

LORENA MARQUES TEIXEIRA

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO:
REGIME TRANSITÓRIO E
PERMANENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: PROF. DR. DIÓGENES PEREIRA GONZAGA

São Carlos
2009

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Iara e Nilton, que me deram a vida e ensinaram a vivê-la com dignidade.

A você mãe, que ilumina minha vida com amor e dedicação e a você pai (*in memoriam*), pelo exemplo de ser humano, força de vontade e pelo apoio incondicional de sempre que me ajudam a prosseguir sem medo.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela vida e a possibilidade de trilhar esse caminho, por propiciar tantas oportunidades de estudos e por colocar em meu caminho pessoas amigas e preciosas.

AS MINHAS AMIGAS, as de Itumbiara, Goiânia e São Carlos, com quem dividi tantos momentos especiais. Vocês fazem parte da minha história e mesmo estando a alguns quilômetros de distância serão sempre muito importantes.

ÀOS MEUS AMIGOS de graduação pelo coleguismo e companheirismo nesses anos em que convivemos diariamente.

A MINHA FAMÍLIA, em especial aos meus avós Iraci e Arédio e ao meu Tio Nilson, que se mantiveram incansáveis em suas manifestações de apoio e carinho.

Em especial AO MEU NAMORADO, Rodolfo Yamashita, que por meio de incentivo e carinho me apoiou como ninguém nessa etapa. Foi ouvinte em todos os meus momentos de ansiedade e me ajudou a superar várias dificuldades para a conclusão deste trabalho.

AO MEU ORIENTADOR, um agradecimento carinhoso por todos os momentos de paciência, compreensão e competência.

A UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, pela oportunidade.

Enfim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para que este percurso pudesse ser concluído.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura de um motor de indução fechado..... | 3 |
| Figura 2 – Enrolamento de campo de um motor de indução: (a) execução dos enrolamentos; (b) núcleo com enrolamento completo..... | 4 |
| Figura 3 – Enrolamento de armadura de um MIT rotor de gaiola | 4 |
| Figura 4 – Enrolamento de armadura de um MIT com rotor bobinado | 5 |
| Figura 5 – Campo magnético em um motor de dois pólos | 5 |
| Figura 6 – Gráfico Conjugado x Velocidade..... | 7 |
| Figura 7 – Categorias do MIT | 8 |
| Figura 8 – Rotor a VAZIO: (a) Circuito simplificado e (b) Circuito completo. | 11 |
| Figura 9 – Rotor Bloqueado: (a) Circuito simplificado e (b) Circuito completo..... | 12 |
| Figura 10 – Circuito Equivalente Final | 14 |
| Figura 11 – Esquema do M.I.T. simétrico..... | 16 |
| Figura 12 – Eixos magnéticos dos enrolamentos trifásicos e dq (bifásicos). | 18 |
| Figura 13 - Tela de Apresentação..... | 23 |
| Figura 14 – Tela de entrada dos dados..... | 25 |
| Figura 15 – Tela de erro para simulação não disponível..... | 26 |
| Figura 16 – Tela de aviso da disponibilidade simulação | 26 |
| Figura 17 – Simulação MIT | 27 |
| Figura 18 – resultados em Regime Permanente | 28 |
| Figura 19 – Comand Dialog SIMNON | 29 |
| Figura 20 – Característica do Torque Eletromagnético do motor | 30 |
| Figura 21 – Velocidade do motor | 31 |
| Figura 22 – Corrente no eixo direto do estator em vazio | 32 |
| Figura 23 – Corrente no eixo em quadratura do estator em vazio..... | 32 |
| Figura 24 – Corrente no eixo direto do rotor em vazio | 33 |
| Figura 25 – Corrente no eixo em quadratura do rotor em vazio | 33 |

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um software para facilitar a análise do desempenho de Motores de Indução Trifásico a partir dos dados do circuito equivalente. O software possui uma interface amigável onde o usuário, para análise em Regime Permanente entra com os dados do circuito equivalente extraídos em laboratório e então é emitido um relatório com os dados de desempenho do motor. Caso também seja de interesse analisar o motor em Regime Transitório é necessário entrar com alguns dados adicionais do motor a ser analisado então é gerado um arquivo para facilitar a análise utilizando o software SIMNON[®]. É mostrado no trabalho todo o equacionamento do modelo e resultado de algumas simulações. O método proposto e a implementação computacional garantem resultados precisos e confiáveis.

Palavras chaves: Circuito Equivalente, Motor de Indução Trifásico, Regime Permanente, Regime Transitório, SIMNON[®].

Abstract

This work presents the development of software to facilitate the performance analysis of three phase induction motors from the data of the equivalent circuit. The software has a friendly interface where the User for steady state analysis enters the data of the equivalent circuit extracted in the laboratory and a report on the performance data. If is also of interest to analyze in the transitional regime is necessary to enter some additional data from the engine to be analyzed then generate a file to facilitate analysis with the software SIMNON ®. You will also see the solution of the model and results of some simulations. The proposed method and computational implementation ensures accurate and reliable results.

Key words: Equivalent Circuit, Three Phase Induction Motor, Steady State, Permanent Employment, Transitional Regime, SIMNON ®.

Sumário

| | |
|---|------------|
| DEDICATÓRIA..... | ii |
| AGRADECIMENTOS | iii |
| LISTA DE FIGURAS | iv |
| Resumo | v |
| Abstract..... | vi |
| Sumário | vii |
| Capítulo 1 | 1 |
| Introdução | 1 |
| Capítulo 2 | 3 |
| O Motor de Indução Trifásico | 3 |
| 2.1 Características Construtivas..... | 3 |
| 2.2 Princípio de Funcionamento | 5 |
| 2.3 Curva Conjugado x Velocidade | 7 |
| 2.4 Categorias..... | 8 |
| Capítulo 3 | 10 |
| Determinação dos Parâmetros de um MIT Simétrico..... | 10 |
| 3.1 Parâmetros..... | 10 |
| 3.2 Procedimento | 10 |
| 3.2.1 Determinação de R_1 :..... | 10 |
| 3.2.2 Teste em VAZIO | 10 |
| 3.2.3 Teste com o ROTOR BLOQUEADO | 11 |
| Capítulo 4 | 15 |
| Modelagem do MIT para utilização do SIMNON..... | 15 |
| 4.1 Equacionamento | 15 |
| 4.1.1 Sistema colocado na forma de Equação de Estados | 19 |
| 4.2 Programa fonte no SIMNON..... | 22 |
| Capítulo 5 | 23 |
| Análise de desempenho do MIT..... | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1 Desenvolvimento da interface gráfica..... | 23 |
| 5.1.1 Tela de apresentação | 23 |
| 5.1.2 Tela principal – Dados de Entrada | 24 |
| 5.1.3 Tela de Resultados | 26 |
| 5.2 Análise em Regime Permanente | 27 |
| 5.3 Regime transitório | 29 |
| Capítulo 6 | 34 |
| Conclusão | 34 |
| Referências Bibliográficas | 35 |
| APÊNDICE | 36 |

Capítulo 1

Introdução

As máquinas de corrente alternada, em particular, as máquinas de indução, foram inventadas no século XIX, em torno de 1880, e sua evolução foi bastante rápida. Logo as máquinas de indução se tornaram o principal tipo de conversor eletromecânico, favorecendo a proliferação dos sistemas de corrente alternada. Essa posição de liderança das máquinas de indução nos mais diversos setores de atividade, particularmente na indústria, é mantida ainda hoje e deverá perdurar por bastante tempo. As máquinas de indução são robustas construtivamente, apresentam elevado rendimento e custo inicial baixo [1]. Sua vida útil é projetada para um período de 20 anos, mas se forem utilizados dentro das especificações de projeto podem durar muito mais tempo [2].

O motor de indução trifásico (MIT) de rotor tipo gaiola é o tipo dominante no mercado de motores elétricos, e participa com mais de 97% das unidades vendidas. Aos motores de indução trifásicos cabe uma parcela importante do total da energia elétrica consumida no Brasil, cerca de 25%, sendo uma carga representativa tanto no setor industrial com 49% referente à força motriz, segundo dados do PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia, como no setor comercial. Portanto, ações de conservação de energia nestes equipamentos revelam-se de grande importância.

Em 17 de outubro de 2001, foi sancionada a lei número 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, que prevê o estabelecimento de índices mínimos de eficiência energética, ou níveis máximos de consumo específico de energia para máquinas e aparelhos consumidores de energia, fabricados e comercializados no país. O motor elétrico de indução trifásico foi selecionado como o primeiro aparelho consumidor de energia a ser regulamentado.

Sendo cada vez maior o interesse na aplicação do MIT, é necessária a análise mais cuidadosa do comportamento e desempenho desse tipo de motor [2], evitando assim motores sobre dimensionados, que provocam uma considerável perda de energia. Neste sentido, a modelagem matemática do motor é fundamental para esta análise. Atualmente, devido à grande capacidade computacional disponível, são implementados algoritmos de identificação de parâmetros mais precisos e confiáveis.

O circuito equivalente do MIT é um primeiro passo para se obter uma análise do desempenho e especificação do motor [2]. Além disso, com o circuito equivalente, é possível calcular, correntes, perdas, conjugado. Esta análise do MIT é muito

importante para uma melhor descrição do motor, que contribui para uma maior eficiência energética [3].

Diante do exposto vê-se a necessidade de desenvolvimento de um software para facilitar a análise do desempenho de Motores de Indução Trifásico. Neste trabalho isto é feito a partir dos dados do circuito equivalente com uma interface amigável para facilitar ao usuário o *input* de dados. Com a interface desenvolvida é possível que o usuário visualize vários parâmetros analisados em Regime Permanente, além disso é gerado um arquivo para possibilitar o ensaio em Regime Transitório com o software SIMNON.

A apresentação deste trabalho está dividida em 6 capítulos. O capítulo 2, seguinte a este dá um entendimento geral do Motor de Indução Trifásico. No capítulo 3 é demonstrado como se chega aos parâmetros do motor e no capítulo 4 é feita a modelagem do motor para análise utilizando software de simulação de sistemas físicos. Temos no capítulo 5 a apresentação dos resultados das análises de desempenho para Regime Permanente e Transitório. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta a conclusão do projeto e futuros estudos a serem realizados.

Capítulo 2

O Motor de Indução Trifásico

2.1 Características Construtivas

Com base em [4], a Figura 1 mostra a estrutura de motor de indução, que compreende:

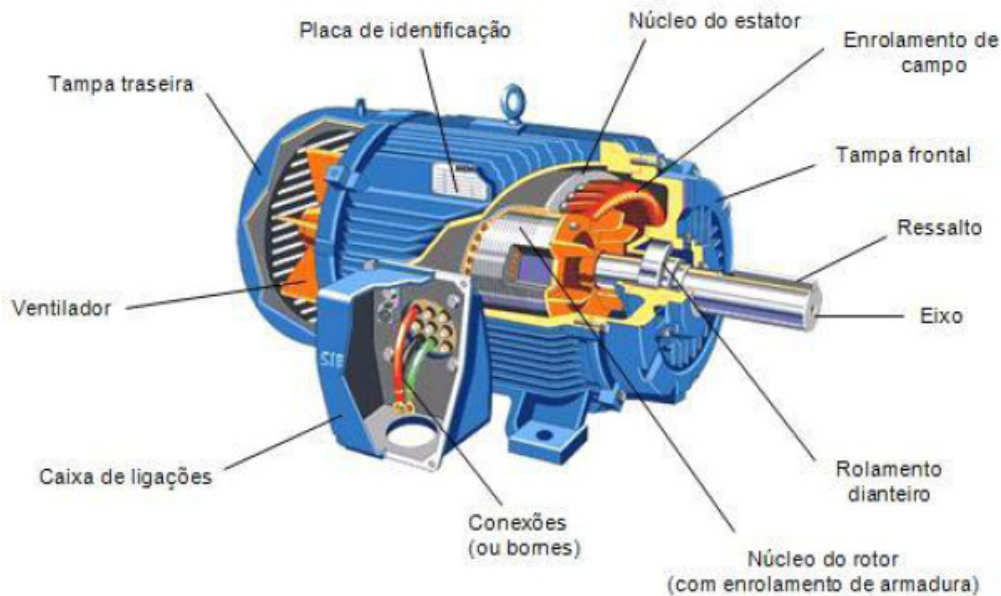


Figura 1 – Estrutura de um motor de indução fechado

As máquinas elétricas rotativas são constituídas de duas partes:

- a) o estator que é a parte fixa;
- b) o rotor que é a parte móvel.

2.1.1 Estator

É construído com chapas de material magnético e recebe o enrolamento de campo, cujas espiras são colocadas em ranhuras, como mostra a Figura 2.

Aí se situa o enrolamento de campo, que pode ser mono ou trifásico. A maneira como esse enrolamento é construído determina o número de pólos do motor, entre outras características operacionais. Suas pontas (terminais) são estendidas até uma caixa de terminais, onde pode ser feita a conexão com a rede elétrica de alimentação.

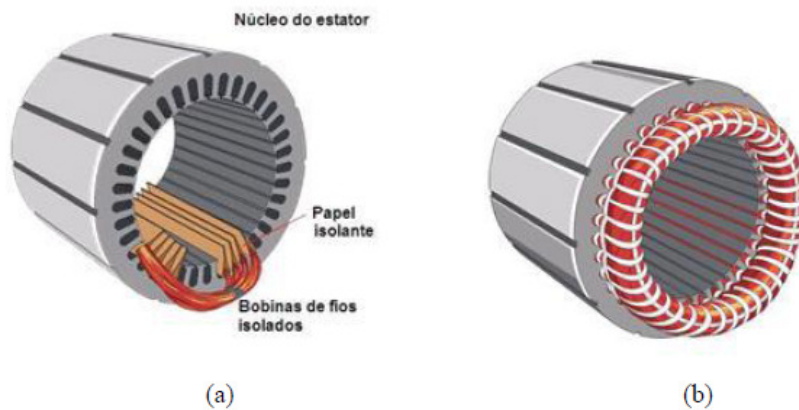


Figura 2 – Enrolamento de campo de um motor de indução: (a) execução dos enrolamentos; (b) núcleo com enrolamento completo [4]

2.1.2 Rotor

O rotor do motor de indução pode ser de 2 tipos :

- a) Rotor em gaiola de esquilo ou rotor em curto: Os condutores (ou bobinas) são constituídos por barras de cobre ou alumínio colocadas em ranhuras.

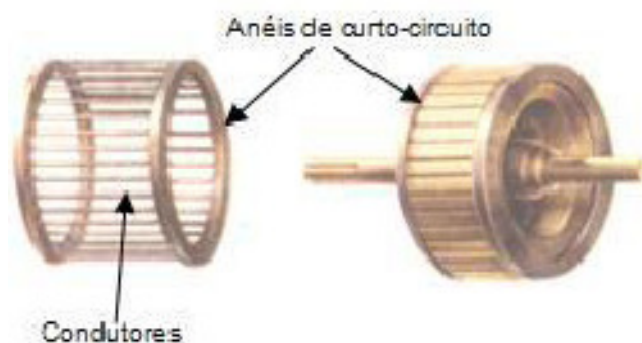


Figura 3 – Enrolamento de armadura de um MIT rotor de gaiola

Nas duas extremidades das barras existem 2 anéis curto-circuitando todas as barras. Esta estrutura é semelhante a uma gaiola de esquilo (EUA, "*Squirrel Cage*").

Conforme já dito anteriormente é o tipo de rotor mais empregado (mais barato e não requer manutenção elétrica).

- b) Rotor bobinado ou rotor de anéis: A construção de um rotor bobinado é muito mais cara que um rotor em gaiola, e é executada quando se deseja a variação da velocidade da máquina. Um motor de rotor bobinado é possível controlar-se através da corrente que circula no rotor além da velocidade conjugado do mesmo.

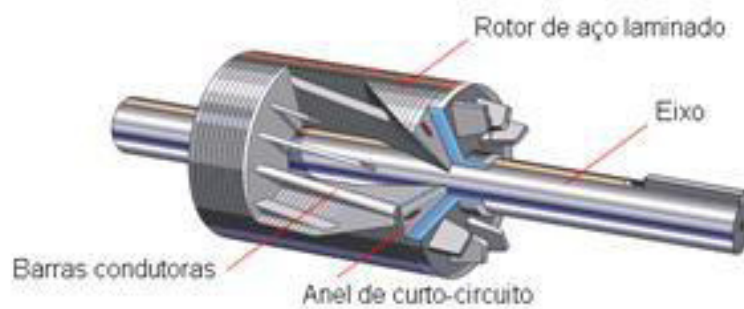
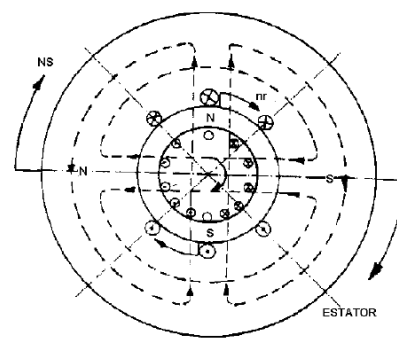


Figura 4 – Enrolamento de armadura de um MIT com rotor bobinado

2.2 Princípio de Funcionamento

O funcionamento do motor de indução baseia-se no princípio da formação de um campo magnético produzido pelos enrolamentos do estator.



n_s = velocidade síncrona do campo

n_r = vel. do campo girante do rotor

motor de 2 pólos

Figura 5 – Campo magnético em um motor de dois pólos

O fluxo magnético girante aparece no estator devido as correntes alternadas circulantes nas bobinas do estator. Este fluxo magnético do estator se desloca em relação ao rotor, cortando as barras do rotor induzindo tensões (Lei de Faraday e Lenz) que farão circular correntes também alternadas no rotor. Como as correntes do rotor têm polaridades contrárias do estator (Lei de Faraday e Lenz), cria-se também no rotor um campo magnético girante que será atraído e arrastado pelo campo girante do estator.

Desenvolve-se assim um conjugado mecânico no rotor levando o mesmo a girar. A velocidade do rotor (n) é sempre menor que a velocidade do campo girante do estator (n_s), também chamada velocidade síncrona. Se o rotor fosse levado até a velocidade síncrona ($n = n_s$), não haveria mais velocidade relativa entre os campos girantes do estator e do rotor e conseqüentemente a tensão induzida cessaria, não

haveria mais corrente no rotor, o conjugado mecânico diminuiria e o rotor automaticamente perderia velocidade ($n_r < n_s$), então, novamente o rotor iria adquirir o conjugado.

A operação do motor girando sem carga denomina-se operação em vazio. A medida que se coloca carga no eixo a tendência da velocidade é diminuir para compensar o conjugado resistente da carga.

A operação do motor com carga é denominada operação em regime permanente.

A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é chamada de velocidade de escorregamento (n_e):

$$\begin{aligned}n_e &= n_s - n \\n_s &= \text{velocidade síncrona} \\n &= \text{velocidade do rotor.}\end{aligned}$$

Assim, o *escorregamento* s é definido por:

$$s(\%) = \left(\frac{n_s - n}{n_s} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. 01}$$

$$n = (1 - s) \cdot n_s \text{ [RPM]} \quad \text{Eq. 02}$$

Sendo que s para motores de indução de gaiola é de 2 a 5%.

A velocidade síncrona (n_s) é dado por

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \text{ [rpm]} \quad \text{Eq. 03}$$

onde:

f = frequência em hertz

p = número de pólos.

Podemos variar a velocidade n_s e, conseqüentemente, n variando-se o número de pólos p (alterando-se construtivamente as bobinas do estator) ou variando-se a frequência (eletronicamente por inversores).

para $f = 60\text{Hz}$

Tabela 1

| p | 2 | 4 | 6 | 8 |
|-------------------|------|------|------|-----|
| $n_s(\text{rpm})$ | 3600 | 1800 | 1200 | 900 |

OBS.: O motor de indução normalmente é empregado onde se deseja uma velocidade constante próxima da velocidade síncrona n_s .

Quando se deseja um motor de grande porte com velocidade amplamente variável, podemos aplicar as seguintes soluções:

- a) motor de corrente contínua (metrô, trens, veículos elétricos);
- b) motor de rotor bobinado;
- c) motor de gaiola acionado através de *conversores de frequência* (inversores que controlam eletronicamente a *tensão* e a *frequência* aplicada ao motor).

2.3 Curva Conjugado x Velocidade

O motor de indução tem um conjugado nulo à velocidade síncrona ($n=n_s$) \rightarrow $s=0$ e $T=0$.

A medida que é aumentada a carga no eixo do motor, a sua velocidade diminui até um ponto onde o conjugado desenvolvido é máximo.

Qualquer acréscimo de carga além desse ponto ($T_{\text{máx}} \rightarrow$ Região de operação instável) faz com a velocidade caia bruscamente, podendo algumas situações travar o rotor.

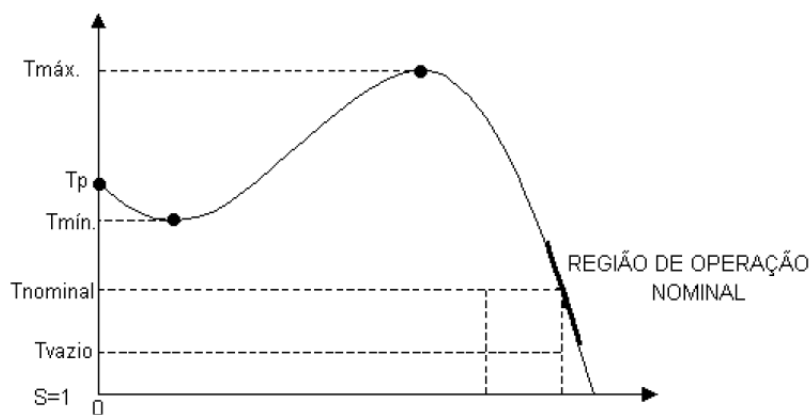


Figura 6 – Gráfico Conjugado x Velocidade

Sendo:

T_p = conjugado de partida: é o conjugado com o motor travado, ou torque desenvolvido na partida do motor.

T_{\min} = conjugado mínimo: é o menor valor de conjugado obtido desde velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

T_{\max} = conjugado máximo: é o máximo valor de conjugado que o rotor pode desenvolver *sem travar o eixo*.

T_{nominal} = conjugado nominal: é o conjugado que o motor fornece com carga nominal no eixo. Normalmente T_{nominal} ocorre com S entre 2 e 5%.

T_{vazio} = conjugado para o motor operando sem carga. Representa o conjugado sem carga no eixo.

2.4 Categorias

De acordo com as formas construtivas do rotor de motores de indução de gaiola podem apresentar diferentes características de conjugado e corrente de partida conforme o gráfico:

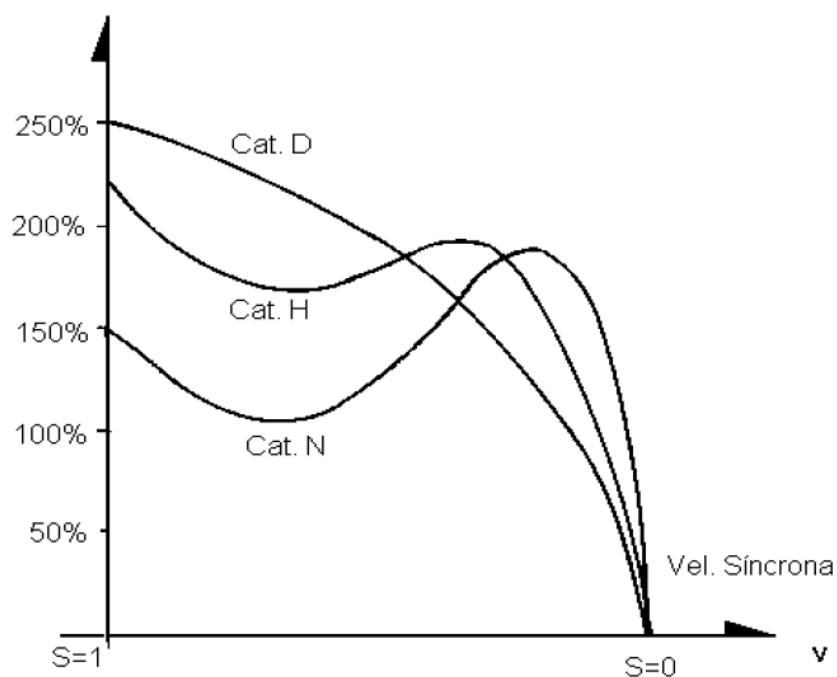


Figura 7 – Categorias do MIT

- a) Categoria N: conjugado de partida T_p normal; corrente de partida I_p normal (6 a 7 x I_{nominal}); Escorregamento baixo ($2\% \leq S \leq 5\%$). Nesta categoria se enquadram a maioria dos motores que acionam cargas normais tais como: bombas centrífugas, máquinas operatrizes. O rotor possui gaiola única.

- b) Categoria H: conjugado de partida T_p alto; corrente de partida I_p normal; escorregamento baixo. São motores adequados para cargas com elevada inércia, como: peneiras e transportadoras - carregadoras. O rotor é de Dupla Gaiola.
- c) Categoria D: T_p alto; I_p normal; Salto (maior que 5%), motores para cargas que apresentam picos intermitentes, tais como: prensas excêntricas, tesouras e elevadores.

Capítulo 3

Determinação dos Parâmetros de um MIT Simétrico

3.1 Parâmetros

Para possibilitar a análise do motor de indução trifásico se faz necessária a determinação dos parâmetros usados no circuito equivalente, são eles:

- r_1 : resistência elétrica por fase do enrolamento do estator do MIT;
- r_2 : resistência elétrica do enrolamento do rotor do MIT.
- x_1 : reatância de dispersão do enrolamento do estator do MIT;
- x_2 : reatância de dispersão do enrolamento do rotor do MIT;
- x_m : reatância de magnetização do MIT;

3.2 Procedimento

Existe mais de uma forma de se extrair estes parâmetros em laboratório, aqui vamos explicar um dos métodos que foi o método utilizado para o motor do exemplo.

3.2.1 Determinação de R_1 :

Aplica-se uma tensão contínua V a uma das fases do MIT, elevando-a até que se atinja uma corrente igual à corrente nominal do MIT (I_N), daí:

$$r_1 = \frac{V}{I_N} \quad \text{Eq. 04}$$

Esta medida é feita em *corrente contínua*, pois em corrente alternada o efeito pelicular irá se manifestar. Num tópico mais à frente este efeito será introduzido no valor de r_2 e isto será justificado [1].

3.2.2 Teste em VAZIO

Com o MIT em vazio, ou seja, girando apenas a si próprio, aplica-se uma tensão alternada de linha, V_L , de modo que cada fase fique sob tensão nominal. Mede-se a corrente de linha I_L e a potência trifásica total P_T , pelo Método dos Dois Wattímetros [4].

A partir dos valores V_L , I_L e P_T são determinados os valores por fase V_o , I_o e P_o , para o que é necessário saber se o MIT está ligado em Δ ou Y.

Considere os circuitos representativos do MIT a VAZIO das figuras 8(a) e 8(b). Da equivalência deles resultam as Eqs. 5(a), (b) e (c).

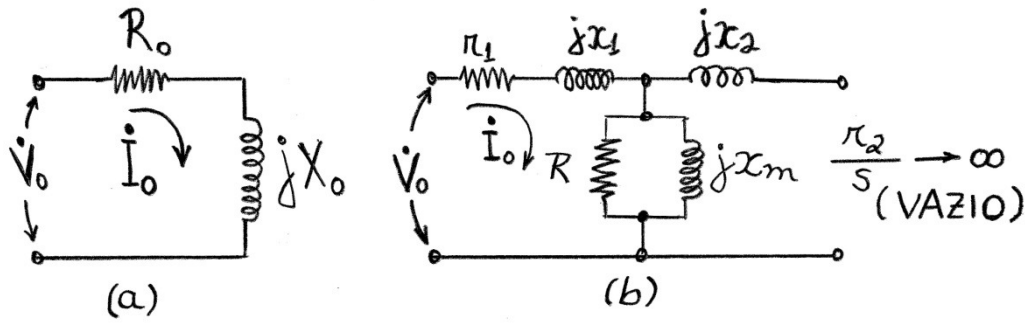


Figura 8 – Rotor a VAZIO: (a) Circuito simplificado e (b) Circuito completo.

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} \quad (a) \quad Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (b) \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (c) \quad \text{Eqs.05}$$

Igualando-se as impedâncias dos dois circuitos, resulta a Eq.3.

$$X_0 = \frac{x_m}{1 + (x_m / R)^2} + x_1 \cong x_m + x_1 \quad \text{pois } R \gg x_m \quad \text{Eq. 06}$$

A medida de potência P_T inclui as perdas em r_1 mais as perdas P_r relativas ao atrito viscoso (mancais e ventilação) e perdas no núcleo ferromagnético (por Histerese e por correntes de Foucault), constituindo-se na potência dissipada em R , como mostra a Eq. 07, também chamada de *Perdas Suplementares*.

$$P_r = P_T - 3r_1 I_0^2 \quad \text{Eq. 07}$$

3.2.3 Teste com o ROTOR BLOQUEADO

Nestas circunstâncias, é aplicada uma tensão de linha V_{LB} de modo que circule corrente nominal I_{LB} . Mede-se então a potência trifásica total P_{TB} . A partir dos valores V_{LB} , I_{LB} e P_{TB} são determinados os valores por fase V_B , I_B e P_B , sabendo-se se o motor está ligado em Δ ou Y .

Considere os circuitos das figuras 9. A equivalência entre os circuitos das figuras 9(a) e 9(b) é justificada por considerarem-se nulas as *Perdas Suplementares* no Teste com o ROTOR BLOQUEADO, o que leva às Eqs. 8 (a), (b) e (c).

$$R_b = \frac{P_B}{I_B^2} \quad (a) \quad Z_B = \frac{V_B}{I_B} \quad (b) \quad X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} \quad (c) \quad \text{Eqs.08}$$

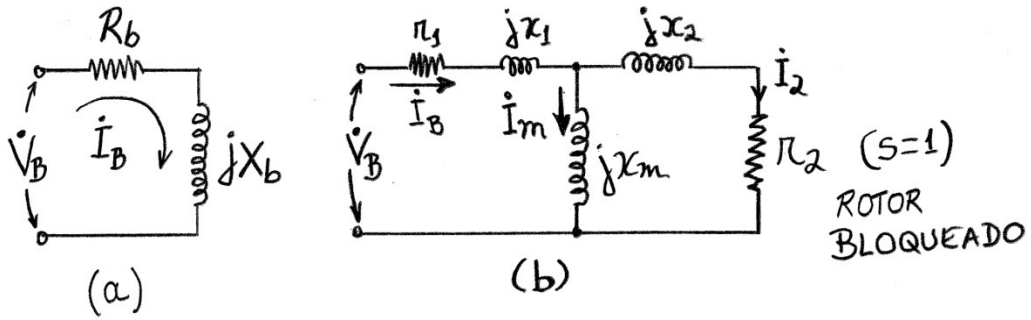


Figura 9 – Rotor Bloqueado: (a) Circuito simplificado e (b) Circuito completo.

Do circuito da Fig. 9(a), tem-se:

$$\dot{V}_B = (R_b + jX_b) \dot{I}_B \quad \text{Eq. 9}$$

E do circuito da Fig. 9(b), têm-se as Eqs. 10 (a), (b), (c) e (d).

$$\dot{V}_B = (r_1 + jx_1) \dot{I}_B + jx_m \dot{I}_m \quad (a)$$

$$jx_m \dot{I}_m = (r_2 + jx_2) \dot{I}_2 \quad (b)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_B - \dot{I}_m \quad (c)$$

$$\dot{I}_m = \frac{r_2 + jx_2}{r_2 + j(x_2 + x_m)} \dot{I}_B \quad (d)$$

Substituindo-se a Eq. 10(d) na (b), resulta na Eq. 10(e).

$$\dot{V}_B = \frac{r_2 x_m^2}{r_2^2 + (x_2 + x_m)^2} + j \left\{ x_1 + x_m \left[\frac{r_2^2 + x_2(x_2 + x_m)}{r_2^2 + (x_2 + x_m)^2} \right] \right\} \quad (e)$$

Comparando-se as Eqs. 10(e) e (a) chega-se à Eq. 11.

$$R_b = r_1 + \frac{r_2 x_m^2}{r_2^2 + (x_2 + x_m)^2} \cong r_1 + r_2 \left(\frac{x_m}{x_2 + x_m} \right)^2 \quad \text{Eq. 11}$$

$$\text{e } X_b = x_1 + x_m \left[\frac{r_2^2 + x_2(x_2 + x_m)}{r_2^2 + (x_2 + x_m)^2} \right] \cong x_1 + x_2 \left(\frac{x_m}{x_2 + x_m} \right)$$

Eq. 12

pois em ambos os casos $x_m + x_2 \gg r_2$.

Considerando-se o fator $k = \frac{x_m}{x_2 + x_m}$ nas expressões anteriores, fica então um sistema de 4 equações, com 5 incógnitas a obter-se: x_m , x_1 , x_2 , r_2 e k . Um método com bases empíricas considera a equação $x_1 = \alpha x_2$ onde α é dado por:

Tabela 2

| α | CATEGORIA DO MOTOR |
|----------|--------------------|
| 1,0 | ROTOR BOBINADO |
| 0,67 | B (N) |
| 0,43 | C (H) |
| 1,0 | D (D) |

Observação: as letras entre parênteses referem-se à Norma NBR7094 da ABNT.

Assim, trabalhar-se-á com as seguintes 5 equações:

$$X_0 = x_m + x_1 \quad \text{Eq. 13}$$

$$R_b = r_1 + k^2 r_2 \quad \text{Eq. 14}$$

$$X_b = x_1 + k x_2 \quad \text{Eq. 15}$$

$$k = \frac{x_m}{x_m + x_2} \quad \text{Eq. 16}$$

$$x_1 = \alpha x_2 \quad \text{Eq. 17}$$

Cujas soluções permitem montar-se o circuito equivalente do MIT por fase e obter-se seu desempenho em regime permanente.

A obtenção da potência útil no eixo P_{eixo} do MIT, dada pela Eq. 19, é obtida subtraindo-se as perdas suplementares P_r da Eq. 4, da potência mecânica interna P_i dada pela Eq. 18.

$$P_i = \frac{1-s}{s} r_2 I_2^2 \quad \text{Eq. 18}$$

Onde s é o escorregamento do MIT.

$$P_{eixo} = P_i - P_r = n T_{eixo} \quad \text{Eq. 19}$$

Onde

$n = n_s (1-s)$ velocidade angular do eixo do MIT

$$n_s = \frac{120f}{p} \text{ (rpm)} = \frac{4\pi f}{p} \text{ (rad./s)} = \text{velocidade síncrona}$$

e T_{eixo} = torque ou conjugado útil no eixo do MIT.

Como se tem conhecimento de P_r , então no circuito equivalente nem é utilizada R , que representa estas perdas. O circuito fica como na figura 3.

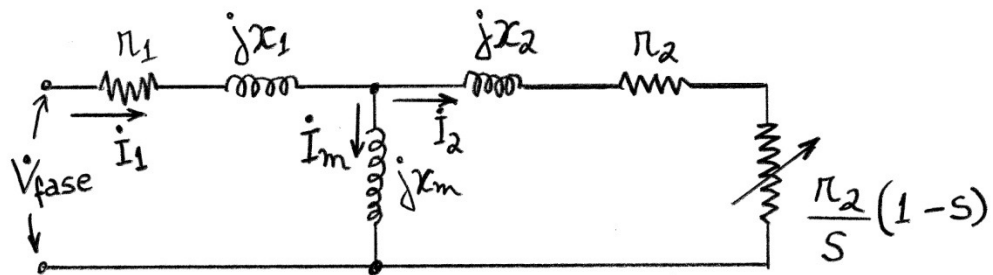


Figura 10 – Circuito Equivalente Final

Estes serão dados de entrada do software para possibilitar a análise de desempenho do motor.

Capítulo 4

Modelagem do MIT para utilização do SIMNON

O *software* SIMNONTM, como pode ser visto em [5], é muito útil na resolução numérica de equações diferenciais lineares, principalmente aquelas com coeficientes variantes no tempo [6] e, também, não lineares, que modelam sistemas físicos, como por exemplo, as máquinas elétricas. Tais sistemas de equações diferenciais são de difícil, ou até impossível, resolução. Neste trabalho é analisado o Motor de Indução Trifásico (M.I.T.) simétrico, ou seja, a máquina em si é uma carga trifásica equilibrada, alimentada por uma fonte de tensão simétrica. Os estudos foram realizados com base em [7], onde está todo o desenvolvimento das equações consideradas. A seguir é feita uma apresentação resumida das partes mais importantes para este trabalho.

4.1 Equacionamento

As equações que constituem o modelo matemático do M.I.T. foram obtidas por meio do *método dos circuitos elétricos magneticamente acoplados*, como é visto em [8]. Todas as equações de tal modelo partem da equação 20, [1].

$$v(t) = r i(t) + \frac{d\lambda(t, \theta)}{dt} \quad \text{Eq. 20}$$

Onde:

- $v(t)$ tensão terminal da fase considerada (V)
- $i(t)$ corrente que circula na fase considerada (A)
- r resistência elétrica da fase considerada (Ω)
- $\lambda(t, \theta)$ fluxo total concatenado com a fase considerada (Weber) (inclui as contribuições das outras duas fases do mesmo enrolamento e das três fases do outro enrolamento) [7].
- a parcela $\frac{d\lambda(t, \theta)}{dt}$ representa a *força contra eletromotriz* induzida na bobina da fase considerada.

Considere, então, o M.I.T. simétrico esquematizado na forma de circuito magneticamente acoplado mostrado na Fig. 11.

*SIMNON é um produto da SSPA, Suécia, registrados e uma marca comercial do Departamento de Controle Automático, Instituto de Tecnologia de Lund, na Suécia.

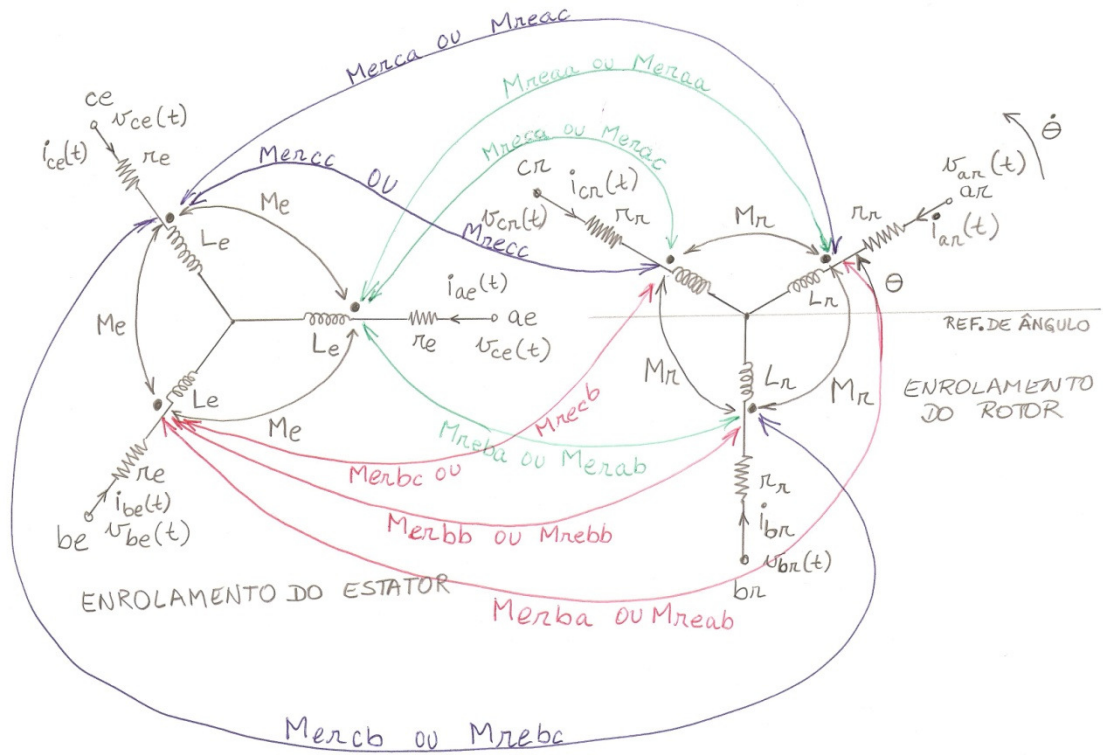


Figura 11 – Esquema do M.I.T. simétrico.

Na Fig. 11, o ângulo θ representa a posição angular do eixo magnético da fase a do rotor em relação à fase a do estator e $\dot{\theta}$ representa a velocidade angular do eixo mecânico do rotor em relação ao estator. O esquema mostrado dá indicativos de que cada equação de tensão e corrente por fase terá um termo resistivo e mais cinco termos do tipo f.e.m. induzidas, relativos às indutâncias próprias e mútuas de cada enrolamento e inter-enrolamentos. Assim, as Eqs. 21 mostram as expressões que relacionam tensão e corrente das fases a , b e c do enrolamento do estator.

$$v_{ae}(t) = r_e i_{ae}(t) + \frac{d\lambda_{ae}(t, \theta)}{dt} = r_e i_{ae}(t) + \frac{d}{dt} [L_e i_{ae}(t) + M_e i_{be}(t) + M_e i_{ce}(t)] + \frac{d}{dt} [M_{reaa}(\theta) i_{ar}(t) + M_{reba}(\theta) i_{br}(t) + M_{reca}(\theta) i_{cr}(t)] \quad (a)$$

$$v_{be}(t) = r_e i_{be}(t) + \frac{d\lambda_{be}(t, \theta)}{dt} = r_e i_{be}(t) + \frac{d}{dt} [M_e i_{ae}(t) + L_e i_{be}(t) + M_e i_{ce}(t)] + \frac{d}{dt} [M_{reab}(\theta) i_{ar}(t) + M_{rebb}(\theta) i_{br}(t) + M_{recb}(\theta) i_{cr}(t)] \quad (b)$$

$$v_{ce}(t) = r_e i_{ce}(t) + \frac{d\lambda_{ce}(t, \theta)}{dt} = r_e i_{ce}(t) + \frac{d}{dt} [M_e i_{ae}(t) + M_e i_{be}(t) + L_e i_{ce}(t)] + \frac{d}{dt} [M_{reac}(\theta) i_{ar}(t) + M_{rebc}(\theta) i_{br}(t) + M_{recc}(\theta) i_{cr}(t)] \quad (c)$$

Já as Eqs. 22 mostram as expressões que relacionam tensão e corrente das fases *a*, *b* e *c* do enrolamento do rotor.

$$v_{ar}(t) = r_r i_{ar}(t) + \frac{d\lambda_{ar}(t, \theta)}{dt} = r_r i_{ar}(t) + \frac{d}{dt} [L_r i_{ar}(t) + M_r i_{br}(t) + M_r i_{cr}(t)] + \frac{d}{dt} [M_{eraa}(\theta) i_{ae}(t) + M_{erba}(\theta) i_{be}(t) + M_{erca}(\theta) i_{ce}(t)] \quad (a)$$

$$v_{br}(t) = r_r i_{br}(t) + \frac{d\lambda_{br}(t, \theta)}{dt} = r_r i_{br}(t) + \frac{d}{dt} [M_r i_{ar}(t) + L_r i_{br}(t) + M_r i_{cr}(t)] + \frac{d}{dt} [M_{erab}(\theta) i_{ae}(t) + M_{erbb}(\theta) i_{be}(t) + M_{ercb}(\theta) i_{ce}(t)] \quad (b)$$

$$v_{cr}(t) = r_r i_{cr}(t) + \frac{d\lambda_{cr}(t, \theta)}{dt} = r_r i_{cr}(t) + \frac{d}{dt} [M_r i_{ar}(t) + M_r i_{br}(t) + L_r i_{cr}(t)] + \frac{d}{dt} [M_{erac}(\theta) i_{ae}(t) + M_{erbc}(\theta) i_{be}(t) + M_{ercc}(\theta) i_{ce}(t)] \quad (c)$$

Eq. 22

As Eqs. 23 e 24 mostram, respectivamente, as expressões do torque eletromagnético desenvolvido pelo M.I.T. simétrico e da dinâmica do conjunto M.I.T./Carga.

$$T_{el} = \frac{1}{2} [i]_{abc}^T \frac{\partial}{\partial \theta} [L(\theta)] [i]_{abc} \quad \text{Eq. 23}$$

Onde T_{el} é o torque eletromagnético; $L(\theta)$ é uma matriz 6x6 que, segundo [7], inclui ordenadamente todas as indutâncias próprias e mútuas do M.I.T. simétrico.

$$T_{el} - D \frac{d\theta}{dt} - T_{CARGA} = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad \text{Eq. 24}$$

Onde D é o coeficiente de atrito viscoso, J é o momento de inércia e T_{CARGA} é o torque de carga.

A Fig. 12 representa um esquema do M.I.T. simétrico, com todos os eixos magnéticos de seus enrolamentos, numa estrutura trifásica simétrica e na bifásica em eixos *dq* ortogonais localizados no *campo girante* (estrutura síncrona) em que será representado o motor, como é visto nas Eqs. 22. A transformação realizada, que é vista nas Eqs.21, leva em conta a *invariância de potência*, que é uma extensão da Transformação de Park [7].

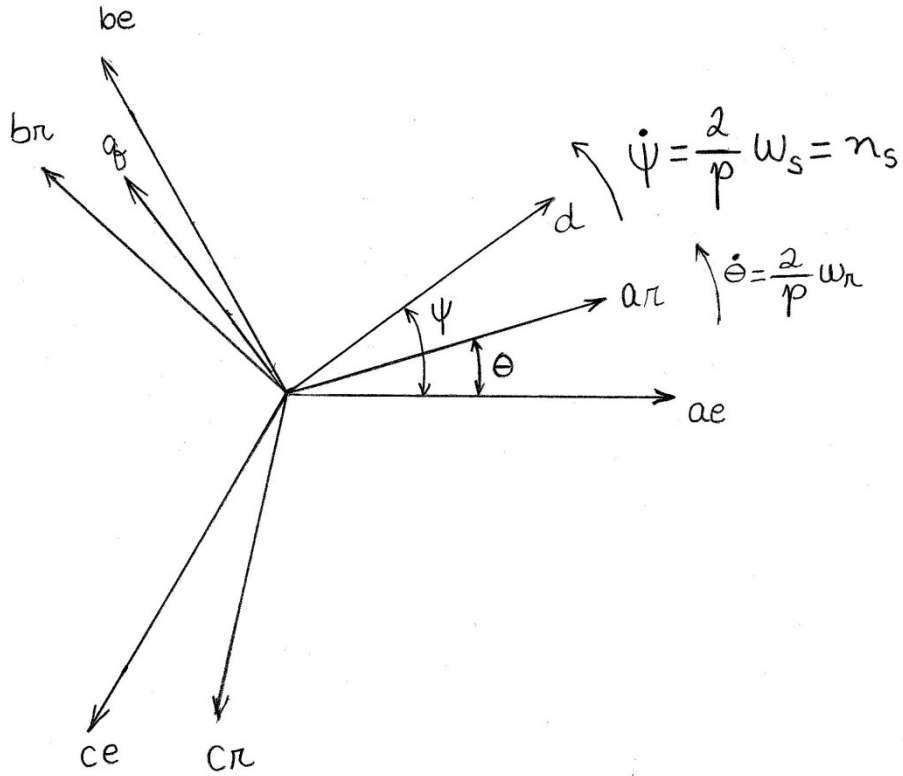


Figura 12 – Eixos magnéticos dos enrolamentos trifásicos e dq (bifásicos).

Em [7], colocando as Eqs. 21 e 22 na forma matricial, tem-se uma equação com uma matriz 6x6 relacionando correntes e tensões e aplicando-se a esta equação a transformação das Eqs.24(a) (estator) e (b) (rotor) chega-se à Eq. 25. A redução de ordem do sistema (de sexta para quarta) que é feita de trifásico para bifásico é justificada pelo fato do M.I.T. ser simétrico, não possuindo, então, componentes de seqüência zero e considerando que estas, mesmo se existissem, não afetariam a expressão do torque que é vista na Eq.26, onde somente aparecem as componentes de correntes nos eixos *direto* e *em quadratura*.

$$C_e^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega_s t) & \cos(\omega_s t - 2\pi/3) & \cos(\omega_s t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega_s t) & -\sin(\omega_s t - 2\pi/3) & -\sin(\omega_s t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (a)$$

$$C_r^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos[(\omega_s - \omega_r)t] & \cos[(\omega_s - \omega_r)t - 2\pi/3] & \cos[(\omega_s - \omega_r)t + 2\pi/3] \\ -\sin[(\omega_s - \omega_r)t] & -\sin[(\omega_s - \omega_r)t - 2\pi/3] & -\sin[(\omega_s - \omega_r)t + 2\pi/3] \end{bmatrix} \quad (b)$$

Eq. 24

$$\begin{bmatrix} v_{de} \\ v_{qe} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + L_{ee} \frac{d}{dt} & -L_{ee} \omega_s & \frac{3}{2} M_{er} \frac{d}{dt} & -\frac{3}{2} M_{er} \omega_s \\ L_{ee} \omega_s & R_e + L_{ee} \frac{d}{dt} & \frac{3}{2} M_{er} \omega_s & \frac{3}{2} M_{er} \frac{d}{dt} \\ \frac{3}{2} M_{er} \frac{d}{dt} & -\frac{3}{2} M_{er} (\omega_s - \omega_r) & R_r + \frac{d}{dt} & -L_{rr} (\omega_s - \omega_r) \\ \frac{3}{2} M_{er} (\omega_s - \omega_r) & \frac{3}{2} M_{er} \frac{d}{dt} & L_{rr} (\omega_s - \omega_r) & R_r + L_{rr} \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{Eq.25}$$

$$T_{el} = \frac{3}{2} M_{er} \frac{p}{2} (i_{qe} \cdot i_{dr} - i_{de} \cdot i_{qr}) \quad \text{Eq. 26}$$

Onde,

$$L_{ee} = L_e - M_e \quad \text{e} \quad L_{rr} = L_r - M_r$$

M_{er} = indutância mutual máxima entre fases do estator e do rotor

p = número de pólos do M.I.T. simétrico

i_{de} = corrente de estator no eixo direto

i_{qe} = corrente de rotor no eixo em quadratura

i_{dr} = corrente do rotor no eixo direto

i_{qr} = corrente do rotor no eixo em quadratura

ω_s = freqüência das correntes trifásicas do estator

ω_r = velocidade angular elétrica do rotor

4.1.1 Sistema colocado na forma de Equação de Estados

Conforme é feito em $[x_3]$, a matriz que relaciona correntes e tensões na Eq. 25 pode ser separadas em duas matrizes de mesma ordem (4x4), uma delas contendo só termos constantes ou nulos e a outra contendo os termos que multiplicam o operador derivada temporal, como é mostrado na Eq. 27.

$$[v] = [Z_1] \frac{d}{dt} [i] + [Z_2] [i] \quad \text{Eq. 27}$$

Onde,

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} L_{ee} & 0 & \frac{3}{2} M_{er} & 0 \\ 0 & L_{ee} & 0 & \frac{3}{2} M_{er} \\ \frac{3}{2} M_{er} & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{er} & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad \text{e}$$

$$[Z_2] = \begin{bmatrix} R_e & -L_{ee}\omega_s & 0 & -\frac{3}{2}M_{er}\omega_s \\ L_{ee}\omega_s & R_e & \frac{3}{2}M_{er}\omega_s & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}M_{er}(\omega_s - \omega_r) & R_r & -L_{rr}(\omega_s - \omega_r) \\ \frac{3}{2}M_{er}(\omega_s - \omega_r) & 0 & L_{rr}(\omega_s - \omega_r) & R_r \end{bmatrix}$$

Manipulando-se a Eq. 27, resulta na explicitação da derivada temporal da corrente, na Eq.28.

$$\frac{d}{dt}[i] = -[Z_1]^{-1}[Z_2][i] + [Z_1]^{-1}[v] \quad \text{Eq. 28}$$

Onde,

$$[Z_1]^{-1} = \frac{1}{L_{ee}L_{rr} - \left(\frac{3}{2}M_{er}\right)^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -\frac{3}{2}M_{er} & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -\frac{3}{2}M_{er} \\ -\frac{3}{2}M_{er} & 0 & L_{ee} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}M_{er} & 0 & L_{ee} \end{bmatrix}$$

A forma final e completa do sistema é dada na Eqs. 29.

$$\frac{d}{dt}[i] = [A][i] + [B][v] \quad (a)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2}{p}\omega_r \quad (b)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(-D\omega_r + T_{el} - T_c) \quad (c)$$

$$T_{el} = (3/2)M_{er}(i_{qe}i_{dr} - i_{de}i_{qr}) \quad (d)$$

Onde,

$$[i] = \begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad e \quad [v] = \begin{bmatrix} v_{de} \\ v_{qe} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix}$$

$$[A] = \frac{1}{\Sigma} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

$$[B] = \frac{1}{\Sigma} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = a_{22} = -R_e L_{rr}$$

$$a_{33} = a_{44} = -R_r L_{ee}$$

$$a_{21} = -a_{12} = -L_{ee} L_{rr} \omega_s + \left(\frac{3}{2} M_{er} \right)^2 (\omega_s - \omega_r)$$

$$a_{31} = a_{42} = \frac{3}{2} M_{er} R_e$$

$$a_{13} = a_{24} = \frac{3}{2} M_{er} R_r$$

$$a_{41} = -a_{32} = \frac{3}{2} M_{er} L_{ee} \omega_r$$

$$a_{14} = -a_{23} = \frac{3}{2} M_{er} L_{rr} \omega_r$$

$$a_{34} = -a_{43} = L_{ee} L_{rr} (\omega_s - \omega_r) - \left(\frac{3}{2} M_{er} \right)^2 \omega_s$$

$$b_{11} = b_{22} = L_{rr}; b_{33} = b_{44} = L_{ee}$$

$$b_{13} = b_{24} = b_{31} = b_{42} = -\frac{3}{2} M_{er}$$

$$b_{12} = b_{14} = b_{21} = b_{23} = b_{32} = b_{34} = b_{41} = b_{43} = 0$$

$$\Sigma = L_{ee} L_{rr} - \left(\frac{3}{2} M_{er} \right)^2$$

$$\begin{aligned} v_{ae}(t) &= \sqrt{3} V_e \cos(\omega_s t) & v_{ar}(t) &= \sqrt{3} V_r \cos[(\omega_s - \omega_r)t + \alpha_r] \\ v_{be}(t) &= \sqrt{3} V_e \cos(\omega_s t - 2\pi/3) & v_{br}(t) &= \sqrt{3} V_r \cos[(\omega_s - \omega_r)t + \alpha_r - 2\pi/3] \\ v_{ce}(t) &= \sqrt{3} V_e \cos(\omega_s t + 2\pi/3) & v_{cr}(t) &= \sqrt{3} V_r \cos[(\omega_s - \omega_r)t + \alpha_r + 2\pi/3] \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} v_{de} \\ v_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} V_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} V_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{p/ o MIT rotor gaiola}$$

4.2 Programa fonte no SIMNON

Como visto em [5] todo sistema, que pode ser definido em termos matemáticos, também pode ser simulado no SIMNON. É uma ferramenta eficiente para simular os processos e produtos. Além de ser um ótimo programa para a simulação interativa.

Visto isso as equações do item 4.1 acima foram transferidas para linguagem do software SIMNON e geraram o código fonte mo;strado no apêndice.

Dessa forma são variáveis do programa

- A: carga com rotor bloq. , conj. máx.
- ω_s - rad.el./s frequência das tensões de estator
- D - coeficiente de atrito viscoso motor/ carga. [N.m.s/rad]
- J - momento de inércia motor/ carga. [kg.m²]
- M_{er} - Henry ind. mutua estator/rotor (valor Maximo)
- R_e - Resistência de estator [Ω]
- R_r - Ohm resistência de rotor[Ω]
- L_e - Henry ind. de estator (Le-Me)
- L_r - Henry ind. de rotor (Lr-Mr)
- p - numero de pólos
- V_e - Volt tensão de estator

Podem ser simulados:

- Característica do Torque Eletromagnético do motor
- Velocidade do motor
- Corrente no eixo direto do estator em vazio
- Corrente no eixo em quadratura do estator em vazio 32
- Corrente no eixo direto do rotor em vazio
- Corrente no eixo em quadratura do rotor em vazio

Capítulo 5

Análise de desempenho do MIT

5.1 Desenvolvimento da interface gráfica

Utilizando os métodos apresentados anteriormente para o cálculo do desempenho do MIT, Uma interface gráfica foi desenvolvida para facilitar a entrada dos dados extraídos em laboratório e a análise do comportamento dinâmico e em regime permanente do motor de indução trifásico de rotor de gaiola.

Os resultados da análise em Regime Permanente são apresentados em uma lista e caso o usuário opte por realizar análise em Regime Transitório através do SIMNON o programa gera um arquivo .t onde temos o motor desejado modelado

A linguagem escolhida para ‘escrever’ o programa foi a Linguagem JAVA pela proximidade com os comandos da Linguagem “C” já conhecida e principalmente por sua facilidade em criar interfaces amigáveis.

5.1.1 Tela de apresentação

Esta tela contém o nome do projeto, desenvolvedor e o botão de comando para iniciar as simulações



Figura 13 - Tela de Apresentação

5.1.2 Tela principal – Dados de Entrada

Nesta tela temos as caixas de texto para entrada dos dados utilizados para análise do motor;

- **V** [Volts]: valor da tensão de linha de alimentação do motor;
- **f** [Hz]: frequência da rede;
- **p** : número de pólos do motor;
- **R₁** [Ω]: resistência equivalente do estator;
- **R₂** [Ω]: resistência equivalente do rotor;
- **X₁** [Ω]: reatância indutiva do estator ou **L₁** [H] indutância do estator.
- **X₂** [Ω]: reatância indutiva do rotor ou **L₂** [H] indutância do rotor.
- **X_m** [Ω]: reatância de magnetização ou **L_m** [H] indutância de magnetização.
- **n** [rpm]: rotação ou **s**: escorregamento

Caso também seja de interesse realizar análise em Regime Transitório é necessário entrar com mais alguns parâmetros, são eles:

- **M_e** [H] : indutância mútua estator
- **M_r** [H] : indutância mútua rotor.
- **D** [N.m.s/rad]: coeficiente de atrito viscoso motor/carga
- **J** [kg.m²]: momento de inércia motor/carga

Existe a opção de simular a entrada de uma carga em um dado instante $T=2s$ já predefinido. Para isso é necessário entrar com o valor de **A**.

Na figura 14 é apresentada a tela de entrada dos dados.

Regime Permanente

Arquivo Ajuda

Parâmetros do Motor de Indução Trifásico

V: [Volts] - Tensão de Linha de Alimentação do Motor

f: [Hz] - Frequência da Rede

p: Número de pólos do motor

R1: [Ω] - Resistência Equivalente do Estator

R2: [Ω] - Resistência Equivalente do Rotor

L1: [H] - Indutância do Estator **X1:** [Ω] - Reatância Indutiva do Estator

L2: [H] - Indutância do Rotor **X2:** [Ω] - Reatância Indutiva do Rotor

Lm: [H] - Indutância de Magnetização **Xm:** [Ω] - Reatância de Magnetização

n: [rpm] - Rotação **s:** [%] - Escorregamento

Caso também seja desejado análise em Regime Transitório através do SIMMON,
entre com os seguintes dados adicionais:

Me: [H] - Indutância Mútua do Estator

Mr: [H] - Indutância Mútua do Rotor

D: [N.m.s / rad] Coeficiente de atrito viscoso motor / carga

J: [kg.m2] - momento de Inércia motor / carga

Colocando uma Carga na Simulação:

A:

Simular

Figura 14 – Tela de entrada dos dados

O usuário pode escolher entre informar as indutâncias ou reatâncias isso porque a transformação entre essas grandezas é relativamente simples como pode ser visto na Eq30

$$X_i = L_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad \text{Eq. 30}$$

O mesmo acontece para a velocidade (n) ou escorregamento (s):

$$n = (1 - s) \cdot n_s \quad \text{Eq. 31}$$

5.1.3 Tela de Resultados

Esta tela contém as características de desempenho da Máquina e informação da disponibilidade de se simular o motor no SIMNON.

São apresentados os seguintes resultados:

- Velocidade Síncrona - n_s [RPM] e ω_s [rad/s]
- Escorregamento - s (%)
- Velocidade Rotor - n
- Potência de Entrada - P_{entrada} [W]
- Potência Transferida através do entreferro desde o estator - P_g [W]
- Perdas no enrolamento do rotor - P_{rotor} [W]
- Potência mecânica P_{mec} [W]
- Potência de saída $P_{\text{saída}}$ [W]
- Conjugado Eletromecânico (Torque) - T_{mec} [N.m]
- Rendimento - η (%)
- Escorregamento no Torque Máximo- s_{maxT}
- Velocidade no Torque Máximo - n_{maxT} [RPM]
- Torque Máximo - $T_{\text{máx}}$ [N.m]
- Torque Partida - T_{partida} [N.m]

No caso em que não foram preenchidos os dados para análise no SIMNON é mostrado um erro para o usuário indicando que não é possível realizar a simulação em regime transitório

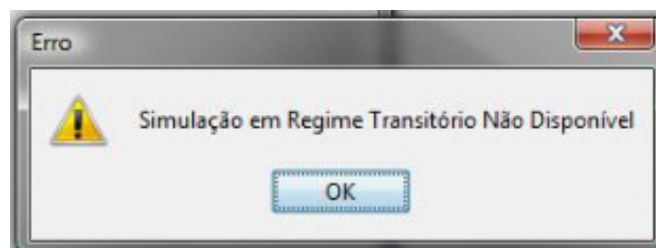


Figura 15 – Tela de erro para simulação não disponível

Se todos os dados foram informados o usuário é avisado da possibilidade de se simular o motor utilizando o software SIMNON.

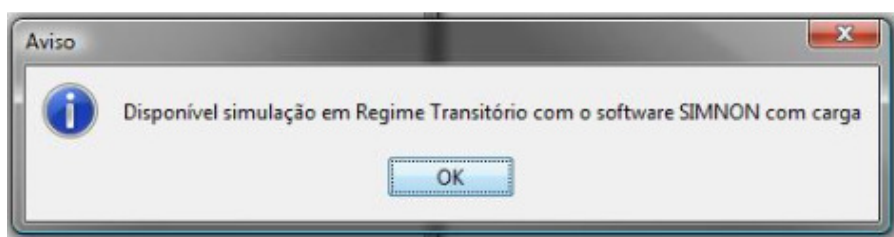


Figura 16 – Tela de aviso da disponibilidade simulação

5.2 Análise em Regime Permanente

Foi analisado um motor com os seguintes dados:

- $V = 220$ [Volts]
- $f = 60$ [Hz]
- $p = 4$;
- $R_1 = 0,855$ [Ω];
- $R_2 = 0,686$ [Ω];
- $X_1 = 0,631$ [Ω];
- $X_2 = 1,310$ [Ω];
- $X_m = 26,09$ [Ω];
- $n = 1725$ [rpm];
- $M_e = -0,399$ [H];
- $M_r = -0,043$ [H];
- $D = 0,021$ [N.m.s/rad];
- $J = 0,1055$ [kg.m²].
- $A = 0,586$

Como todas as entradas foram devidamente preenchidas foi possível simular o motor no SIMNON.

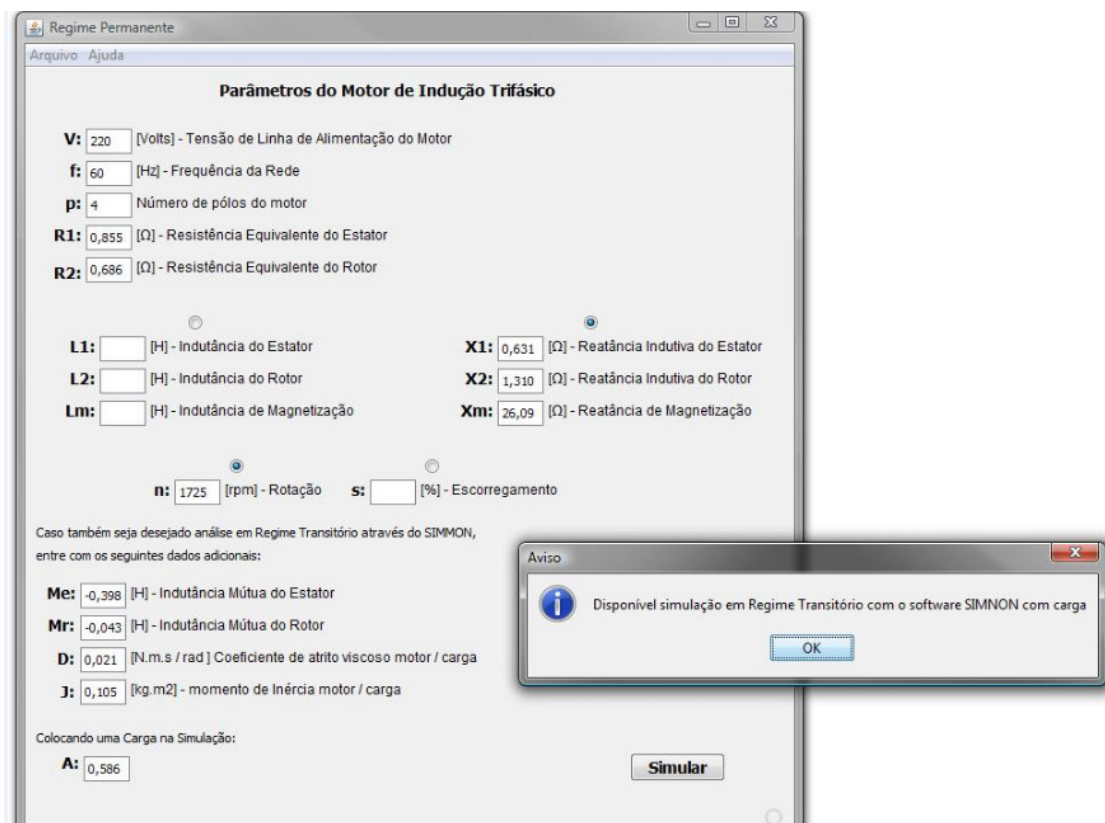


Figura 17 – Simulação MIT

Na figura 18 temos as características do MIT:

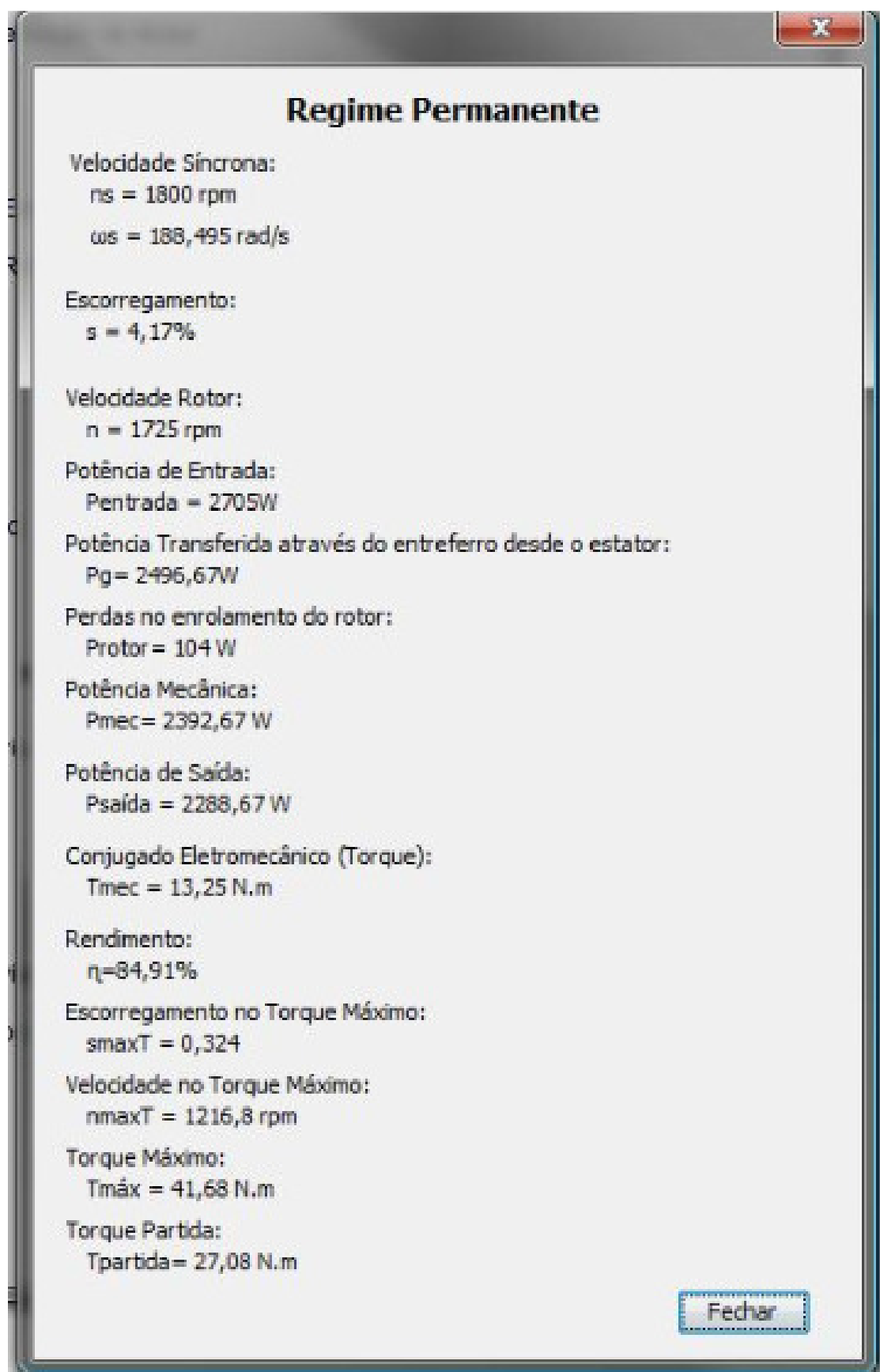


Figura 18 – resultados em Regime Permanente

5.3 Regime transitório

O software desenvolvido gerou um 'arquivo' para permitir simulação no SIMNON. Portanto é preciso que o usuário tenha acesso ao aplicativo para continuar a simulação

No SIMNON todos os comandos são digitados em uma janela chamada *comand dialog*.

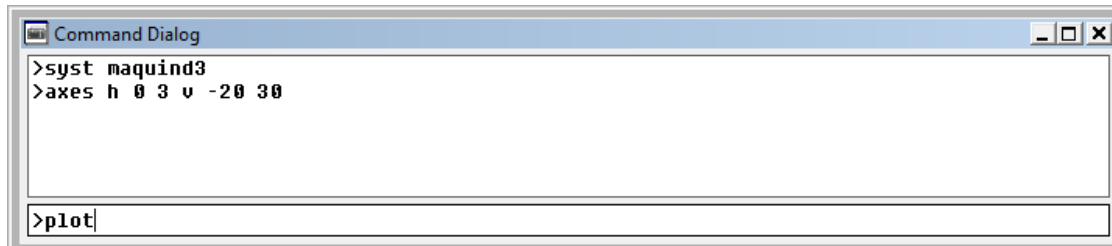


Figura 19 – Comand Dialog SIMNON

O método de simulação no SIMNON é bastante simples e intuitivo, em primeiro lugar é preciso chamar o sistema que se vai analisar com o comando '*syst nome_do_sistema*', o programa sempre gera o sistema com o nome *maquind3* substituindo-o a cada nova simulação.

Os eixos do gráfico que se deseja plotar é definido por '*axes h_min_max v_min_max*', depois basta escolher qual gráfico você quer plotar e digitar o comando '*plot_variável*', usamos '*simu t_inicial_t_final*' para ver o resultado, caso queira saber os valor final basta digitar '*disp_variável*', para escrever um texto no gráfico é necessário primeiro o comando '*mark*' com a localização e depois o mesmo comando seguido de *aspas* e o texto.

Para gerar as figuras 20e 21 foram acionados os seguintes comandos:

```
> syst maquind3
> axes h 0 3 v -20 40
> error 1.e-6
> plot Tel
> simu 0 2
> simu -cont
> disp Tel wr
Tel=14.156 wr=359.26
> mark a 0.2 38
> mark "Tel (Nm)
> mark a 2.2 -3
> mark "tempo(s)
> mark a 2.2 10
> mark "Tel=14,156 Nm
> mark a 2.2 7
> mark 'wr=359,26 rad el/s
> axes h 0 3 v 0 450
> plot wr
> simu 0 2
> disp wr
```

```

> wr=372.74
> mark a 1.5 380
> mark "wr=372,74 rad el/s
> mark a 0.2 420
> mark "wr (rad el/s)
> mark a 2.2 10
> mark "tempo(s)
> simu -cont
> disp wr
wr=359.26
> mark a 2.2 330
> mark "wr=359,26 rad el/s

```

Primeiro temos as característica do gráfico Torque em função do tempo, conforme mostrado no item 2.3, podemos perceber claramente a variação inicial, o pico do Torque e sua posterior estabilização próximo ao zero. No instante 2s a carga é colocada e vemos o aumento do torque e imediata estabilização

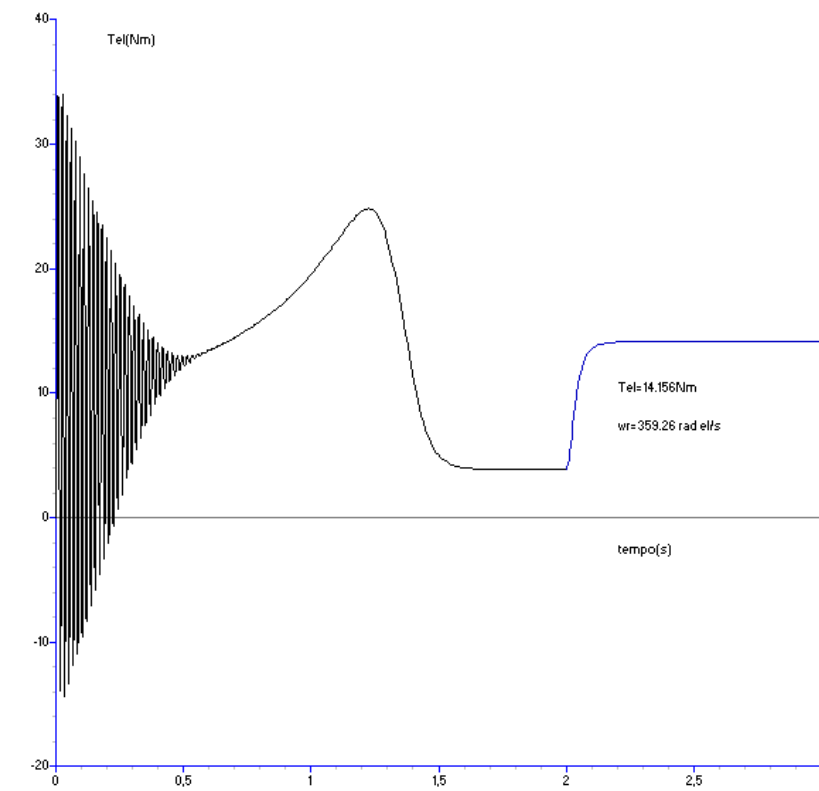


Figura 20 – Característica do Torque Eletromagnético do motor

Na Figura 21 pode ser observada a aceleração do motor e posterior estabilização, note que quando a carga é considerada a velocidade de diminui e logo em seguida se estabiliza novamente.

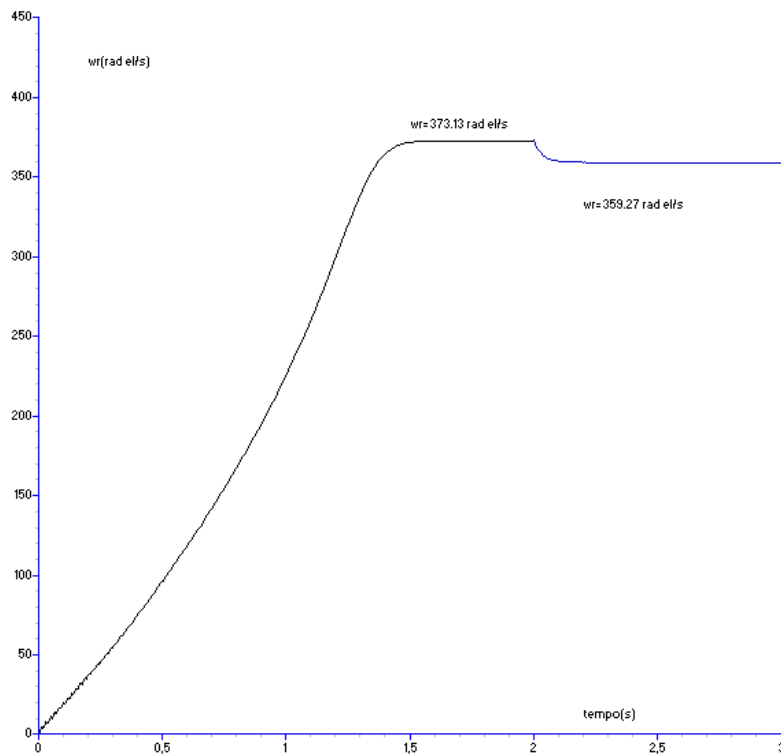


Figura 21 – Velocidade do motor

Analogamente aos comandos mostrados acima foram simuladas as correntes do MIT em vazio. Nas figuras podemos visualizar qual o comportamento das correntes no eixo direto e em quadratura no estator e rotor em vazio:

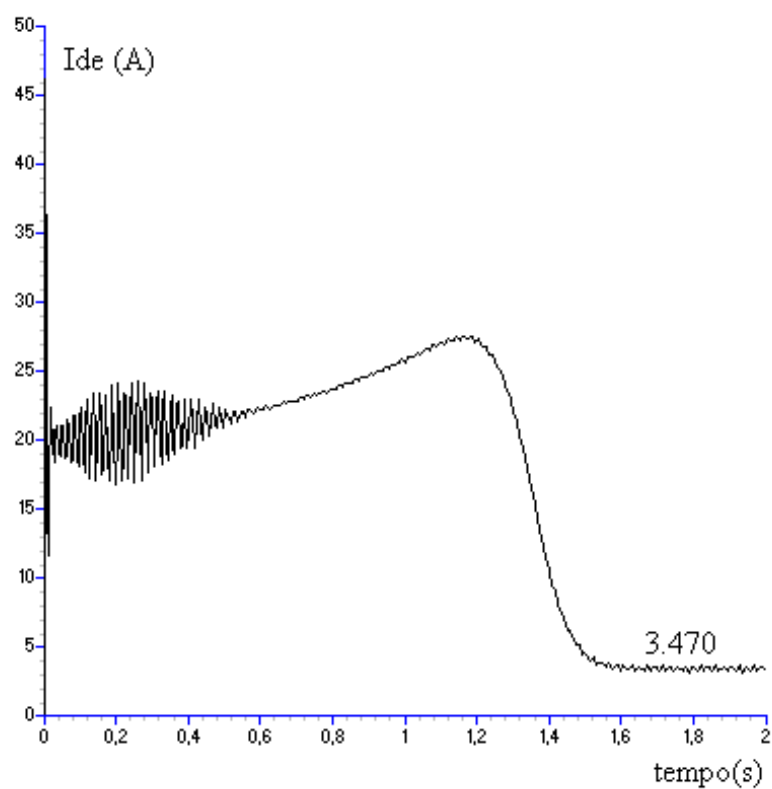


Figura 22 – Corrente no eixo direto do estator em vazio

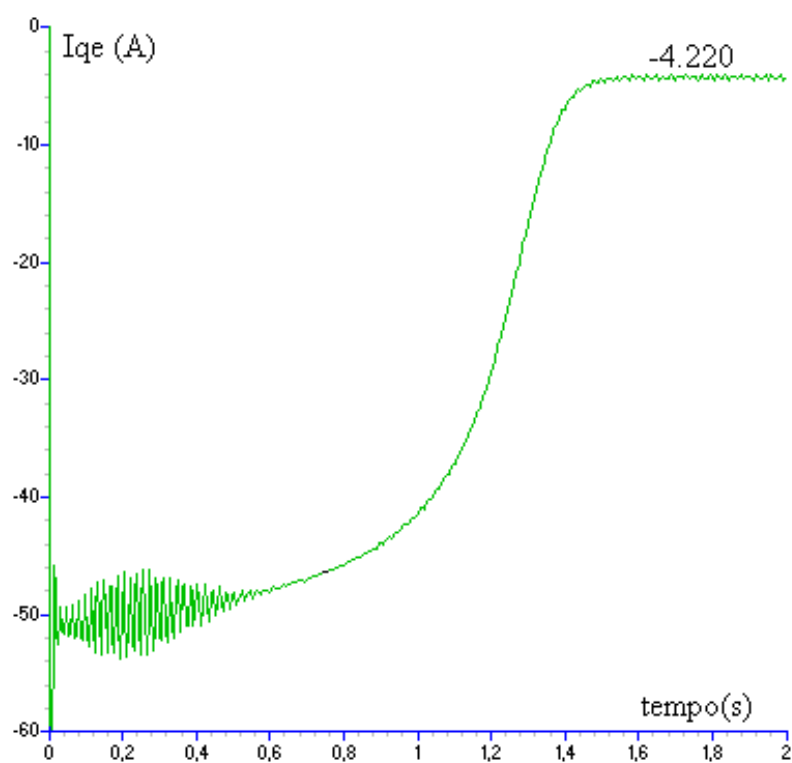


Figura 23 – Corrente no eixo em quadratura do estator em vazio

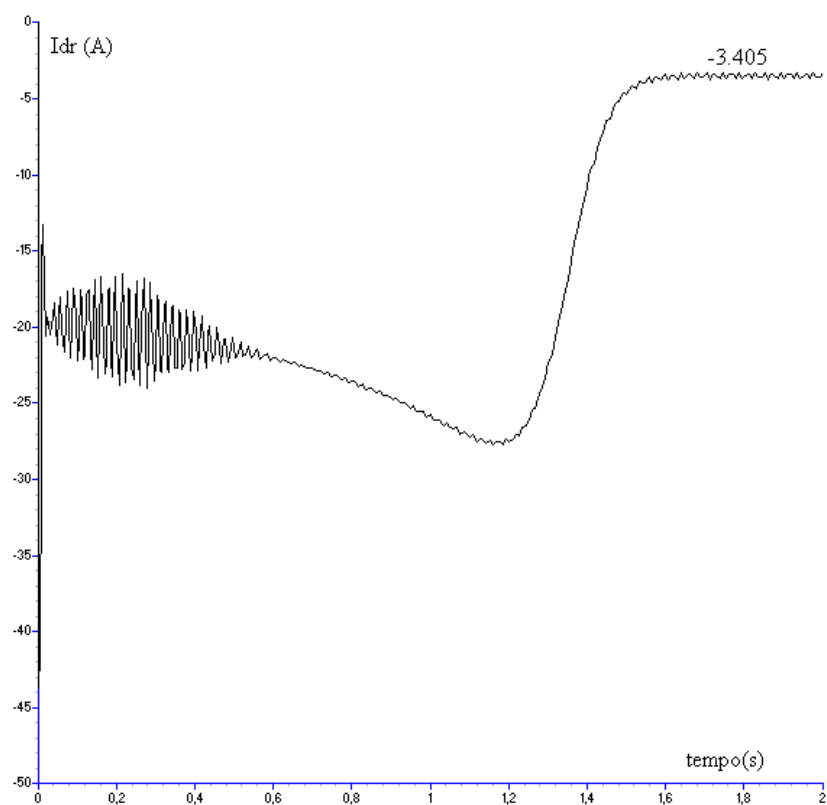


Figura 24 – Corrente no eixo direto do rotor em vazio

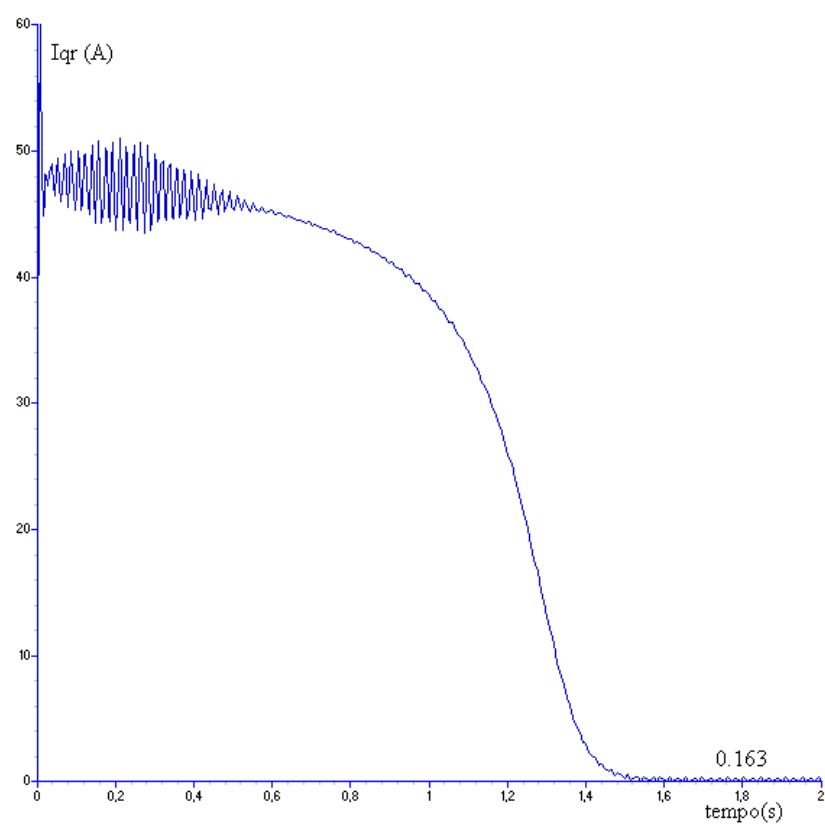


Figura 25 – Corrente no eixo em quadratura do rotor em vazio

Capítulo 6

Conclusão

O método apresentado e implementado neste trabalho permite a análise do comportamento e desempenho do motor de indução. É uma ferramenta adequada para simulação de acionamentos elétricos com o objetivo de facilitar a compreensão dos dados extraídos em laboratório do circuito equivalente.

O desenvolvimento deste projeto permitiu a possibilidade de consolidação dos conhecimentos teóricos, através da revisão de vários conceitos e das simulações. Com o decorrer do desenvolvimento do projeto, foi necessário o aprendizado de programação em diversos softwares que não estão na grade curricular e são extremamente úteis o que ajudou a tornar o projeto bastante proveitoso.

Sobre os resultados obtidos podemos concluir que são confiáveis e satisfatórios e o software SIMNON correspondeu às expectativas no que diz respeito à simulação de dispositivos eletromecânicos. Ambos os métodos oferecem facilidade de visualização de resultados e o SIMNON por se tratar de linguagem de alto nível a programação também é facilitada. Além disso, o SIMNON requer pouco processamento de hardware.

Os dados apresentados no Capítulo 6 são confiáveis e a única margem de erro vem da incorreta extração dos dados do circuito equivalente

Portanto fica evidente a eficácia do método em analisar o MIT, temos algumas melhorias em vista como a interação direta entre o software e o SIMNON e com isso analisar o comportamento do motor com a inserção de cargas.

Referências Bibliográficas

- [1] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr. e Stephen D. Umans; *Máquinas Elétricas*, 6ª edição; Bookman.
- [2] Assunção; J. T., 1990 “Análise e Especificação de Motores de Indução Trifásicos com Rotor Tipo Gaiola
- [3] Lobosco, O.S. e Dias, J. L. P. C, 1988, “Seleção e Aplicação de Motores Elétricos”, Ed. McGraw-Hill : Siemens AS, São Paulo.
- [4] Del Toro, V., “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, LTC Editora, Rio de Janeiro, 1994
- [5] SSPA Systems; “SIMNON for Windows Version 1.02: User’s Guide”; Department of Automatic Control, Lund/Sweden; October/1993.
- [6] Desoer, C. A., “Notes for a Second Course on Linear Systems”, University of California, USA, Berkeley and Van Nostrand Company Eds., 1970.
- [7] Gozaga, D. P., “Contribuição ao Estudo da Máquina de Indução de Dupla Alimentação em Operação Síncrona”, Tese de Doutorado, FEE/UNICAMP; Campinas, SP - Brasil; April/ 1993 (in Portuguese).
- [8] Scott, R. E., “LINEAR CIRCUITS: Part 2 Frequency-Domain Analysis”, Addison Wesley Publishing, New York/USA, 1960.
- [9] Norma Técnica: NBR5383, 1982, “Máquinas elétricas girantes – Máquinas de Indução – Determinação das Características”, ABNT.

APÊNDICE

- Listagem do programa *maquind3*

continuous system maquind3 "simulação do motor de indução trifásico"

```
time t
state ide iqe idr iqr teta wr
der dide diqe didr diqr dteta dwr

pi:3.1415927
t1:2.0
pi:3.1415927
R2:1.4142136
R3:1.7320508
k:1.5

Tel=k*mer*(p/2.)*(iqe*idr-ide*iqr)
fi=2.*pi/3.
sigma=le*lr-((k*mer)^2.)
vae=R2*Ve*cos(ws*t)
vbe=R2*Ve*cos(ws*t-fi)
vce=R2*Ve*cos(ws*t+fi)
vde=(R2/R3)*(vae*cos(ws*t)+vbe*cos(ws*t-fi)+vce*cos(ws*t+fi))
vqe=(R2/R3)*(-vae*sin(ws*t)-vbe*sin(ws*t-fi)-vce*sin(ws*t+fi))
Tc=A*wr+B

A=if t<t1 then 0.0 else A0
B=if t<t1 then 0.0 else B0

vdr=0.0
vqr=0.0
nu=ws*t-nteta
nteta=(p/2.)*teta
dwr=(1./J)*(p/2.)*(Tel-Tc)-(D/J)*wr
Tu=Tel-(2.*D/p)*wr      "mN conjugado util no eixo do motor
dteta=(2./p)*wr

a11=-re*lr
a12=le*lr*ws-((k*mer)^2)*(ws-wr)
a13=k*mer*rr
a14=k*mer*lr*wr

b11=lr
b13=-k*mer
dide=(1./sigma)*(a11*ide+a12*iqe+a13*idr+a14*iqr+b11*vde+b13*vdr)

a21=-a12
a22=a11
a23=-a14
a24=a13

b22=b11
b24=b13
diqe=(1./sigma)*(a21*ide+a22*iqe+a23*idr+a24*iqr+b22*vqe+b24*vqr)
a31=k*mer*re
a32=-k*mer*le*wr
a34=le*lr*(ws-wr)-((k*mer)^2.)*ws
a33=-rr*le
b31=b13
b33=le
```

```

didr=(1./sigma)*(a31*ide+a32*iqe+a33*idr+a34*iqr+b31*vde+b33*vdr)
a41=-a32
a42=a31
a43=-a34
a44=a33
b42=b31
b44=b33
diqr=(1./sigma)*(a41*ide+a42*iqe+a43*idr+a44*iqr+b42*vqe+b44*vqr)
iae=(R2/R3)*(ide*cos(ws*t)-iqe*sin(ws*t))
ibe=(R2/R3)*(ide*cos(ws*t-fi)-iqe*sin(ws*t-fi))
ice=(R2/R3)*(ide*cos(ws*t+fi)-iqe*sin(ws*t+fi))
iar=(R2/R3)*(idr*cos(nu)-iqr*sin(nu))
ibr=(R2/R3)*(idr*cos(nu-fi)-iqr*sin(nu-fi))
icr=(R2/R3)*(idr*cos(nu+fi)-iqr*sin(nu+fi))

end

```