser elevada, pois o torque eletromagnético precisa ser maior que o torque mecânico produzido pela carga, para que haja movimento. Logo, um motor a vazio apresenta uma corrente de partida bem menor que um motor sendo acionado à plena carga.

Em geral, motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo, os mais empregados industrialmente, ao serem conectados diretamente à rede elétrica, absorvem uma corrente de partida na ordem de 4 a 10 vezes maior que a corrente nominal. Para motores de grande potência, as altas correntes, interagindo com a impedância equivalente entre o ponto de fornecimento, na entrada do ambiente industrial (subestação) e o barramento em que o motor está conectado, provocam reduções de tensão temporárias (afundamentos de tensão), durante alguns segundos, que podem influenciar o desempenho de outras máquinas e equipamentos sensíveis, conectados ao mesmo barramento. Por isso, em geral, motores acima de 5 cv utilizam métodos de partida eletromecânicos (com contadores) ou eletrônicos (com chaves de partida *soft-starter*), para redução da corrente de partida. Motores abaixo de 5 cv não utilizam nenhum método para redução de corrente de partida.

Com a intenção de diminuir a corrente de partida, a valores que podem chegar a um terço do valor que seria obtido com a partida direta, a tensão nos terminais do motor é reduzida, provocando, então, uma queda em seu torque durante o processo de aceleração, até que a sua tensão terminal seja normalizada. O torque eletromagnético é diretamente proporcional ao quadrado da tensão nominal de alimentação do motor. Portanto, é importante que seja verificado se o torque eletromagnético do motor é suficiente para acelerar a carga mecânica acoplada ao seu eixo.

Os principais métodos de partida eletromecânicos de motores de indução trifásicos são: a) partida direta; b) partida estrela-triângulo; c) partida com chave compensadora. Com exceção da chave de partida direta, todos os outros métodos permitem a redução da corrente na partida, por meio de uma menor tensão aplicada aos terminais do motor.

O método eletrônico de partida de um MIT é chamado chave de partida *soft-starter* (do inglês, *partida suave*). É um dispositivo eletrônico que controla a corrente de partida, durante todo o processo de aceleração do motor, permitindo partidas suaves com otimização da corrente de partida. Uma menor corrente é obtida a partir da redução da tensão terminal de alimentação do motor, por meio de chaveamento de tiristores. A chave de partida *soft-starter* tem se tornado popular e vantajosa, principalmente em função do avanço da eletrônica de potência.

Este artigo apresenta experimentos montados no aplicativo Simulink, do MATLAB 6.5, com o intuito de aprofundar o conhecimento teórico associado ao funcionamento de motores de indução trifásicos e seus métodos de partida. O ambiente do Simulink é composto, basicamente, de um conjunto de bibliotecas, com blocos que representam um elemento de um sistema dinâmico, com dados de entrada e saída (chamados sinais), cujo comportamento é simulado a partir de modelos de sistemas dinâmicos que envolvem a integração numérica dos sinais ao longo do tempo, a qual é executada por um conjunto de equações diferenciais ordinárias - ODE: *Ordinary Differential Equations* (BRITO, 2006). O Simulink oferece um conjunto de opções de *solvers* (métodos numéricos para resolução de equações diferenciais), cujas preferências são configuradas na janela *Simulation Parameters*. A modelagem de circuitos de potência, no Simulink, utiliza o conjunto de bibliotecas chamado SimPowerSystems, o qual emprega análise por meio de variáveis de estado para estudo de transitórios de sistemas eletrodinâmicos. No SimPowerSystems, vários elementos presentes em circuitos de potência, tais como fontes, linhas de transmissão, elementos passivos (resistência, capacitância e indutância), dispositivos semicondutores de potência e máquinas elétricas podem ser encontrados, na forma representativa de um bloco, disponível em uma biblioteca específica. Para a simulação de diagramas de blocos desenvolvidos no SimPowerSystems, o método de integração mais eficiente é o ode23tb (baseado no método Range-Kutta), com passo variável (DABNEY e HARMAN, 1998).

2. PARTIDA DIRETA

Em geral, o método de partida direta somente é recomendável se a corrente de partida do motor de indução trifásicos (MIT) não provocar uma redução de tensão apreciável na rede (convém não ser maior do que 10% da tensão nominal). Por isso, em geral, somente motores até 5 cv empregam esse método de partida. No método de partida direta, o MIT é conectado diretamente à rede, por meio de um contator eletromecânico, com uma bobina acionada por um sinal de controle, sendo ainda acrescentados, ao circuito de força, fusíveis e relé térmico, como dispositivos de proteção. A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos, no Simulink, da chave de partida direta do motor de indução trifásico.

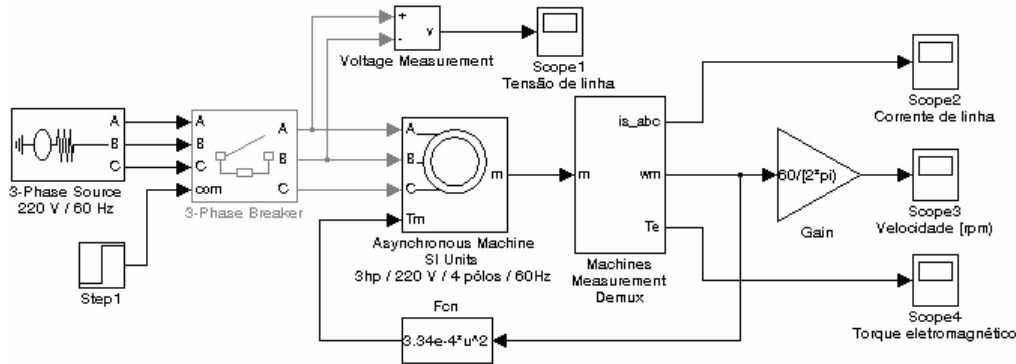


Figura 1 – Diagrama de blocos da chave de partida direta, no Simulink.

O bloco *3-Phase Source* foi especificado para uma tensão de linha eficaz ou rms de 220 V, com uma resistência interna de 0,1 mΩ. O bloco *3-Phase Breaker* representa a chave controlada que permitirá o funcionamento do motor, após receber o sinal com estado “1”, fornecido pelo bloco *Step1*, no instante 0,1 s. O bloco *3-Phase Breaker* possui um *snubber* resistivo (R_p) e/ou capacitivo (C_p) que deve ser colocado em paralelo com a chave (no diagrama, $R_p = 10$ kΩ e $C_p = inf$). O símbolo *inf* significa infinito, isto é, a reatância capacitiva é nula ou o capacitor tem efeito nulo.

O bloco *Asynchronous Machine* representa um motor de indução trifásico de 3 hp, 220 V, 4 pólos, 60 Hz. O bloco *Machines Measurement Demux* permite que sejam enviados os sinais do motor, retirados da porta “m” (*measurement*) para blocos de medição. Os blocos do tipo *Scope* funcionam como um osciloscópio, medindo o sinal em função do tempo. Os sinais do motor, medidos pelos blocos do tipos *Scope*, são as correntes de linha, a velocidade e o torque eletromagnético (T_e). O bloco *Gain* apresenta uma variável de saída que é igual ao produto da variável de entrada pelo valor numérico estabelecido para o bloco. Na Figura 1, pode ser observado que o bloco *Gain* apresenta o valor $60/2\pi$, o qual é o fator de conversão da velocidade em radianos por segundo (rad/s) para rotações por minuto (rpm).

O bloco *Fcn* (*Function*) modifica a variável de entrada (“u”), em função de uma expressão matemática estabelecida. No caso do diagrama da Figura 1, o bloco *Fcn* relaciona o torque mecânico (torque da carga) com a velocidade do eixo do motor. Considerando-se que a carga é do tipo bomba ou ventilador, então o torque mecânico (T) é proporcional ao quadrado da velocidade angular do motor (ω):

$$T = k \times \omega^2 \quad [\text{Eq. 01}]$$

O torque mecânico do motor pode ser obtido da seguinte forma:

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad [\text{Eq. 02}]$$

T – torque mecânico [N.m]

P_m – potência mecânica [W]

ω – velocidade angular do rotor [rad/s]

k – constante de proporcionalidade

Considerando que a velocidade do rotor é muito próxima da velocidade síncrona do campo girante do estator, estabelecida pelo número de pólos (um motor de 4 pólos possui velocidade síncrona de 1800 rpm ou 188,5 rad/s), logo, com base nas Equações 01 e 02, $T_n = 11,87 \text{ N.m}$ e $k = 3,34 \times 10^{-4}$.

Em função do valor obtido para a constante de proporcionalidade k , a expressão matemática do bloco Fcn , na Figura 1, foi estabelecida. A Figura 2 apresenta a tensão rms de linha percentual aplicada aos terminais do MIT, considerando a tensão rms ou eficaz de linha (V_L) igual a 220 V. Pode ser observado que, no instante 0,1 s, a chave atua, e o MIT é, então, conectado diretamente à rede. A Figura 3 mostra a relação entre a corrente instantânea nominal e a corrente de pico nominal do MIT. Se for comparado o máximo valor da corrente de pico, obtido logo após o fechamento da chave, com o valor de pico nominal, pode ser observado que a corrente o valor instantâneo da corrente de partida atinge um valor aproximadamente igual 10 vezes o valor de pico nominal.

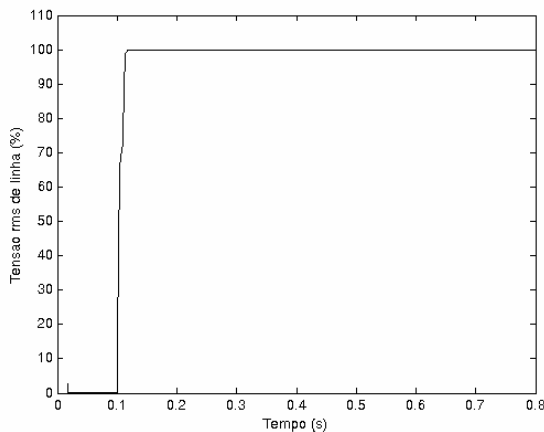


Figura 2 – Tensão rms de linha percentual do MIT, para a partida direta ($V_L = 220 \text{ V}$).

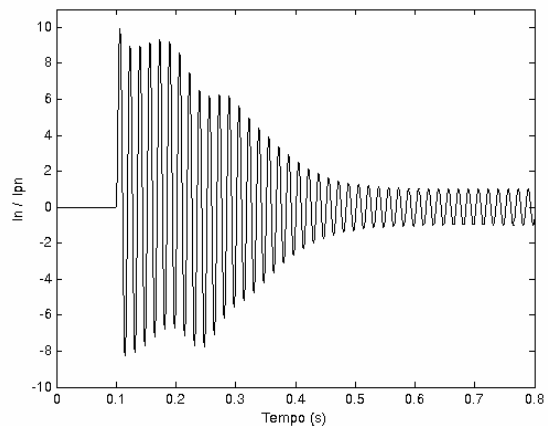


Figura 3 – Relação entre a corrente instantânea nominal (I_n) e a corrente de pico nominal (I_{pn}) do MIT, na partida direta.

A Figura 4 apresenta o comportamento da relação entre o torque eletromagnético instantâneo e o torque nominal do MIT. O torque eletromagnético, logo após o fechamento da chave, atinge um valor na ordem de 12 vezes superior ao seu valor nominal, em regime permanente. Este alto torque produz uma rápida aceleração do MIT, conforme pode ser observado na Figura 5, o qual precisa de apenas 0,5 s - intervalo entre o instante de fechamento da chave (0,1 s) e o instante em que a velocidade nominal é alcançada (aproximadamente 0,6 s) – para estar funcionando em suas condições nominais. Considerando o funcionamento eletrodinâmico, a rápida aceleração do MIT é a grande vantagem da chave de partida direta.

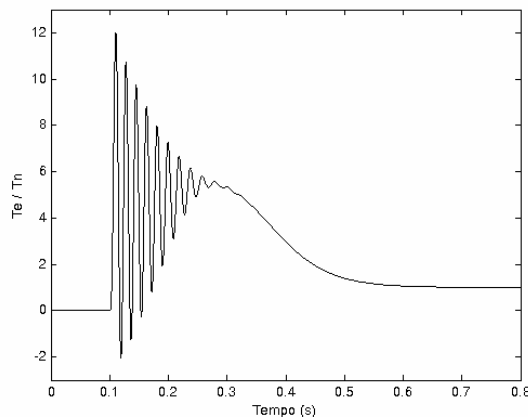


Figura 4 – Relação entre o torque eletromagnético (T_e) e o torque nominal (T_n) do MIT, na partida direta.

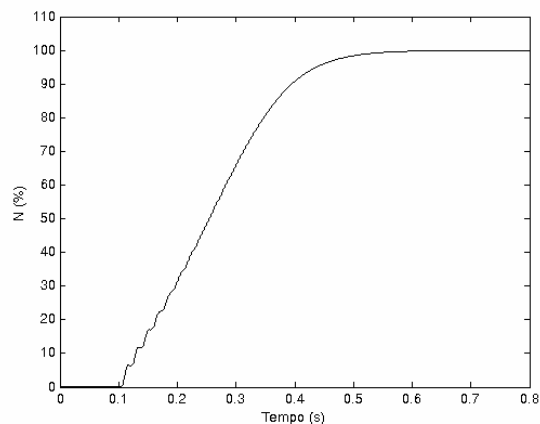


Figura 5 – Velocidade percentual do MIT, na partida direta.

3. PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO

O MIT somente poderá utilizar o método de partida estrela-triângulo se possuir uma ligação em dupla tensão (por exemplo, 220/380 V ou 380/660 V). Para ser conectado à maior tensão, o MIT deverá estar ligado em estrela (Y); para a menor tensão, a sua ligação deverá ser o triângulo ou delta (Δ). O método de partida estrela-triângulo só pode ser realizado se a tensão da rede for igual à tensão de ligação em triângulo. O método é simples: o MIT, que originalmente, em função da tensão da rede, deveria estar conectado em triângulo, é conectado em estrela, ou seja, a ligação em estrela está com uma tensão por fase menor que a tensão nominal de funcionamento, logo a sua corrente por fase (igual à corrente de linha) também será reduzida. Depois que o motor atinge uma velocidade próxima da nominal, sua conexão interna é modificada de estrela para triângulo. O MIT, conectado em estrela, ao ser alimentado pela tensão correspondente a sua conexão em triângulo, terá sua corrente reduzida para um terço da corrente nominal em triângulo.

No Simulink, o motor de indução trifásico, representado pelo bloco *Asynchronous Machine*, é, internamente, conectado em estrela. Logo, não é possível uma ligação em triângulo. No entanto, é possível um estudo equivalente do comportamento eletrodinâmico do MIT, considerando-se que, ao ser alimentado com uma tensão de fase reduzida para um terço da tensão nominal, o motor terá, proporcionalmente, na partida, sua corrente reduzida para um terço da corrente de partida direta. Portanto, na simulação, a tensão de linha foi reduzida em um terço da tensão nominal do motor, para que a tensão de fase seja reduzida na mesma proporção. Uma fonte trifásica programável (bloco *3-Phase Programmable Voltage Source*, da biblioteca *Electrical Sources*) foi utilizada para proporcionar uma redução para 33,3 % da tensão nominal, durante um intervalo de tempo de 4 s. A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos utilizado para a simulação da chave de partida estrela-triângulo.

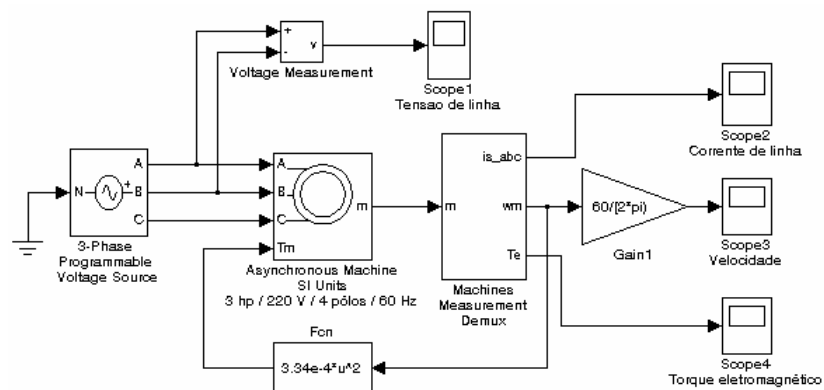


Figura 6 – Diagrama de blocos da chave de partida estrela-triângulo, no Simulink.

A Figura 7 mostra a tensão rms de linha percentual de alimentação do motor. Pode ser observado que, até o instante 4 s, a tensão está limitada a 33,3 % do seu valor nominal. A partir de 4 s, a tensão assume seu valor nominal (220 V). A Figura 8 mostra que a corrente de partida do motor sofre uma redução proporcional à redução da tensão por fase (um terço). Ao ser reajustada a tensão do motor para o valor nominal, no instante 4 s, a corrente sofre um novo aumento, no entanto menor que o máximo valor de corrente obtido na partida direta, pois o motor está próximo de sua velocidade nominal, no instante da mudança da tensão, o que garante, então, uma maior impedância em seu circuito equivalente, considerando a redução do escorregamento (FITZGERALD e KINGSLEY, 1961). Na Figura 9, é possível verificar que a partida estrela-triângulo apresenta um inconveniente: o torque de partida é muito baixo, se comparado a uma partida direta. Por isso, a partida estrela-triângulo somente é recomendada para motores que partem com carga reduzida, de preferência a vazio. Como consequência do baixo torque, a velocidade do motor apresenta um comportamento lento, conforme mostra a Figura 10 (atinge sua velocidade nominal somente no instante 5 s). A passagem de um nível de tensão para outro foi estabelecido a partir do percentual de velocidade atingido pela máquina. Na prática, a passagem da conexão estrela para triângulo ocorre quando o motor está próximo de sua velocidade nominal, para que não ocorra uma elevação considerável da sua corrente de alimentação.

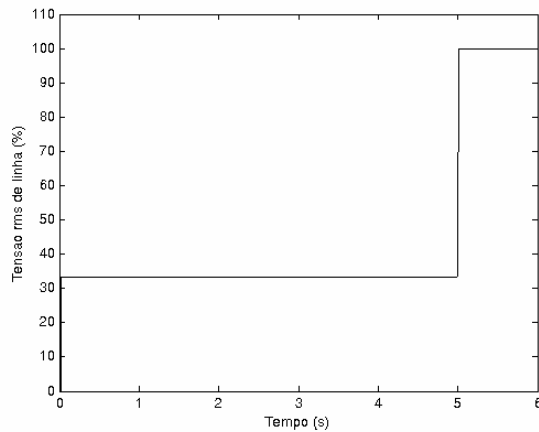


Figura 7 – Tensão rms de linha percentual do MIT, para a partida Y- Δ ($V_L = 220$ V).

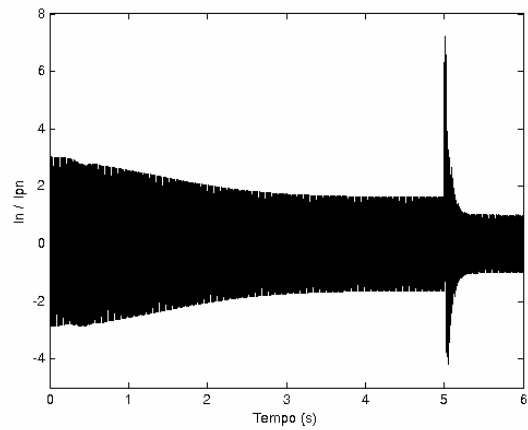


Figura 8 – Relação entre a corrente instantânea nominal (I_n) e a corrente de pico nominal (I_{pn}) do MIT, na partida Y- Δ .

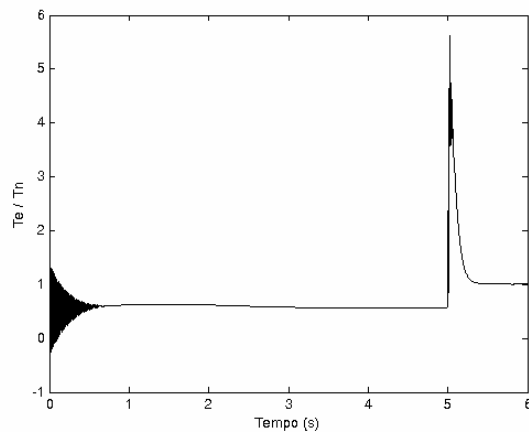


Figura 9 – Relação entre o torque eletromagnético (T_e) e o torque nominal (T_n) do MIT, na partida Y- Δ .

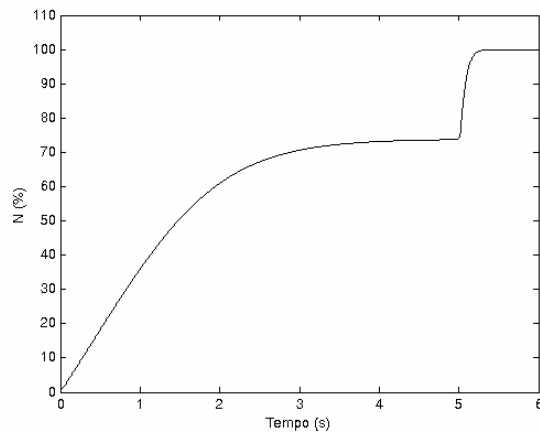


Figura 10 – Velocidade percentual do MIT, na partida Y- Δ .

4. PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA

O método de partida com chave compensadora utiliza um autotransformador para reduzir a tensão de alimentação do MIT para 50, 65 ou 80 % da tensão nominal, durante a partida, até a velocidade do MIT atingir um valor próximo do nominal, quando passa a ser conectado diretamente à rede, sendo o autotransformador isolado. O princípio de funcionamento é, de certa forma, semelhante à chave estrela-triângulo, pois tem a finalidade de reduzir a tensão por fase do motor, na partida, para que ocorra uma redução proporcional da corrente. A grande vantagem da chave compensadora é que, por utilizar um autotransformador, a corrente absorvida pelo motor (no circuito secundário do autotransformador) é maior do que a corrente de linha (no circuito primário do autotransformador), em função da relação de transformação. Logo, a corrente de partida do motor é limitada, na proporção da redução de tensão realizada pelo autotransformador, mas a corrente de linha é reduzida pelo quadrado da relação de transformação.

O Simulink do MATLAB 6.5 não apresenta um bloco para um autotransformador. Um transformador estrela-estrela não aterrado pode ser utilizado para a modelagem, pois apresenta um comportamento, quanto às relações de tensão e corrente, semelhante ao autotransformador (SEN, 1997). A Figura 11 apresenta o diagrama de blocos utilizado para a simulação da chave compensadora. Pode ser observado que as chaves apresentam um *snubber* (na especificação, optou-se por um *snubber* resistivo de 100 Ω), pois o Simulink não permite a conexão de cargas indutivas (motores) a uma chave sem a utilização de um *snubber*. O

transformador foi modelado com base nos parâmetros existentes na literatura, para uma potência de 1 kVA (ANDERSON, 1981).

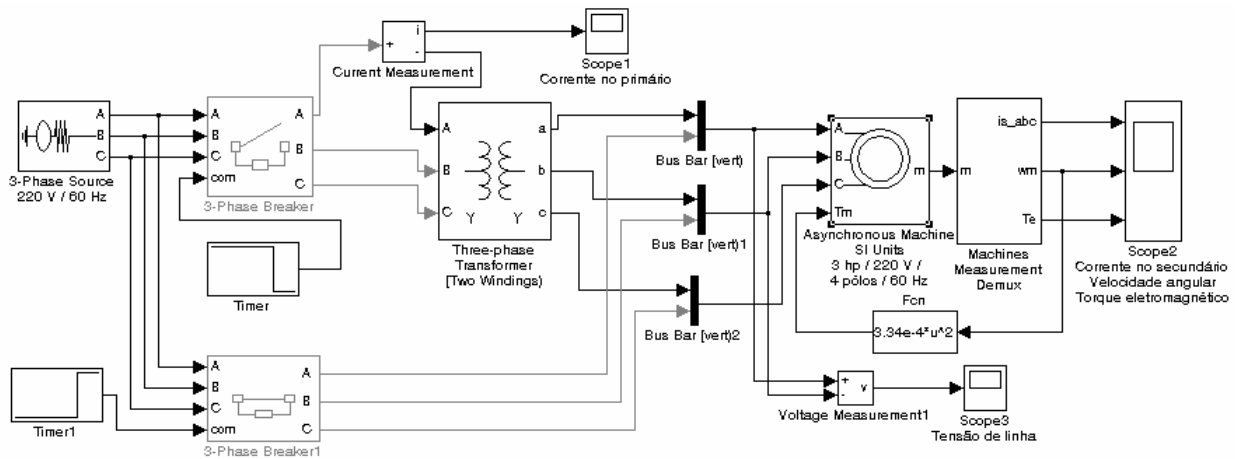


Figura 11 – Diagrama de blocos da chave de partida com chave compensadora, no Simulink.

A Figura 12 mostra que foi estabelecido para a chave compensadora um “tap” de 50 %. Na Figura 13, pode ser observada a comparação entre as correntes rms do método de partida direta e da chave compensadora. Pode ser verificado que, embora na chave compensadora, a corrente do MIT seja reduzida à metade, por causa do “tap” de 50 %, a corrente da linha, para a chave compensadora, é aproximadamente 25 % da corrente de partida do método direto. Esta é a grande vantagem do método de partida com chave compensadora. A sua desvantagem é justamente o alto custo do autotransformador, inexistente na chave estrela-triângulo. A Figura 14 mostra que embora o torque seja reduzido na partida, a chave compensadora, por permitir um maior valor de tensão por fase, apresenta um torque maior na partida. Na Figura 15, pode ser observado o comportamento da velocidade do MIT. Da mesma forma que na partida estrela-triângulo, no método de partida com chave compensadora, a elevação da tensão ao seu valor nominal somente ocorre após o motor atingir uma maior velocidade (o ideal é que seja próxima da nominal).

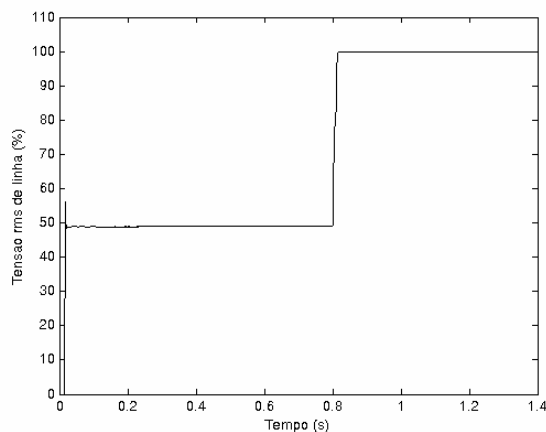


Figura 12 – Tensão rms de linha percentual do MIT, para a partida com chave compensadora.

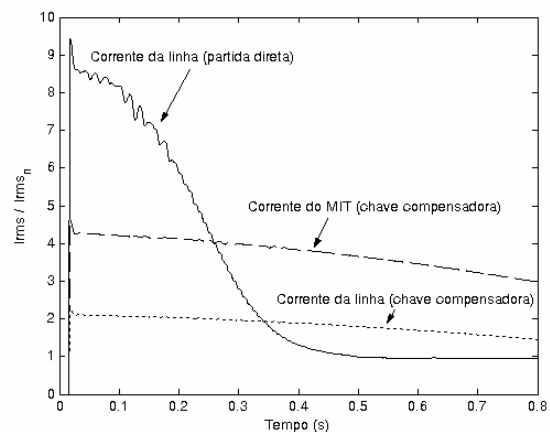


Figura 13 – Corrente rms da linha (partida direta), do MIT e da linha (chave compensadora), em relação à corrente rms nominal do MIT.

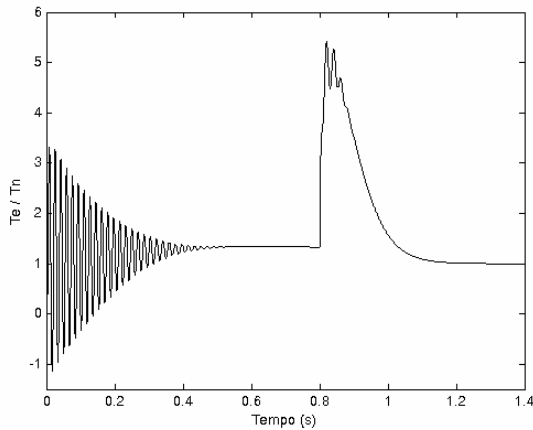


Figura 14 – Relação entre o torque eletromagnético (T_e) e o torque nominal (T_n) do MIT, na partida com chave compensadora.

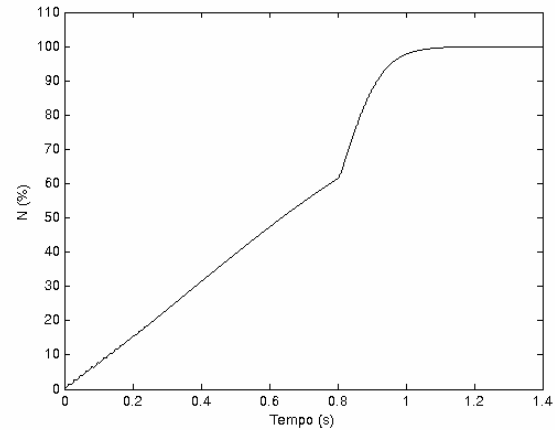


Figura 15 – Velocidade percentual do MIT, na partida com chave compensadora.

5. PARTIDA ESTÁTICA *SOFT-STARTER*

A chave de partida estática *soft-starter* é um método de acionamento eletrônico de motores de indução trifásicos, por meio da utilização de pares de tiristores (conectados em antiparalelo), em cada fase, entre a rede de alimentação e o motor. O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente, por meio de um circuito microprocessado, para aplicar uma tensão variável aos terminais do MIT, durante o seu processo de aceleração. Como a tensão é elevada suavemente (por isso existe uma partida suave, do inglês *soft start*), e não na forma de incrementos ou “saltos”, como ocorre nos métodos de partida estrela-triângulo e chave compensadora, a corrente do MIT, durante a partida, apresenta valores próximos do nominal. A grande vantagem de uma chave eletrônica é a possibilidade de realizar aberturas e fechamentos sem apresentar arcos elétricos e ruídos, característicos de chaves eletromecânicas (contatores), por isso a sua vida útil é mais longa.

Na prática, os intervalos entre os níveis de tensão são tão pequenos (de poucos ciclos), estabelecidos pela mudança dos ângulos de disparo dos pares de resistores, que a curva de tensão rms de saída assume um formato de rampa (por isso, a partida do motor é chamada partida em rampa), até atingir o valor nominal de alimentação do MIT (em geral, o final do período de partida é ajustado entre 2 e 30 segundos). Se o objetivo do experimento é simplesmente observar o comportamento do motor, e fornecer a ele um sinal de saída que possa representar, com mais precisão, o sinal gerado por uma chave *soft-starter* no ambiente industrial, então um diagrama de blocos, como o mostrado na Figura 16, pode ser utilizado para representar a partida em rampa do MIT, para que o seu comportamento eletrodinâmico esteja mais próximo do encontrado na prática. Os blocos do tipo *From Workspace* têm a finalidade de resgatar dados gerados por um determinado programa e colocados à disposição no ambiente de trabalho do MATLAB (*Workspace*). O sinal formado por esses dados é um sinal de controle, o qual é convertido em sinal de potência, para alimentar o MIT, por meio da utilização de três blocos *Controlled Voltage Source*, os quais formam uma fonte em estrela aterrada.

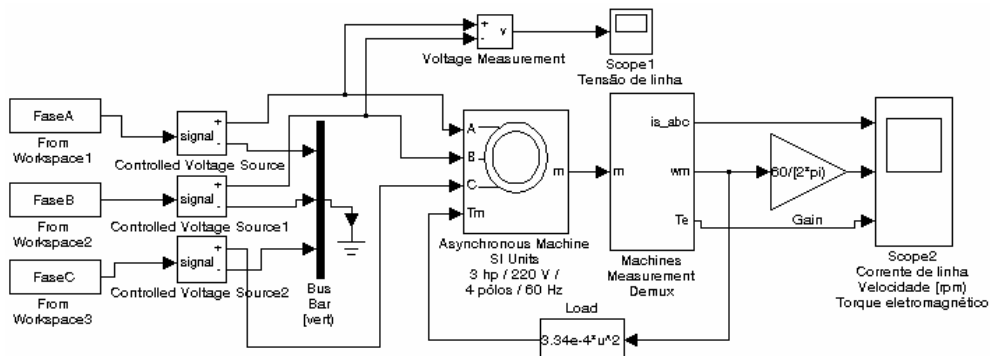


Figura 16 – Diagrama de blocos para a partida em rampa do MIT (*soft-starter*).

O programa desenvolvido no MATLAB, para criar a forma de tensão em rampa necessária para acionar o motor, é mostrado na Figura 17. Não foram consideradas as distorções existentes nas formas de onda das tensões, em função do chaveamento dos pares de tiristores. No entanto, o comportamento em rampa, considerando a tensão eficaz ou rms, é equivalente ao obtido com a chave de partida *soft-starter*. A Figura 18 mostra a tensão rms de linha percentual em rampa, gerada pelo programa. O ajuste foi realizado para que, inicialmente, a tensão seja 30% do valor nominal e que o término do período de partida seja no instante 2 s. Pode ser observado, na Figura 19, que a corrente de partida é reduzida de forma proporcional à tensão inicial, em relação à partida direta. O torque e a velocidade do motor apresentam características mais suaves, durante o processo de aceleração, conforme pode ser visto nas Figuras 20 e 21, respectivamente.

```

1 - Vo=0.3*127*sqrt(2); % Tensao inicial
2 - Vf=127*sqrt(2); % Tensao final
3 - To=0; Tf=2; w=2*pi*60; %Instantes inicial e final; Frequencia
4 - t = linspace(0,2*Tf,8000); %Tempo de simulacao
5 - for n = 1:8000;
6 -     if t(n) >= 0 & t(n) < Tf
7 -         v(n) = (Vf-Vo)*t(n)/(Tf-To)+Vo;
8 -         va(n)=v(n)*cos(w*t(n));
9 -         vb(n)=v(n)*cos(w*t(n)-120*pi/180);
10 -        vc(n)=v(n)*cos(w*t(n)+120*pi/180);
11 -     else
12 -         if t(n) >= Tf
13 -             v(n) = Vf;
14 -             va(n)=v(n)*cos(w*t(n));
15 -             vb(n)=v(n)*cos(w*t(n)-120*pi/180);
16 -             vc(n)=v(n)*cos(w*t(n)+120*pi/180);
17 -         end
18 -     end
19 - end
20 - %Saida para Workspace
21 - for m=1:8000
22 -     FaseA(m,1)=t(m);
23 -     assignin('base','FaseA',FaseA)
24 -     FaseA(m,2)=va(m);
25 -     assignin('base','FaseA',FaseA)
26 -     FaseB(m,1)=t(m);
27 -     assignin('base','FaseB',FaseB)
28 -     FaseB(m,2)=vb(m);
29 -     assignin('base','FaseB',FaseB)
30 -     FaseC(m,1)=t(m);
31 -     assignin('base','FaseC',FaseC)
32 -     FaseC(m,2)=vc(m);
33 -     assignin('base','FaseC',FaseC)
34 - end

```

Figura 17 – Programa para geração de uma tensão em rampa.

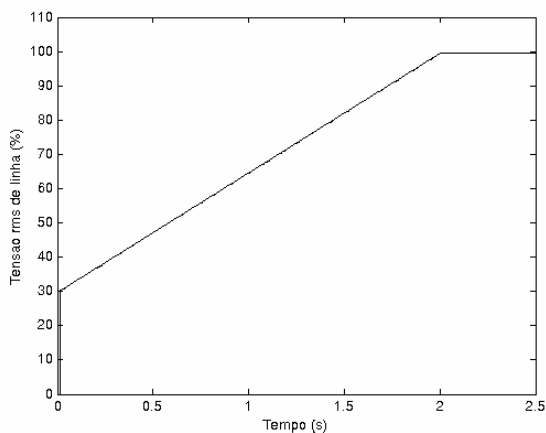


Figura 18 – Tensão rms de linha percentual em rampa, para partida do MIT (*soft-starter*).

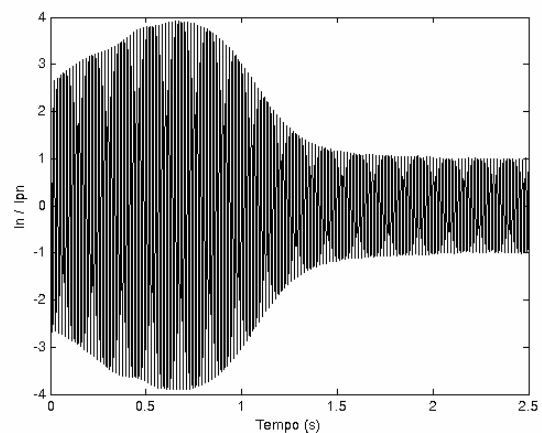


Figura 19 – Relação entre a corrente instantânea nominal (I_n) e a corrente de pico nominal (I_{pn}) do MIT, na partida em rampa (*soft-starter*).

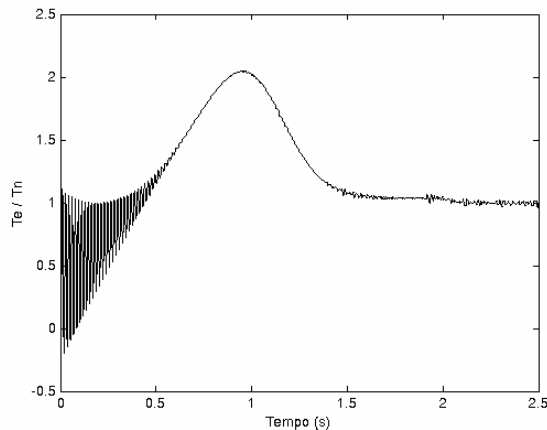


Figura 20 – Relação entre o torque eletromagnético (T_e) e o torque nominal (T_n) do MIT, na partida em rampa (*soft-starter*).

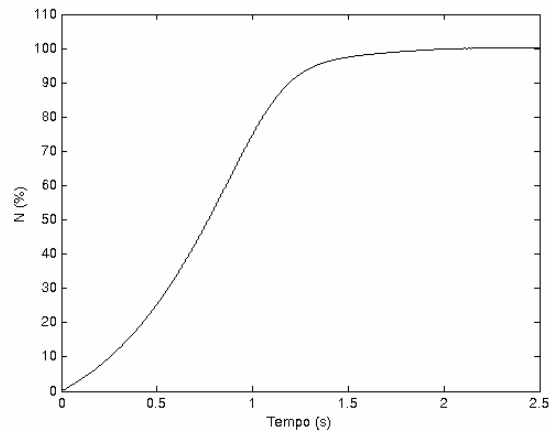


Figura 21 – Velocidade percentual do MIT, na partida em rampa (*soft-starter*).

CONCLUSÃO

As altas correntes de partida em um motor de indução trifásico implicam a necessidade de utilização de métodos de acionamento que possibilitem a sua redução, para que a rede elétrica não sofra reduções consideráveis em seus níveis de tensão, por causa da atuação dessas altas correntes na impedância existente entre a fonte e o barramento ao qual o motor está conectado. Devido à dificuldade de, *in loco*, ser realizada uma verificação do comportamento eletrodinâmico do motor, em função do método utilizado para seu acionamento, uma modelagem computacional dos principais métodos de partida de um motor de indução trifásico torna-se uma ferramenta extremamente poderosa para a análise de máquinas elétricas, de forma dinâmica e interativa, em relação ao comportamento da corrente, do torque e da velocidade. Os quatro métodos mais importantes de partida de um motor de indução trifásico (partida direta, chave estrela-triângulo, chave compensadora e chave estática *soft-starter*) foram modelados no Simulink, um aplicativo que permite uma modelagem bastante simples, pois trabalha com diagrama de blocos, com uma avaliação minuciosa de quaisquer partes de um circuito, facilitando principalmente o desenvolvimento de circuitos de controle, os quais, na prática, envolvem dificuldades técnicas e financeiras em sua execução, principalmente os métodos que envolvem, em seu circuito de força, dispositivos semicondutores de potência, como a chave *soft-starter*, considerando que são, em geral, microprocessados e de difícil implementação.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P.M. **Analysis of Falted Power Systems**. 4. ed. Ames: Iowa State University Press, 1981. 234 p.
- BRITO, C.M.C. Utilização do Simulink/MATLAB no Ensino Experimental de Eletrônica Industrial. In: Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica (I CONNEPI), 1., 2006, Natal-RN. **Anais...** Natal: CEFET-RN. 1 CD-ROM.
- DABNEY, J.B; HARMAN, T.L. **Mastering Simulink 2: Dynamic Simulation for MATLAB**. New Jersey: Prentice-Hall, 1998. 87-90 p.
- FALCONE, A.G. **Motores de Indução: Manutenção e Instalação**. São Paulo: LVBA Comunicação, 1995. 6 p.
- FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C. **Electric Machinery**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 1961. 466 p.
- SEN, P.C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. 2. ed. New York: Wiley, 1997. 66 p.