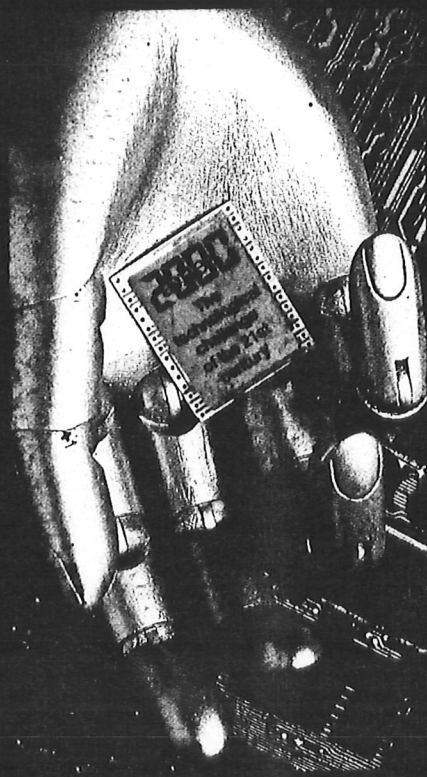




Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

abinee

ABINEE TEC'91



SIMEAR

**II SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE MOTORES
ELÉTRICOS E ACIONAMENTOS REGULÁVEIS**

DE 07 A 09/05/91

PALÁCIO DAS CONVENÇÕES

PARQUE ANHEMBI - SÃO PAULO

SIMEAR

II SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE MOTORES ELÉTRICOS E ACIONAMENTOS REGULÁVEIS

SUMÁRIO

Vol.4

Sessões Ordinárias

Sessão 12

DESCARGAS PARCIAIS NA ISOLAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS	
A.A.Penteado e D.Rocco	09
DETERMINAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DE MOTORES DE INDUÇÃO A PARTIR DE CATÁLOGOS DE FABRICANTES	
C.Goldemberg e O.S.Lobosco	25
PROPOSTA DE UM MODELO MATEMÁTICO E DE SIMULAÇÃO DE MÁQUINA ASSÍNCRONO	
P.R.Aguilar e I.Rotta	41
RUÍDO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES	
S.L.Nau	51

Sessão 13 - CANCELADA

Sessão 14

RIPPLE DE TORQUE EM MÁQUINAS SÍNCRONAS COM IMÃS PERMANENTES E COMUTAÇÃO ELETRÔNICA: CAUSAS E SOLUÇÕES	
R.Carlson	65
O MOTOR ASSÍNCRONO LINEAR PARA BAIXAS VELOCIDADES UMA TÉCNICA DE PROJETO	
G.A.Simone, R.C.Creppe e C.R. Souza	77
MOTOR DE HISTERESE: MODELAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	
W.E.F.Scheibig	93

Sessão 15

ANÁLISE DA DIVISÃO DE CARGA ENTRE MOTORES ASSÍNCRONOS DE TRACÇÃO METRO-FERROVIÁRIA ACOPLADOS A RODAS DE DIÂMETROS DESIGUAIS	
C.C.Moraes	113
PROPOSTA PARA ANÁLISE DINÂMICA EM MATERIAIS MAGNÉTICOS	
P.S.P.Lima e H.Cunha Jr.	139
MODELAMENTO E CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO E DE FORÇA PARA UM MAGNETO PISTA DE CORRIDA	
C.Y.Shigue, V.Santos Fº. e C.A.Baldan	147

Sessão 16

MOTORES - REVOLUÇÃO NA MANUFATURA PARA SER COMPETITIVO	
C.Yoshinaga	155

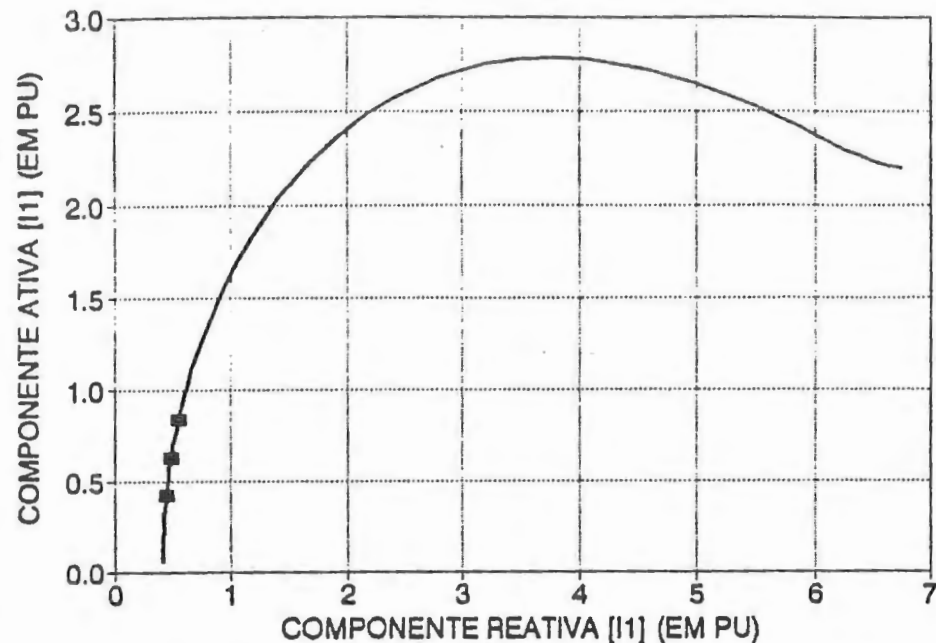


Fig. A7 - Diagrama do círculo (rotação 0 a 1 PU)

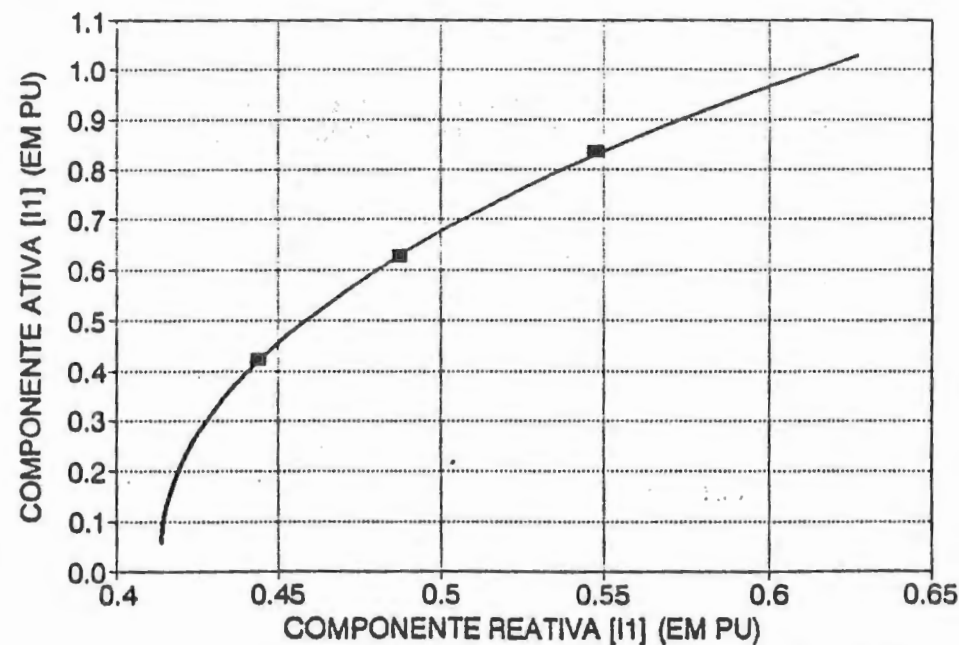


Fig. A8 - Diagrama do círculo (rotação 0.975 a 1 PU)

RESUMO

A partir das transformações da máquina trifásica, efetuamos o modelamento e a simulação de um motor de indução trifásico, do qual determinamos através de ensaios, não só os parâmetros, mas, também, as características externas. Nas confrontações entre a simulação e o ensaio, aduzimos que poderíamos melhorar o modelamento, prevendo sistemas em que se imponham precisões rigorosas, ou ainda casos em que máquinas especiais se nos apresentem como necessárias tanto pela rapidez de respostas nos transitórios, quanto pelo baixo nível de ruído. Assim sendo, desenvolvemos modelos, simulações, métodos de determinações dos parâmetros e processos de separações das perdas.

ABSTRACT

Starting with three-phase machine transformations, we effected the modeling and simulation of a three-phase induction motor, from which we determined through the tests, not only the parameters, but, also, the external characteristics. In the confront between the simulation and the tests, we adduce that we could improve the modeling, foreseeing systems in which rigorous accuracy is imposed, or yet cases where special machines present us necessary by the speed of transients responses as well as low noise level. This way, we developed models, simulations, parameters determination methods, losses separation process, whose summary we present in this work.

Keywords: Induction Motors, Modeling, Simulation, Parameters determination.

1. O Modelamento Clássico

1.1 A Matriz das Tensões

$$\begin{bmatrix} V_{ed} \\ V_{eq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_e + pL_e & -\omega L_e & pM & -\omega M \\ \omega L_e & r_e + pL_e & \omega M & pM \\ pM & -\omega M & r_r + pL_r & -\omega L_r \\ \omega M & pM & \omega L_r & r_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ed} \\ i_{eq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

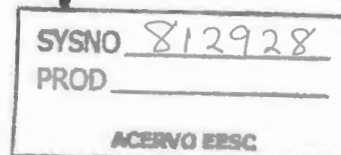
1.2 A equação do conjugado

$$C = M \cdot [i_{eq} i_{rd} - i_{ed} i_{rq}] \quad (2)$$

1.3 Os Parâmetros

Os ensaios em vazio, com rotor bloqueado, permitiram-nos as obtenções dos parâmetros.

$$r_e = 3.967 \, \Omega \quad r_r = 3.178 \, \Omega \quad P_{mec} = 17.210 \, W$$



$$\begin{array}{lll} X_m = 111.720 \, \Omega & X_{de} = 6.320 \, \Omega & X'_{dr} = 9.470 \, \Omega \\ L_m = 296.300 \, \text{mH} & L_e = 16.760 \, \Omega & L'_{dr} = 25.120 \, \Omega \end{array}$$

Determinamos pelo método "da rampa" o momento de inércia que apresentou o seguinte resultado:

$$J = 0.0075 \text{ kg m}^2$$

1.4 O Programa

1.4 O Programa

De posse dos valores obtidos para os parâmetros da máquina, elaboramos um programa de simulação a partir das equações (1) e (2), que nos permitiu estudar o comportamento do motor de indução trifásico tanto em regime permanente quanto em regime transitório. O algoritmo para a simulação digital com a utilização do método de Runge Kutta de 4.ª ordem para a resolução das equações diferenciais do modelo, é sintetizado pela expressão:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (3)$$

$$y_{i+1} = y_i(x_i) + h \phi(x_i, y_i(x_i), h) \quad (3)$$

onde $\phi(x_i, y_i(x_i), h)$ é função vetorial incremento, avaliada no intervalo $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ em cada iteração (3). Reproduzimos a simulação em simulador digital.

1.5 Os Ensaaios e as Simulações

1.5 Os Ensaios e as Simulações

Apresentamos aqui, os resultados obtidos na simulação e os resultados obtidos experimentalmente para diferentes condições de funcionamento do motor, os quais são apresentados em um único gráfico, como mostra a Fig. 1. Observamos que embora o modelo clássico não leve em conta as perdas no ferro do motor, a curva teórica é bem próxima da curva experimental, o que nos leva a apreciação deste modelo, onde o erro médio oscila em torno de 5 % na região de funcionamento normal do motor.

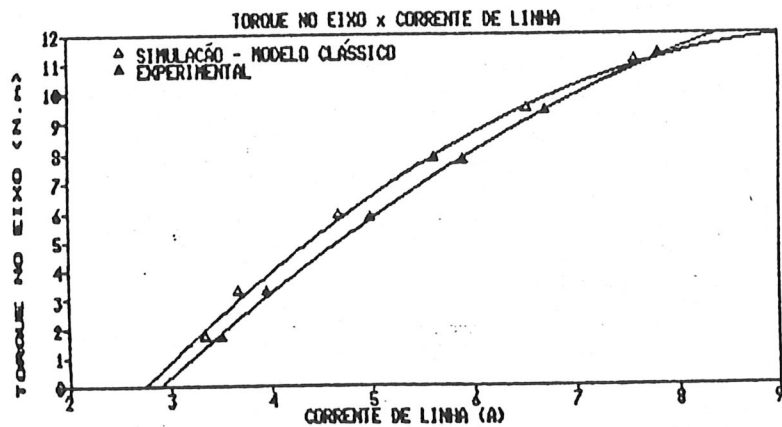


Fig. 1 - Os resultados dos ensaios e das simulações para diferentes condições de carga do motor de indução trifásico.

2. A Proposta de Aprimoramento

2.1 As equações das tensões

$$[V] = [K][I]$$

(4)

onde

$r_p + pL_e$	pL_e	pM	pM	$-wM$	$-wM$	$-wL_e$	$-wL_e$
pL_e	$r_e + pL_e$	pM	pM	$-wM$	$-wM$	$-wL_e$	$-wL_e$
pM	pM	$sr_h + pL_r$	pL_r	$-swL_r$	$-swL_r$	$-swM$	$-swM$
pM	pM	pL_r	$r_f + pL_r$	$-swL_r$	$-swL_r$	$-swM$	$-swM$
pM	pM	pL_r	pL_r	$-swL_r$	$-swL_r$	$-swM$	$-swM$
swM	swM	swL_r	swL_r	$r_r + pL_r$	pL_r	pM	pM
swM	swM	swL_r	swL_r	pL_r	$r_f + pL_r$	pL_r	pM
swM	swM	swL_r	swL_r	pL_r	pL_r	$sr_h + pL_r$	pM
wL_e	wL_e	wM	wM	pM	pM	$r_e + pL_e$	pL_e
wL_e	wL_e	wM	wM	pM	pM	pL_e	$r_p + pL_e$

$$\begin{bmatrix} v \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} v_{pd} & v_{ed} & v_{hd} & v_{fd} & v_{rd} & v_{rq} & v_{fq} & v_{hq} & v_{eq} & v_{pq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_{pd} & i_{ed} & i_{hd} & i_{fd} & i_{rd} & i_{rq} & i_{fq} & i_{hq} & i_{eq} & i_{pq} \end{bmatrix}$$

2.2 A Equação do Conjugado

$$C = M \left[(i_{eq} + i_{pq}) (i_{rd} + i_{hd} + i_{fd}) + (i_{pd} + i_{ed}) (i_{rq} + i_{fq} + i_{hq}) \right] \quad (5)$$

2.3 O Circuito Equivalente
A partir das equações do item 2.1 do trabalho apresentado no 5º C.B.A. (4), obtivemos o circuito equivalente abaixo representado na Fig. 2.

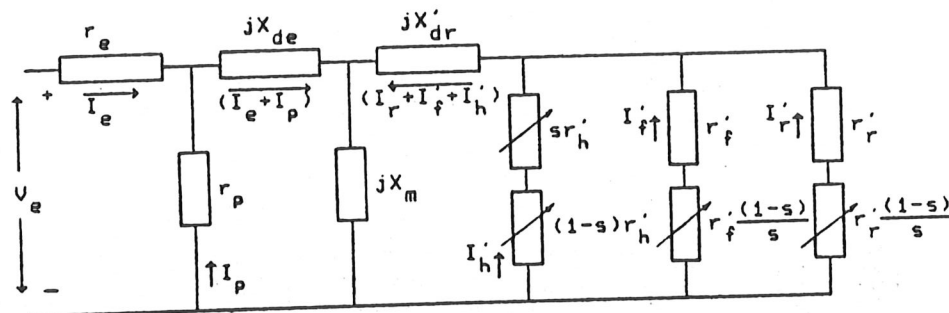


Fig. 2 - Circuito equivalente, por fase, referido ao estator, incluindo as perdas por histerese e por correntes parasitas no rotor e as perdas no ferro do estator.

2.4 As Determinações dos Parâmetros

Efetuada os ensaios de curto-circuito e de circuito aberto, obtivemos os parâmetros:

$$\begin{aligned} r_e &= 3.967 \, \Omega & r_r' &= 3.178 \, \Omega \\ X_{de} &= 6.320 \, \Omega & L_{de} &= 16.760 \, \mu\text{H} \\ X_m &= 111.720 \, \Omega & L_m &= 296.300 \, \text{mH} \\ X_{dr}' &= 9.470 \, \Omega & L_{dr}' &= 25.120 \, \mu\text{H} \end{aligned}$$

2.4.1 Ensaio em vazio à várias tensões

O conjugado de perdas, por atrito e ventilação do motor de indução, foi determinado através do ensaio em vazio para várias tensões, conforme mostra o gráfico da Fig. 3.

$$W = 3 r_e I^2 = P_{mec} + K V^2 \quad (6)$$

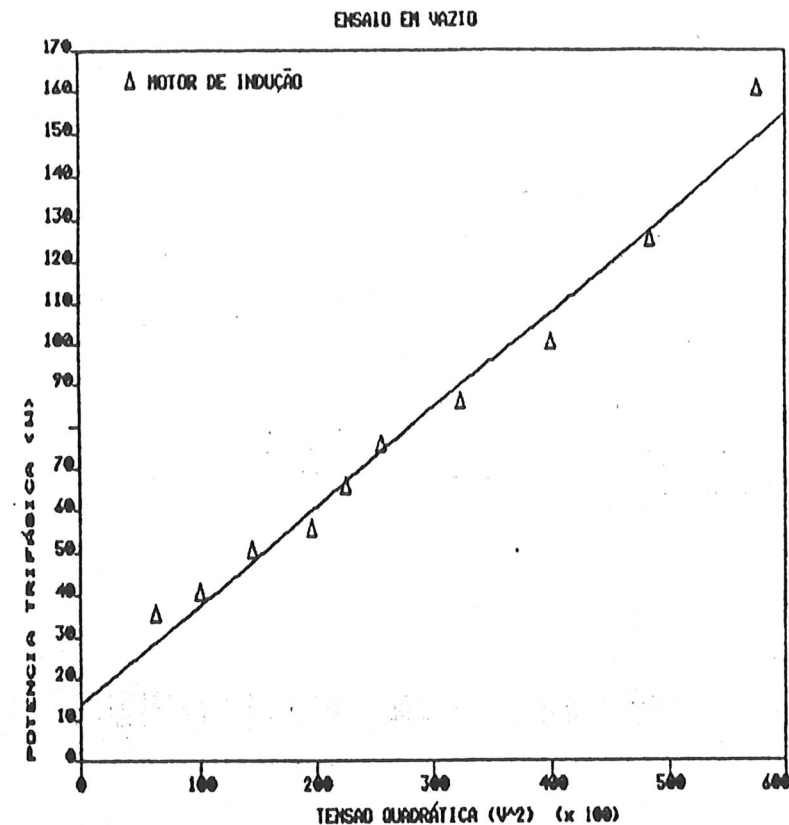


Fig. 3 - Ensaio em vazio à várias tensões do motor de indução trifásico.

2.4.2 As Determinações dos parâmetros do Modelo Proposto.

Os procedimentos adotados, pouco freqüentes, foram os seguintes:

A - Os ensaios em vazio permitiram-nos as separações das perdas em: "ohmicas", mecânicas e no ferro;

B - Os ensaios em carga deram-nos as parcelas acima descritas, subtraídas as potências convertidas em mecânicas;

C - Com as obtenções das perdas no ferro no estator e no rotor, pudemos desdobrá-las tanto no que tange às localizações quanto no que diz respeito às naturezas.

- Quanto às localizações:

$$\frac{\text{perdas no núcleo}}{\text{perdas nos dentes}} = \frac{(P_{FeN})}{(P_{FeD})} = \frac{V_N}{V_D} \cdot \left[\frac{B_N}{B_D} \right]^2 = \gamma \quad (7)$$

portanto,

$$(P_{FeD}) = \frac{(P_{FeTotais})}{(1 + \gamma)} \quad (8)$$

e

$$(P_{FeN}) = \frac{\gamma}{(1 + \gamma)} \cdot (P_{FeTotais}) \quad (9)$$

- Quanto às naturezas:

$$\frac{\text{perdas por histerese}}{\text{perdas Foucault}} = \frac{P_h}{P_F} = \frac{\sigma_h \cdot f \cdot B^2 \cdot G}{\sigma_F \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot G} = \frac{\sigma_h}{\sigma_F} \cdot \frac{1}{f} = \alpha \quad (10)$$

portanto,

$$P_{hN} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)} \cdot (P_{FeN}) \quad (11)$$

$$P_{FN} = \frac{1}{(1 + \alpha)} \cdot (P_{FeN}) \quad (12)$$

$$P_{hD} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)} \cdot (P_{FeD}) \quad (13)$$

$$P_{FD} = \frac{1}{(1 + \alpha)} \cdot (P_{FeD}) \quad (14)$$

Nestas expressões os significados dos símbolos são os seguintes:

V = Volume
G = Peso
B = Densidade de fluxo
f = frequência
 σ_h = Coeficiente para a histerese magnética
 σ_F = Coeficiente para a corrente parasita

2.5 Os Parâmetros

Estes ensaios, realizados à diferentes tensões (150 e 220 V), em condições síncronas e assíncronas, possibilitaram-nos as obtenções dos seguintes parâmetros:

$$r'_h = 2554.63 \, \Omega$$

$$r'_f = 19.01 \, \Omega$$

$$r_p = 2142.86 \, \Omega$$

Sendo " r'_h ", " r'_f ", " r_p " os parâmetros que representam os fenômenos explicados no que corresponde às perdas no ferro e às potências

convertidas, tanto devido à histerese magnética, quanto às correntes parasitas.

2.6 O Programa

A partir das equações das tensões (4) e da equação do conjugado dada por:

$$J \cdot p \omega_r = M \left[(i_{eq} + i_{pq}) (i_{rd} + i_{hd} + i_{fd}) + (i_{pd} + i_{ed}) (i_{rq} + i_{fq} + i_{hq}) \right] - B \Omega - C_c \quad (15)$$

elaboramos um programa em computador digital, na linguagem turbo Pascal, onde nos possibilitou a simulação da máquina assíncrona em regime permanente, com as inclusões das perdas no ferro do estator e do rotor, sendo estas últimas, subdivididas em Foucault e histerese magnética, conforme relato do item anterior. A Fig 4 mostra o fluxograma do programa elaborado.

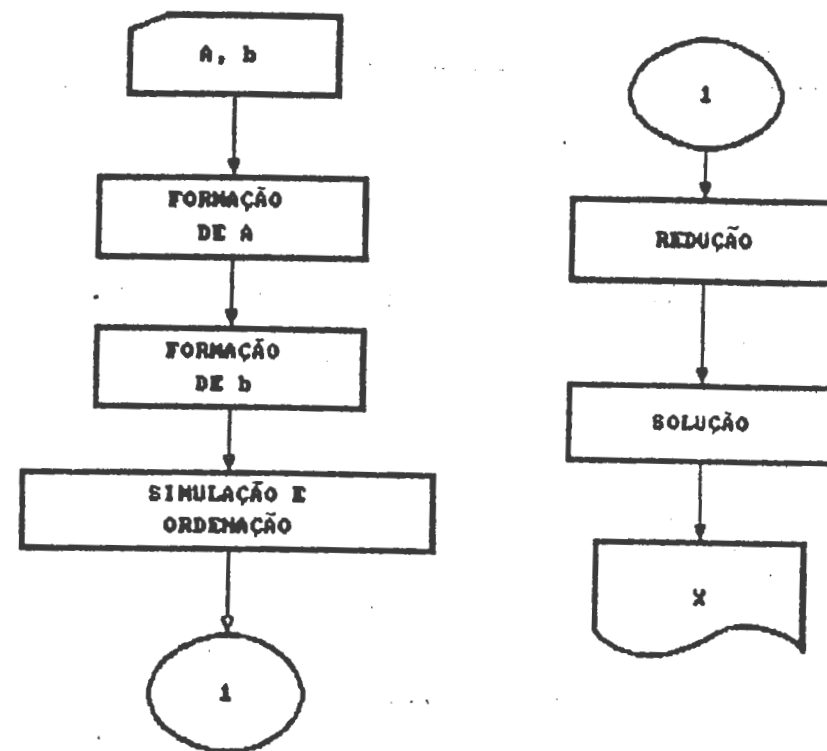


Fig. 4 - Fluxograma do programa para resolução do sistema de equações $Ax = B$, utilizado para a simulação do motor de indução em regime permanente.

2.7 Os Ensaio e as Simulações

A Fig. 5 mostra os resultados experimentais e os resultados da simulação com as inclusões das perdas do ferro no estator e no rotor, para vários pontos de funcionamento em regime do motor de indução trifásico. Nesse modelamento, quando comparamos os resultados experimentais com os resultados da simulação, observamos que o erro médio envolvido entre eles é igual ou menor do que 3 %, consubstanciando num melhoramento da precisão para os estudos das máquinas elétricas e seus acionamentos e controles.

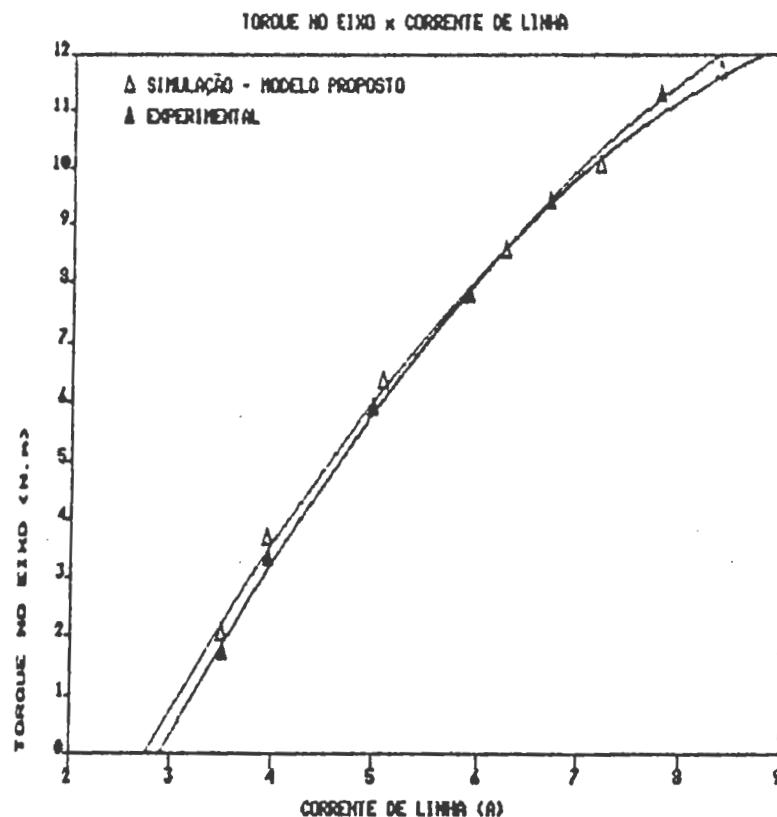


Fig. 5 - Os resultados dos ensaios e das simulações com as inclusões das perdas do ferro no estator e no rotor do motor de indução trifásico.

3. As Comparações

Quando comparamos os resultados do modelamento clássico com os resultados do modelamento proposto, com as inclusões das perdas no ferro da máquina, observamos que este último apresentou uma considerável melhora na precisão, vindo a contribuir para o estudo dos projetos e dos acionamentos e controles dessas máquinas.

4. Conclusões

Buscávamos precisão no modelo para otimizações dos projetos e interações entre os equipamentos componentes de sistemas automáticos complexos. Os resultados obtidos confirmam que melhoramos as precisões, tomando-se como referências os ensaios experimentais, a saber: a diferença percentual entre o modelo clássico e a realidade do ensaio experimental oscilou entre 1 % a 5 %, enquanto para o modelo completo, com as inclusões das perdas (separadas) consubstanciou uma oscilação menor das diferenças, ou seja, de 1 % a 3 %.

5. REFERÊNCIAS

1. Aguiar, P. R. Modelos, Simulações e Ensaio de Máquinas Assíncronas. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, (1990).
2. Aguiar, P. R. & Rotta, I. Aprimoramentos nas Simulações de Sistemas para os Acionamentos e os Controles. IV C.L.A., México, (1990).
3. Rossi, J. C. A Máquina Assíncrona em Condições Especiais de funcionamento. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, (1987).
4. Rotta, I. A Modelagem da Máquina Assíncrona. Anais do I. C.L.A e 5. C.B.A, p. 344-349, (1984).

Enderços para correspondência:

Paulo Roberto de Aguiar
FET - DETE - UNESP
Av. Luiz Edmundo C. Coube, s/n
Cep 17033 - Bauru - SP

Ivan Rotta
R. Major José Inácio, 3595
Vila Nery
Cep 13560 - São Carlos - SP