

## Capítulo XI

# Análise de partida de motores Parte 1 – Dinâmica de rotação e análise do sistema elétrico

Por Edson Bittar Henriques\*



### INTRODUÇÃO

Analisar a partida (fase de aceleração) de um motor elétrico pode ser necessário para algumas finalidades, como:

#### *Para fins mecânicos:*

- a) Verificar se efetivamente o motor conseguirá acelerar a carga mecânica em um tempo adequado. Ao se dimensionar o motor, é usual focar a necessidade em regime permanente, porém, não se pode esquecer que o motor terá de acelerar a carga até a velocidade de regime;
- b) Verificar se a aceleração estará adequada à máquina ou processo acionado (aceleração brusca ou suave);

#### *Para fins elétricos:*

- a) Verificar se o motor e o sistema elétrico suportam a partida (se estão dimensionados para tal condição);
- b) Verificar o impacto, ou seja, o nível de perturbação no restante do sistema elétrico (sobrecorrente e queda de tensão), que pode afetar demais cargas consumidoras;
- c) Prover adequados ajustes das proteções elétricas para o motor e para o sistema elétrico e evitar atuações indevidas e descontinuidade de operação.

O intuito dos estudos é, portanto, antever ou simular por cálculo as condições de partida, verificando a performance de motores e, eventualmente, revendo seu dimensionamento e dos sistemas

de alimentação elétrica e analisar o impacto no sistemas elétrico, concluindo se é necessário e viável providenciar outros métodos de partida (como soft-starter, chaves estrela-triângulo, chaves compensadoras, substituir o motor de indução por motor de anéis com controles no circuito do rotor, usar conversor de frequência para controle da partida e regime, acoplamentos hidráulicos etc.).

### METODOLOGIA

Diante dos itens expostos anteriormente, observa-se que o estudo proposto abraça as disciplinas elétrica e mecânica. Há diferentes formas e níveis de realizar este estudo, desde

aproximações e simplificações – como adotar conjugados médios por simples visualização de curvas e considerar, portanto, uma aceleração média geral e simplificar a modelagem do sistema elétrico, que podem gerar resultados rápidos, mas as vezes distorcidos e imprecisos – e outros métodos mais complexos para resultados mais precisos. Os métodos mais sofisticados envolvem recursos computacionais para analisar parâmetros durante o período de aceleração. Neste artigo, será apresentado um método que desenvolvi, mas há, no entanto, módulos de TMS ("transient motor starting analysis") de pacotes de softwares importados de sistemas de potência no mercado prontos para realizar estes estudos. Há também softwares de simulação de sistemas elétricos de potência para montagem e modelagem virtual de circuitos e equipamentos, como o pacote de sistema de potência do Simulink do Matlab, por exemplo, em

que o usuário pode montar seu modelo e simular o que pretender (vide anexo 1).

A parte mecânica do estudo envolve basicamente dinâmica de rotação, que é aplicação dos conceitos e a lei de Newton a este sistema, observando, porém, que, em geral, temos um sistema com aceleração angular variável, ou seja, não constante, por isso não há fórmulas simples prontas para uso generalizado.

A parte elétrica envolve uma análise de circuitos para determinação de correntes e tensões no motor e seu efeito no conjugado (torque) do motor e no sistema alimentador à montante (perturbação). É recomendável modelar o sistema elétrico em p.u. (por unidade) para melhores resultados nas análises destas perturbações.

## DADOS

### *a) Do motor que parte*

Para a maioria das aplicações industriais,

com motores de pequeno e médio porte, há disponíveis as curvas de conjugado (torque) x rotação e corrente x rotação, fornecidas pelo fabricante do motor, ou mesmo disponíveis em catálogos eletrônicos e/ou sites de fabricantes, assim, iremos partir delas no exemplo desse artigo. O motor será modelado nesta análise como uma impedância que varia em função de  $\omega$ .

Para motores de grande porte (centenas de kW) e/ou de MT (média tensão), pode ser que estejam disponíveis também os parâmetros do circuito equivalente do motor (resistências e reatâncias do modelo elétrico do motor). É possível partir destes dados e inclusive as curvas citadas podem ser obtidas deles. É possível também obter estes parâmetros a partir dos resultados dos ensaios dos motores.

*Nota: os parâmetros do circuito equivalente são dados mais completos, assim, eles contêm informações mais "ricas" de*

conteúdo, a partir dos dados de curvas; apenas requer algumas considerações / aproximações para cálculos. A folha de dados do fabricante do motor também será necessária (contendo dados nominais,  $I_p/I_n$ , tempo máximo de rotor bloqueado e momento de inércia do motor).

### b) Da carga mecânica acionada pelo motor que parte

Da carga serão necessários os dados nominais (potência no eixo ou conjugado a uma dada rotação), a curva conjugada (torque) x rotação ou tipo de curva (quadrática, linear, constante ou outra), sendo que, em geral, para aplicações usuais, o tipo de máquina/equipamento já define o tipo; por exemplo, um soprador ou uma bomba centrífuga tipicamente tem curva de torque quadrática. O conjugado da carga ou conjugado resistente é o conjugado que se opõe ao conjugado motor.

Outros dados extremamente importantes são momento de inércia da carga " $J_c$ " e outro é a relação de redução " $r$ ", caso exista um sistema redutor de velocidade (polias, redutor por engrenagens etc.) entre o motor e a carga mecânica.

### c) Do sistema elétrico alimentador

A modelagem do sistema elétrico alimentador depende de até onde se pretende analisar os impactos da partida. Proponho a modelagem a seguir que atende a muitos casos práticos (assim,

facilita-se padronizar um programa de cálculo). Analisa o impacto até um barramento de quadro primário, à montante de um transformador, que, por sua vez, alimenta um quadro secundário que alimenta outras cargas e o motor que parte. À montante do quadro primário, o sistema estará sendo modelado pelo circuito equivalente (equivalente de Thevenin) com base no nível de curto-circuito local.

Todos os dados necessários do sistema elétrico (níveis de curto-circuito, dados do trafo, dados de cabos, dados de cargas/demandas etc.) serão necessários para se calcular as impedâncias na forma complexa " $z=r+jx$ " em p.u.

## CÁLCULOS/PROCESSAMENTO

### a) Mecânica

O sistema mecânico pode ser representado conforme a Figura 1:

Para relembrar, fazendo um paralelo entre a dinâmica do movimento linear e dinâmica de rotação, temos:

Movimento linear	Movimento de rotação
$F = m \cdot a$ (força)	$T = J \cdot \alpha$ (eq.1) (torque)
$E_{cin} = 1/2 m \cdot v^2$ (energia cinética)	$E_{cin} = 1/2 J \cdot \omega^2$ (eq. 2)
$P = F \cdot v$ (potência mecânica)	$P = T \cdot \omega$ (eq. 3)

Assim:

Da eq(1), temos:

$$T = T_m - T_{cc} = J \cdot \alpha \Rightarrow \alpha = d\omega/dt = (T_m - T_{cc})/J \text{ (eq. 4)}$$

Em que:

$T_m$  = torque (ou conjugado) do motor;  
 $T_{cc}$  = torque (conjugado) da carga referido ao eixo do motor;

$J = J_m + J_c$  onde  $J_m$  = momento de inércia do motor,  $J_c$  é momento de inércia da carga referido ao eixo do motor.

Seja  $r = \omega_c/\omega_m$  relação entre a rotação da carga e a do motor, ou seja, relação do redutor, então:

- da eq. 2, temos:  $J_{cc} = J_c \cdot r^2$

- da eq. 3, temos:  $T_{cc} = T_c \cdot r$

As curvas dadas são:

$T_{mvn}$  ( $T_m$  à tensão nominal) =  $f_1(\omega)$   
 $e T_c = f_2(\omega)$ ;

Logo,  $\alpha = f(\omega)$  que é a aceleração angular em geral não será constante.

Cálculo do tempo de aceleração:

Da eq. 4, observe que:

$$dt = J / (T_m - T_{cc}) \cdot d\omega \text{ para } T_m - T_{cc} \text{ não nulo.}$$

Assim:

$$t = \int_0^{\omega} J / (T_m - T_{cc}) \cdot d\omega \text{ para } T_m - T_c \neq 0$$

em que  $\omega$  = velocidade angular

No entanto, no ponto de regime  $T_m = T_{cc} \Rightarrow$ , a função  $J / (T_m - T_{cc})$  é descontínua e a integral não fica definida, assim, se fizermos uma integração numérica, por métodos dos trapézios por exemplo, não é possível considerar o ponto de regime (apenas um ponto próximo dele seria possível). Vamos então resolver de outra forma: tomemos vários pontos de  $\omega$ , em que calcularemos  $\alpha$ . No ponto de regime,  $t_{\text{regime}} = 0$ , em cada trecho, calcular o valor de  $\alpha$  médio e dado  $\Delta\omega$  conhecido calculamos o  $\Delta t$  correspondente. O tempo corrente  $t$  é a soma dos  $\Delta t$  anteriores. Quanto mais pontos das curvas tomarmos (quanto menor forem os  $\Delta\omega$ ), melhor será o resultado, mas é suficiente que a poligonal que une os pontos tomados represente bem o perfil da curva. Recomendando, então, concentrar mais pontos próximos

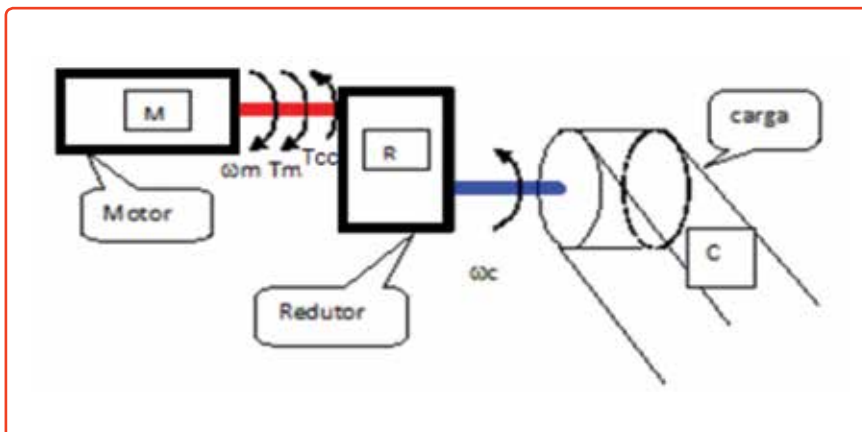


Figura 1 – Esquema mecânico.

ao ponto de pico de  $T_m$  e o fim da curva (ponto de  $T_m = 0$  na rotação síncrona) para uma boa representação da curva e boa detecção automática do ponto de regime.

### b) Elétrica

#### Modelagem dos sistemas em pu:

Obter as impedâncias em pu dos componentes do sistema de potência (equivalente à montante, cabos, transformadores, barramentos etc.) requer uma quantidade significativa de cálculos e, como são cálculos tradicionais de engenharia elétrica, vou omitir o formulário para não estender este artigo; o ideal é programá-los também. Todas as impedâncias são constantes, exceto a do motor que está partindo, a qual varia em função do escorregamento "s" (vide Figura 2), ou, em outras palavras, varia em função da velocidade angular ( $\omega$ ).

Pacotes de software de sistemas de potência prontos têm a vantagem de que a base de dados do sistema elétrico é única, assim, podem ser aproveitados os dados já inseridos para os estudos de curto-circuito, fluxo de carga, e outros, de forma que rodar o módulo de análise de partida fique simples e rápido. Normalmente, traz também dados orientativos de motores em banco de dados, que servem para estimativas enquanto não se tem dados reais dos fabricantes.

Resolução do circuito para cálculos de  $I=f(\omega)$  e  $V_{barras}=f(\omega)$

Para a realização destes cálculos e, levando em conta que pretendemos calcular em diversos pontos de  $\omega$  para poder apresentar curvas, é interessante desenvolver o programa aplicativo em um ambiente/linguagem que opere com números complexos diretamente, como o Matlab ou o Scilab (neste caso desenvolvi o programa no Scilab, cuja licença é gratuita).

### c) Relação entre cálculos mecânicos e elétricos e resumo da estratégia da solução

Vamos iniciar modelando o sistema elétrico, calculando as impedâncias e calculando as correntes e tensões para cada  $\omega$ . No aspecto mecânico, podemos corrigir o torque e a inércia da carga referindo ao eixo do motor caso exista redução.

Com a tensão nos terminais do motor para cada  $\omega$  calculada na etapa anterior pode-se então calcular o conjugado (torque) do motor para cada  $\omega$ . O tempo correspondente para atingir cada  $\omega$  é obtido com os cálculos mecânicos.

Os parâmetros calculados em função de  $\omega$  agora serão reportados em função do tempo.

A título de complemento incluí no cálculo uma análise da  $I_{2,t}$  (integral de  $i^2 \cdot dt$ ) da corrente no motor durante a partida para possibilitar uma comparação com o valor  $I_p^2 \cdot x_{t\text{mrb}}$  (quadrado da corrente de partida x tempo máximo de rotor bloqueado do

motor), considerando este último como um valor  $I_{2t}$  máximo. Isso dá uma noção comparativa simplificada e aproximada da solicitação térmica do motor durante a partida.

### d) Programa criado e exemplo executado

Segue o diagrama de blocos resumido do programa desenvolvido para esta análise eletromecânica de partida direta e um exemplo de aplicação, que foi uma análise realizada da partida de um soprador centrífugo na fase de projeto de uma planta industrial.

#### Legenda e definição das outras variáveis do diagrama:

[ X ] = indicação de um vetor ou seja conjunto de pontos tal que  $[X] = [x_1; x_2; x_3; \dots; x_n]$ ;

[Im] a  $V_{mn}$  = corrente do motor em cada ponto (velocidade)  $\omega$  à tensão nominal do motor;

$w = \omega$  = velocidade angular (na realidade a letra ideal seria " $\omega$ " = ômega, mas por problemas com disponibilidade de fontes com letras gregas em software editores, utilizei "w" e estou mantendo no diagrama desta forma);

$Z_m$  = impedância do motor =  $f(w)$ ;

alfa =  $\alpha$  = aceleração angular;

ireg = índice sequencial do ponto de rotação de regime permanente (após partida);

wreg = velocidade angular de regime permanente;

alfamed = aceleração angular média no trecho entre (i-1) e (i);

dt = intervalo de tempo entre pontos (i-1) e (i); t = tempo corrente e  $t_a$  = tempo de aceleração.

### QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA - LIMITES E NORMAS

Um dos principais impactos no sistema elétrico durante a partida de motores é a queda de tensão. Dependendo do país, pode ou não haver um limitante

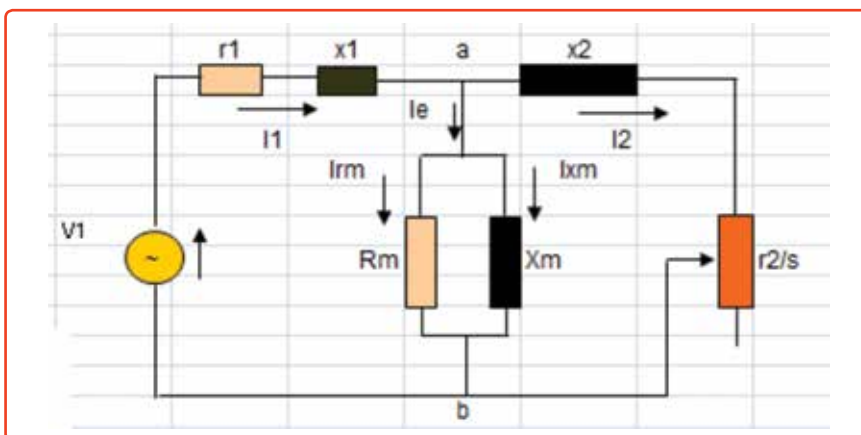
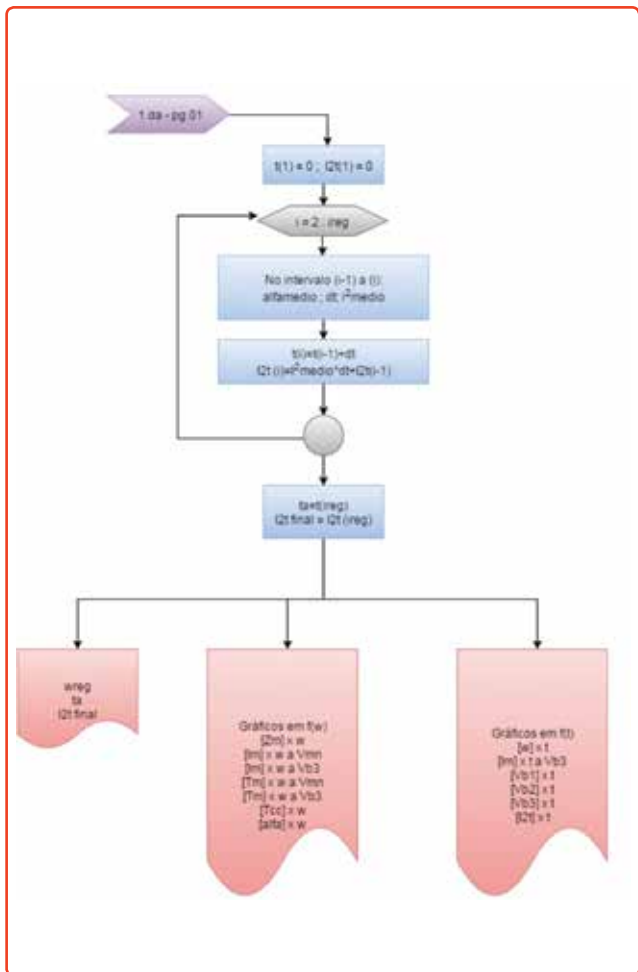
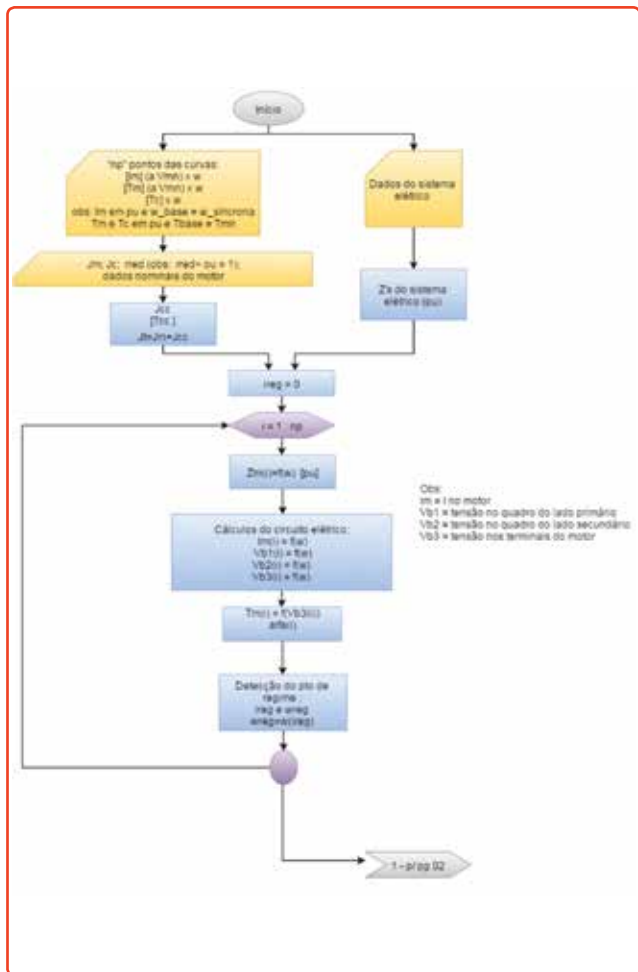


Figura 2 – Circuito equivalente do motor.

DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO DO PROGRAMA



normalizado. Seguem alguns aspectos sobre o tema:

- **Brasil (ABNT):** na ABNT NBR 5410:2004, que trata de instalações elétricas em baixa tensão, temos diversas prescrições e condições a analisar - recomendo ler/consultar os itens 6.5.1.2, 6.5.1.3 e também 6.2.7.1 e 6.2.7.3. Na ABNT NBR 14039:2005, que trata de média tensão, sugiro a consulta aos itens 6.2.7.1 e 6.2.7.2. Nas normas ABNT NBR 17094-1 e 2, que dizem respeito a máquinas elétricas girantes (motores de indução trifásico e monofásico, respectivamente) não há um limite para partida, mas o item 8.2 da ABNT NBR 17094-1:2013, por exemplo, descreve alguns requisitos para motores de baixa tensão durante a partida, em que se considera (referência) queda de tensão de 10% no motor, logo, conclui-se que para

esta norma, 10% no motor é aceitável, mas isso é apenas uma referência e não quer dizer que acima disso estaria proibido. O limite normalizado pode não ser facilmente identificado ou entendido e também há "aberturas" nas normas, em que não há limites para certos casos.

- A IEC 60364-5-52 não limita  $\Delta V$  na partida de motores (vide item 525 e "Annex-G" da norma).

- A NFPA 70 (NEC) também não limita. Há, porém, uma cláusula (item 695.7) para o caso de motor da bomba de incêndio apenas, em que o limite seria 15% no sistema de alimentação/controlado durante a partida desta bomba.

Com ou sem normalização sobre o tema, tenho visto exemplos e considerações de projetos de sistemas industriais (mesmo internacionais)

alimentados por transformador próprio (não de concessionária), adotando um limite de 10% no barramento do quadro que alimenta o motor que parte, considerando que cargas de iluminação derivadas destes quadros, comandos de painéis e outras podem ser sensíveis a quedas de tensões superiores.

Assim existe um consenso técnico de que é necessário minimizar esta perturbação.

*\*Edson Bittar Henriques é engenheiro eletricista pela Unesp – Ilha Solteira, é pós-graduado em Energia e Automação e proprietário da empresa de consultoria e engenharia Edson Bittar Henriques. [www.projebh.com](http://www.projebh.com)*

**CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO**  
Acompanhe todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)