UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO ALIMENTADO SOB FREQUÊNCIA VARIÁVEL

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

KLEIBER DAVID RODRIGUES

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO 1982

CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO ALIMENTADA SOB FREQUÊNCIA VARIÁVEL

KLEIBER DAVID RODRIGUES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

Prof. Ivo Barbi, Dr.Ing.
ORIENTADOR

P/ Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr.Ing.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ivo Barbi, Dr.Ing

Prof. Edson H. Watanabe, Dr.Ing.

Prof. Renato Carlson, Dr.Ing.

À minha esposa ,meus pais
e minha filha.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ivo Barbi, pela abnegada dedicação.

Aos meus colegas, amigos e professores que contribuiram para a realização deste trabalho, em especial aos Professores Denizar Cruz Martins e Jorge Dantas Melo.

Aos Professores componentes da Banca Examinadora.

Ao Programa CAPES - PICD e à Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio financeiro.

À minha esposa Valquíria pela paciência e incentivo.

RESUMO

Este trabalho trata do estudo do comportamento do motor monofásico de indução alimentado por fonte de tensão e freqüência variáveis, com o objetivo de controlar a sua velocidade.

São apresentados modelos para o estudo do motor em regimes permanente e transitório e programas para análise do seu comportamento, a partir dos modelos.

É realizado estudo do comportamento do fluxo magnético; são obtidas expressões que estabelecem vínculos entre a tensão de alimentação, a freqüência de alimentação e os parâmetros do motor, para manter o fluxo constante.

A questão da estabilidade do motor é abordada, sendo apresentados métodos simples para o controle indireto do torque desenvolvido.

Todos os resultados teóricos são comparados experimentalmente, com o emprego de um protótipo de laboratório de 1/2 H.P.

ABSTRACT

This work investigates the behavior of the single-phase induction motor as fed by a variable voltage and frequency source. The purpose is primarily to control the motor's speed.

Models for both transient and steady-state conditions are presented, and computer programs based on these models have been developed to study the performance of the motor.

The behavior of the magnetic flux has been investigated. Also, equations relating the source voltage and frequency and motor parameters, in order to keep a constant flux have been stablished.

The problem of motor stability is also studied, and simple methods for indirect torque control are presented.

All theorical results are experimentally verified through the use of a 1/2 HP laboraotry prototype.

SIMBOLOGIA

a - relação de transformação estator-rotor

E - tensão contínua

Eg - tensão gerada

E_{REF} - tensão referência

f_s - freqüência de alimentação

f_r - freqüência do rotor

I_a - corrente da armadura da máquina de corrente contínua

I_r^s - corrente do rotor no eixo direto (valor eficaz)

I_{REF} - corrente de referência

I_r^q - corrente do rotor do eixo em quadratura (valor eficaz)

I_r^{*q} - complexo conjugado de I_r^q

I_{rt} - corrente de alimentação do motor, com rotor travado

$\bar{I}_r^+$, $\bar{I}_r^-$ - componentes de seqüências positiva e negativa da corrente do rotor

i_r^d - corrente do rotor no eixo direto(valor instantâneo)

I_s - corrente do estator

I_s^d - corrente do estator no eixo direto (valor eficaz)

I_s^q - corrente do estator no eixo em quadratura (valor eficaz)

$\bar{I}_s^+$, $\bar{I}_s^-$ - componentes de seqüências positiva e negativa da corrente do estator

I_s^o, I_s^α, I_s^β - componentes $o\alpha\beta$ da corrente do estator

i_s - corrente do estator (valor instantâneo)

i_s^d - corrente do estator no eixo direto (valor instantâneo)

i_s^q - corrente do estator no eixo em quadratura (valor instantâneo)

I_{vazio} - corrente de alimentação do motor, a vazio

K - constante entre a tensão e a freqüência de alimentação

L_s - indutância cíclica do estator

L_r - indutância cílica do rotor

l_1 - indutância de dispersão do estator

l_2 - industância de dispersão do rotor referida ao estator

m - indutância magnetizante

m_{sr} - indutância mútua cíclica estator-rotor

N - número de espiras

N_s - número de espiras do estator

N_B - número de espiras da bobina de sondagens

n - número de pares de polos

n_1 - relação entre velocidade mecânica e velocidade síncrona

P_e - perdas na fonte de tensão (E)

P_i - perdas no inversor

P_j - perdas Joule

P_{mec} - perdas mecânicas

P_{rt} - potência com rotor travado

p - símbolo de derivada

R - resistência de carga

R_e - resistência equivalente

R_r - resistência do rotor

R_s, R_1 - resistência do estator

R_2 - resistência do rotor referida ao estator

s - escorregamento

T - torque

T_{nom} - torque nominal

t - tempo

V - tensão de alimentação

V_B - tensão na bobina de sondagem

V_m - máxima tensão de pico na bobina de sondagem

V_{nom} - tensão de alimentação nominal

V_{rt} - tensão de alimentação com rotor travado

v_s^d - tensão do estator no eixo direto

v_s^q - tensão do estator no eixo em quadratura

$\bar{V}_s^+$, $\bar{V}_s^-$ - componentes de seqüências positiva e negativa da tensão

X_e - reatância equivalente

X_m - reatância de magnetização

Xm_{sr} - reatância cíclica estator-rotor

X_r - reatância do rotor

X_s, X_1 - reatância do estator

X_2 - reatância de dispersão do rotor referida ao estator

$[Z]$ - matriz impedância

$[Z_c]^t$ - matriz dos cofatores de $[Z]$, transposta

Z_e - impedância equivalente

Z_1 - impedância do estator

α - relação de transformação estator-bobina de sondagem

ΔV - queda de tensão do estator

θ' - velocidade do rotor

λ - fluxo real medido

λ_c - fluxo real calculado

ϕ - fluxo concatenado

ϕ_c - fluxo concatenado calculado

ϕ_r^o, ϕ_r^α, ϕ_r^β - componentes $o\alpha\beta$ do fluxo do rotor

ϕ_s^o, ϕ_s^α, ϕ_s^β - componentes $o\alpha\beta$ do fluxo do estator

ψ' - velocidade do eixo de referência

ω - pulsação da tensão na saída do inversor

ω_m - velocidade mecânica

ω_r - pulsação da corrente do rotor

ω_s - velocidade síncrona

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

Classicamente, quando se deseja um acionamento à velocidade variável, tem-se empregado os motores de corrente contínua, devido a sua facilidade de controle.

Contudo, alguns fatores, tais como, custo elevado, manutenção freqüente, vida útil curta, incapacidade de operar com velocidades, correntes e potências elevadas, inadequação a atmosferas empoeiradas ou explosivas, limitam o seu emprego.

Em substituição ao motor de corrente contínua, tem-se empregado o motor de indução alimentado com freqüência variável. Com esse tipo de alimentação ele apresenta características análogas ao motor de corrente contínua, sem os inconvenientes acima citados, apesar de exigir comandos muito mais complexos a nível de estrutura de conversor estático de potência e circuitos auxiliares.

Além disso, quando se trata de potências fracionárias, o custo relativo do conversor torna-se muito elevado em relação ao custo do motor, aliado ao fato que comumente, nesses casos, o motor empregado é o monofásico.

Nesses casos, em que a carga exige apenas motores de potência fracionária, a obtenção de velocidade variável a partir de motor monofásico com freqüência variável, foi proposto como uma opção interessante, no seio do grupo de pesquisa que constitui o LAMEP (Laboratório de Máquinas Elétricas e Eletrônicas de Potência) da UFSC.

Espera-se com isto reduzir a complexidade a nível eletrônico, reduzir o custo relativo do conversor em relação ao custo do motor e reduzir o custo total do sistema.

Neste trabalho são apresentados os estudos realizados com o objetivo mencionado, ou seja, controlar a velocidade do motor monofásico de indução por meio de freqüência de alimentação variável.

CAPÍTULO 1

MODELOS DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO

1.1. Introdução:

Neste capítulo, será feito um estudo de alguns modelos do motor monofásico de indução, os quais serão apresentados com a finalidade de atender as necessidades básicas deste trabalho, não havendo, portanto, uma preocupação com o desenvolvimento e a origem dos mesmos.

1.2. Modelo Generalizado de Park da Máquina de Indução Polifásica:

O modelo generalizado de Park para a máquina de indução polifásica é dado por [1]:

$$\begin{bmatrix} v_s^d \\ v_s^q \\ \\ v_r^d \\ v_r^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -L_s\psi' & pm_{sr} & -m_{sr}\psi' \\ L_s\psi' & R_s + pL_s & m_{sr}\psi' & pm_{sr} \\ & & & \\ pm_{sr} & -nm_{sr}(\psi'-\theta') & R_r+pL_r & -nL_r(\psi'-\theta') \\ nm_{sr}(\psi'-\theta') & pm_{sr} & nL_r(\psi'-\theta') & R_r+pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_s^q \\ \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} \quad (1.1.a)$$

$$T = nm_{sr}\,(i_s^q\, i_r^d - i_s^d\, i_r^q) \quad (1.1.b)$$

v_s^d e i_s^d tensão e corrente do estator no eixo direto

v_s^q e i_s^q tensão e controle do estator no eixo em quadratura

v_r^d e i_r^d tensão e corrente do rotor no eixo direto

v_r^q e i_r^q tensão e corrente do rotor no eixo em quadratura

R_s	resistência do estator
R_r	resistência do rotor
L_s	indutância cíclica do estator
L_r	indutância cíclica do rotor
p	símbolo de derivada
ψ'	velocidade dos eixos de referência
θ'	velocidade do rotor
n	número de pares de polos
T	torque instantâneo

O sistema de equações apresentado é uma representação do esquema que se sugere, figura (1.1.), onde:

S_α e S_β são eixos estacionários

d e q são eixos de referência que giram a uma velocidade ψ'.

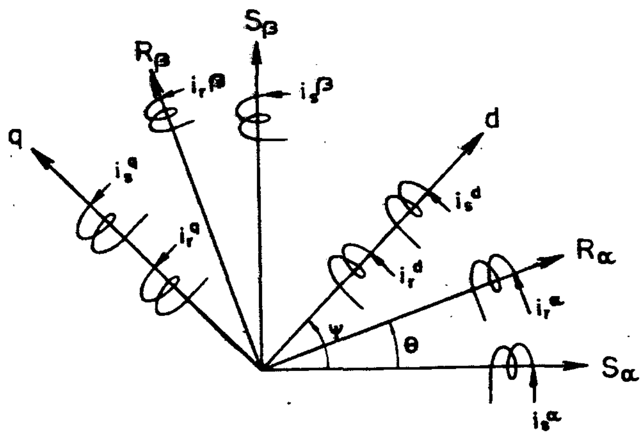

Figura 1.1. - Esquema da máquina de indução polifásica (modelo de Park generalizado)

Este modelo generalizado de Park para o motor de indução polifásico, será utilizado para se obter o modelo generalizado do motor de indução monofásico.

1.3. Modelo generalizado de Park para o Motor Monofásico de Indução:

Tomando a equação (1.1.a) e o esquema do motor monofásico de indução da figura 1.2.,

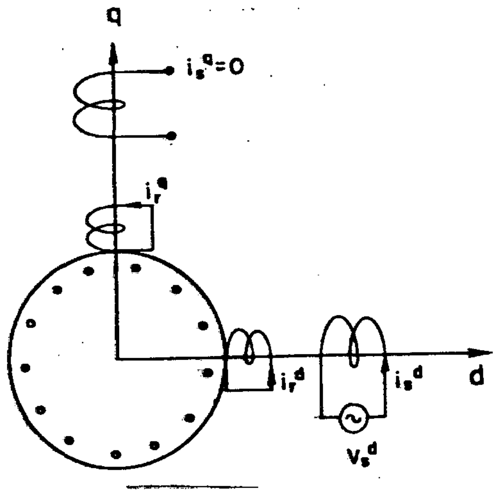

Figura 1.2. - Esquema do motor monofásico de indução

sabendo que:

- A corrente no eixo em quadratura é nula, pois o enrolamento está aberto;
- A tensão no eixo em quadratura não interfere no sistema, podendo ser desprezada;
- Sendo o rotor do motor de indução monofásico do tipo Gaiola, as tensões rotóricas do eixo direto e em quadratura, são nulas.

Assim, o modelo para regimes transitórios do motor monofásico de indução será [1]:

$$\begin{bmatrix} v_s^d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+pL_s & pm_{sr} & -m_{sr}\,\psi' \\ pm_{sr} & R_r+pL_r & -nL_r(\psi'-\theta') \\ nm_{sr}(\psi'-\theta') & nL_r(\psi'-\theta') & R_r+pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} \qquad (1.2.a)$$

$$T = n\ m_{sr}\ (i_s^d\ i_r^q) \qquad (1.2.b)$$

1.4. Modelo para Regime Permanente, alimentação Senoidal a partir do Modelo de Park - Circuito Equivalente:

Para obtenção do modelo do motor monofásico de indução em regime permanente, toma-se o modelo transitório, fazendo as seguintes considerações:

- Referência no estator ($\psi' = 0$)
- Regime permanente, alimentação senoidal, daí:

$$\theta' = \omega_m$$

$$p = j\omega$$

$$n = \frac{\omega}{\omega_s}$$

$$\omega_s = \frac{120.\,f_s}{\text{número de polos}}$$

$$n_1 = \frac{\omega_m}{\omega_s}$$

$$v_s^d = V$$

$$i_s^d = I_s^d$$

$$i_r^d = I_r^d$$

$$i_r^q = I_r^q$$

Obtem-se, assim [1]:

$$\begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+jX_s & jXm_{sr} & 0 \\ jXm_{sr} & R_r+jX_r & n_1X_r \\ -n_1Xm_{sr} & -n_1X_r & R_r+jX_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^{\,d} \\ I_r^{\,d} \\ I_r^{\,q} \end{bmatrix} \qquad (1.3.a)$$

$$T = n\ m_{sr}\ R\ (\overset{*}{I}{}_r^{\,q}\ \ I_s^{\,d}) \qquad (1.3.b)$$

Sendo:

ω_m	velocidade mecânica
ω	pulsação da tensão de alimentação
ω_s	velocidade de sincronismo
f_s	freqüência de alimentação
V	tensão de alimentação em regime permanente, alimentação senoidal (valor eficaz)
$I_s^{\,d}$	corrente do estator do eixo direto, para regime permanente, alimentação senoidal
$I_r^{\,d}$	corrente do rotor de eixo direto, para regime permanente, alimentação senoidal
$I_r^{\,q}$	corrente do rotor do eixo em quadratura, para regime permanente, alimentação senoidal
n	número de pares de polos
R_s	resistência do estator
R_r	resistência do rotor
X_s	reatância cíclica do estator
X_r	reatância cíclica do rotor
Xm_{sr}	reatância de magnetização
$\overset{*}{I}{}_r^{\,q}$	complexo conjugado de $I_r^{\,q}$

A equação (1.3.b) é a expressão do torque para grandezas fasoriais.

O circuito equivalente para o modelo de Park do motor monofásico de indução em regime permanente, alimentação senoidal está re presentado na figura (1.3.) [3].

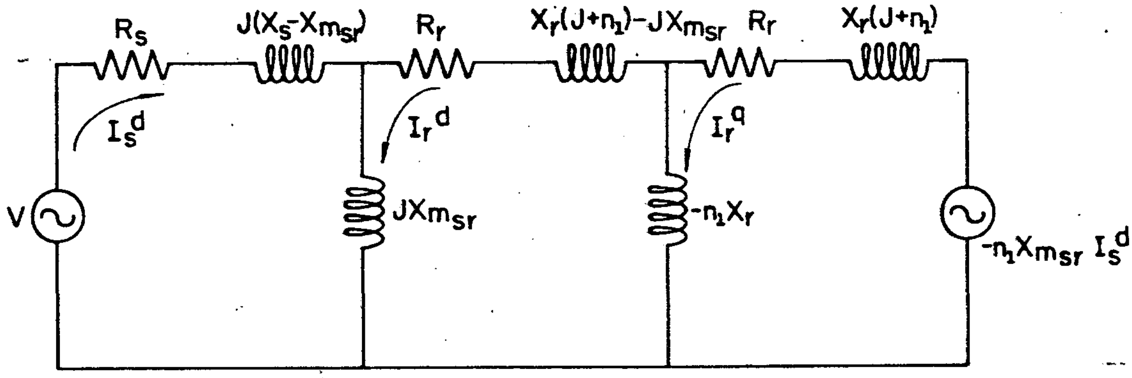

Figura 1.3. - Circuito equivalente do motor de indução monofásico em regime permanente, alimentação senoidal, a partir do modelo de Park.

1.5. Modelo clássico para o motor monofásico de Indução em regime permanente - circuito equivalente:

As equações de tensão em componentes simétricas para o motor trifásico de indução ou bifásico desbalanceado são [1]:

$$\overline{V}_s^{+} = (R_s + j\omega_s L_s)\, \overline{I}_s^{+} + j\omega_s \cdot m_{sr} \cdot \overline{I}_r^{+} \qquad (1.4.a)$$

$$0 = j\omega_s\, m_{sr} \cdot \overline{I}_s^{+} + \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s L_r\right) \overline{I}_r^{+} \qquad (1.4.b)$$

$$\overline{V}_s^{-} = (R_s + j\omega_s L_s)\, \overline{I}_s^{-} + j\omega_s \cdot m_{sr} \cdot \overline{I}_r^{-} \qquad (1.4.c)$$

$$0 = j\omega_s . m_{sr}\, \overline{I}_s^{-} + \left[\frac{R_r}{(2-s)} + j\omega_s . L_r\right] \overline{I}_r^{-} \qquad (1.4.d)$$

Como:

$$\overline{V}_s^{+} = \frac{V_s^{d} + jV_s^{q}}{\sqrt{2}} \qquad (1.5.)$$

$$\overline{V}_s^{-} = \frac{V_s^{d} - jV_s^{q}}{\sqrt{2}} \qquad (1.6.)$$

$$\overline{I}_s^{\,+} = \frac{I_s^{\,d} + jI_s^{\,q}}{\sqrt{2}} \tag{1.7.}$$

$$\overline{I}_s^{\,-} = \frac{I_s^{\,d} - jI_s^{\,q}}{\sqrt{2}} \tag{1.8.}$$

Para o motor monofásico de indução, $I_s^{\,q} = 0$, daí:

$$\overline{I}_s^{\,+} = \overline{I}_s^{\,-} = \frac{I_s^{\,d}}{\sqrt{2}} \tag{1.9.}$$

Adicionando $\overline{V}_s^{\,+}$ e $\overline{V}_s^{\,-}$, e fazendo $V_s^{\,d} = V$:

$$\overline{V}_s^{\,+} + \overline{V}_s^{\,-} = \sqrt{2}\,.\,V \tag{1.10.}$$

Mas:

$$\overline{V}_s^{\,+} = \overline{Z}^{+}\,\overline{I}_s^{\,+}$$

$$\overline{V}_s^{\,-} = \overline{Z}^{-}\,\overline{I}_s^{\,-}$$

Então:

$$\overline{V}_s^{\,+} + \overline{V}_s^{\,-} = \overline{Z}^{+}\,\overline{I}_s^{\,+} + \overline{Z}^{-}\,\overline{I}_s^{\,-} \tag{1.11.}$$

Substituindo as equações (1.9.) e (1.10) em (1.11.):

$$\sqrt{2}\,.\,V = (\overline{Z}^{+} + \overline{Z}^{-})\,.\,\frac{I_s^{\,d}}{\sqrt{2}}$$

$$V = \frac{(\overline{Z}^{+} + \overline{Z}^{-})}{2}\,.\,I_s^{\,d} \tag{1.12.}$$

O circuito equivalente obtido a partir dessas expressões está representado na figura (1.4.) [1], [2], [3].

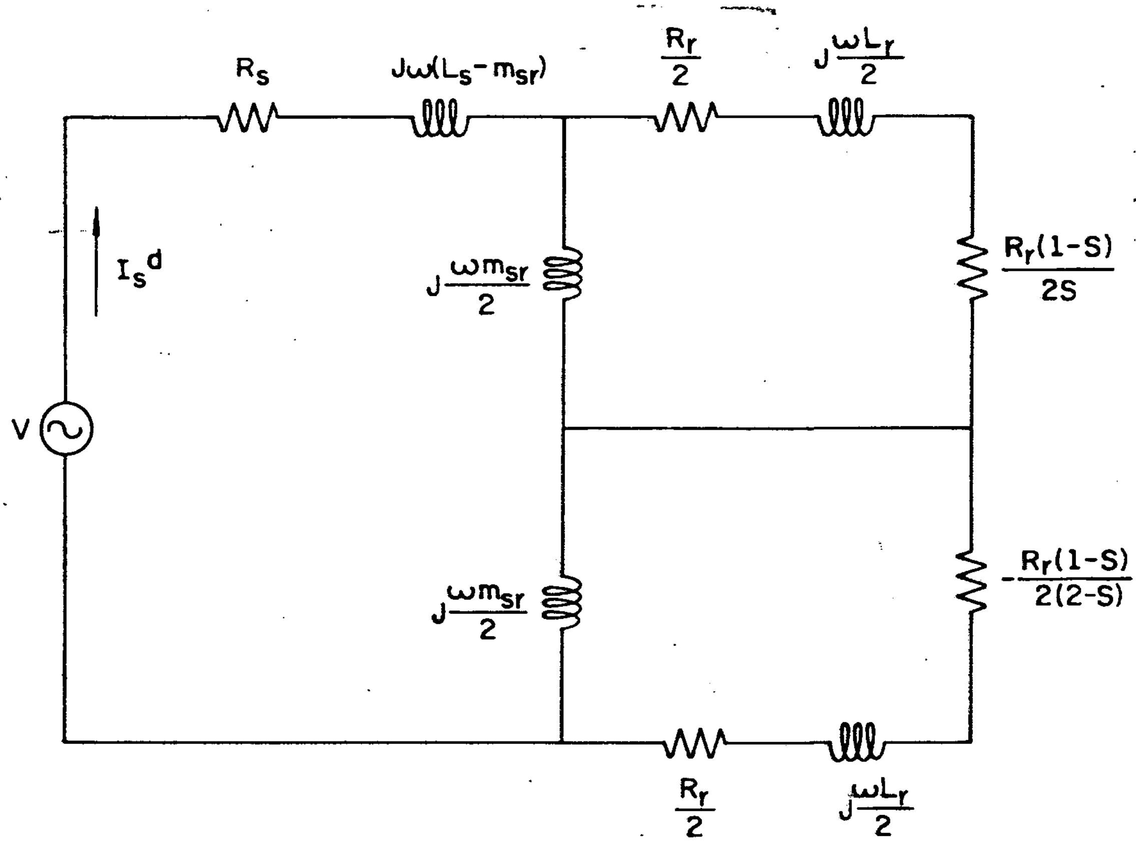

Figura 1.4. - Circuito equivalente do motor monofásico de indução em regime permanente, alimentação senoidal, utilizando parâmetros cíclicos.

Como os parâmetros de dispersão do motor são:

$l_1 = L_s - am_{sr}$ indutância de dispersão do estator.

$l_2 = a^2 L_r - am_{sr}$ indutância de dispersão do rotor referida ao estator

$m = am_{sr}$ indutância de magnetização

$\frac{R_r}{s} = \frac{a^2 R_r}{s}$ resistência do rotor referido ao estator

$R_1 = R_s$ resistência do estator

a relação de transformação estator-rotor que será considerada igual a um, porque todas as medidas foram feitas a partir do estator.

Então o circuito equivalente em termos de parâmetros de dispersão será:

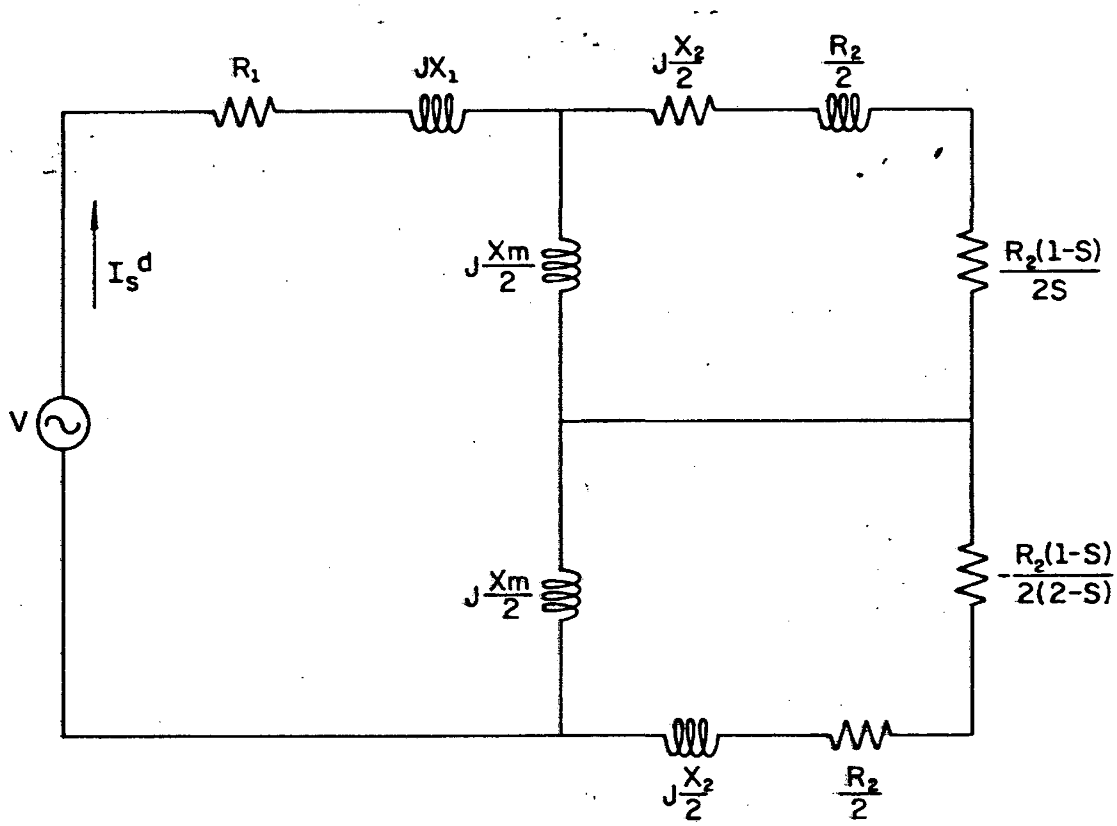

Figura 1.5. - Circuito equivalente clássico do motor monofásico de indução em regime permanente, alimentação senoidal, utilizando parâmetros de dispersão.

1.6. Conclusões:

Os modelos para o motor monofásico de indução apresentados, abrangem todas suas condições de funcionamento; desde o regime permanente, alimentação senoidal, até o regime transitório sob qualquer tipo de alimentação.

Esses modelos serão utilizados nos capítulos seguintes, no desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO, SOB FREQÜENCIA VARIÁVEL, ALIMENTAÇÃO SENOIDAL, EM REGIME PERMANENTE, LEI TENSÃO - FREQÜÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO LINEAR

2.1: Introdução :

O objetivo deste capítulo, é obter, a partir dos modelos do capítulo 1, as equações de corrente eficaz do estator, do torque médio e do fluxo concatenado, todos em função da velocidade do motor, para várias freqüências de alimentação.

Tendo sido estabelecidas essas equações, obter a partir delas as respectivas características do motor utilizado.

Deve-se observar, que a relação entre a tensão de alimentação, por enquanto senoidal, e a freqüência de alimentação, é linear, ou, $\frac{V}{\omega}$ igual a um valor constante pré-estabelecido.

2.2. Equações das Correntes do Estator e do Rotor:

Tomando o modelo do motor monofásico de indução estabelecido a partir do modelo de Park [1], para regime permanente, alimentação senoidal, como foi mostrado no capítulo 1, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+jX_s & jXm_{sr} & 0 \\ jXm_{sr} & R_r + jX_r & n_1X_r \\ -n_1Xm_{sr} & -n_1X_r & R_r+jX_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s{}^d \\ I_r{}^d \\ I_r{}^q \end{bmatrix} \tag{2.1.a}$$

$$T = n\ m_{sr}\ R\ [\overset{*}{I}_r{}^q\ \ I_s{}^d] \tag{2.1.b}$$

Fazendo:

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_s+jX_s & jXm_{sr} & 0 \\ jXm_{sr} & R_r+jX_r & n_1X_r \\ -n_1Xm_{sr} & -n_1X_r & R_r+jX_r \end{bmatrix} \qquad (2.2.)$$

Para se obter as expressões das correntes na equação(2.1.a) é necessário inverter a matriz [Z].

$$[Z]^{-1} = \frac{[Zc]^t}{\det[Z]} \qquad (2.3.)$$

Sendo:

$[Zc]^t$ = matriz dos co-fatores de [Z], transposta

$[Z]^{-1}$ = inverso da matriz [Z]

det[Z] = determinante da matriz [Z]

$$[Zc]^t = \begin{bmatrix} (R_r+jX_r)^2+(n_1X_r)^2 & --jXm_{sr}(R_r+jX_r) & jXm_{sr}\ n_1X_r \\ -jXm_{sr}(R_r+jX_r) - \\ -n_1^2\ X_r\ Xm_{sr} & (R_r+jX_r)(R_s+jX_s) & -(R_s+jX_s)n_1X_r \\ -n_1\ jXm_{sr}\ X_r + \\ +n_1\ Xm_{sr}(R_r+jX_r) & (R_s+jX_s)n_1X_r- \\ -jn_1\ Xm_{sr}^2 & (R_s+jX_s)(R_r+jX_r)+ \\ +Xm_{sr} \end{bmatrix} \qquad (2.4.)$$

$$\det[Z]=(R_s+jX_s)\{[(R_r+jX_r)^2+(n_1X_r)^2]+Xm_{sr}^2[R_r+j(1-n_1^2)X_r]\} \qquad (2.5.)$$

E ainda:

$$\begin{bmatrix} I_s^d \\ I_r^d \\ I_r^q \end{bmatrix} = [Z]^{-1} \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2.6.)$$

Assim:

$$I_s^d = \frac{[(R_r+jX_r)^2 + (n_1X_r)^2] \cdot V}{\det[Z]} \qquad (2.7.)$$

$$I_r^d = \frac{-jXm_{sr}[R_r + j(1-n_1^2)\, X_r] \cdot V}{\det[Z]} \qquad (2.8.)$$

$$I_r^q = \frac{j(n_1\, Xm_{sr}\, R_r) \cdot V}{\det\, [Z]} \qquad (2.9.)$$

2.3. Equação da Corrente do Estator em Função da Velocidade do Motor:

Da equação (2.7.):

$$I_s^d = \frac{[(R_r+jX_r)^2 + (n_1\, X_r^2)]}{\det[Z]} \cdot V$$

Daí vem:

$$I_s^d = \left\{\frac{R_r^2 + j2R_rX_r - X_r^2 + n_1^2\, X_r^2}{\det[Z]}\right\} \cdot V$$

Em módulo:

$$I_s^d = \frac{\{[R_r^2 + X_r^2\, (n_1^2 - 1)]^2 + (2R_rX_r)\}^{1/2}}{|\det[Z]|} \cdot V$$

A equação da corrente do estator (valor eficaz), em função da velocidade será dado pela expressão (2.10):

$$I_s^{d} = \left\{ \frac{[R_r^2 + X_r^2\,(n_1^2 - 1)^2 + (2R_rX_r)^2]}{\{R_s\,[R_r^{\,2} + X_r^{\,2}\,(n_1^2 - 1)] + R_r\,[Xm_{sr}^2 - 2X_sX_r]\}^2 + \{X_s\,[R_r^2 + X_r^2\,(n_1^2 - 1)] + X_r\,[Xm_{sr}^2(1 - n_1^2) + 2R_sR_r]\}^2} \right\}^{1/2} . V \quad (2.10.)$$

2.4. Expressão do Torque em Função do Velocidade:

Substituindo as equações da corrente do estator (2.7.) e corrente do rotor em quadratura (2.8.) na equação do torque (2.1.b):

$$T = n\, m_{sr}\, R\, \{ \frac{n_1\, Xm_{sr}\, R_r}{(\det\,[Z])^*} \cdot \frac{(R_r + jX_r)^2 + (n_1X_r)^2}{\det\,[Z]} \}\, V^2$$

Multiplicando e dividindo por ω:

$$T = -n\, \frac{\omega . m_{sr}}{\omega} \cdot R\{ n_1 Xm_{sr}\, R_r [R_r^2 - j2R_rX_r - X_r^2] + n_1^3 Xm_{sr} X_r^2 R_r \} \frac{V^2}{|\det[Z]|^2}$$

$$T = -n\, \frac{Xm_{sr}}{\omega} \{ n_1 Xm_{sr}\, R_r [R_r^2 + (n_1^2 - 1)\, X_r^2 \} \frac{V^2}{|\det[Z]|^2}$$

$$T = \frac{n\, Xm_{sr}^2}{\omega} \{ \frac{n_1\, R_r [X_r^2\, (1 - n_1^2) - R_r^2}{|\det[Z]|^2} \}\, V^2$$

Da equação (2.5.), vem:

$$|\det[Z]|^2 = \{ [R_s(R_r^2 - X_r^2 + n_1^2\, X_r^2) + R_r(Xm_{sr}^2 - 2X_sX_r)]^2 + [X_s(R_r^2 - X_r^2 + n_1^2\, X_r^2) + X_r(Xm_{sr}^2 - n_1^2 Xm_{sr}^2 + 2R_sR_r)]^2 \} \quad (2.11.)$$

Então, o torque médio em função da velocidade será dado pela expressão (2.12.)

$$T = \frac{n(VXm_{sr})^2}{\omega} \left\{ \frac{n_1 R_r \left[X_r^2 \, (1-n_1{}^2) - R_r^2 \right]}{\{R_s \, [R_r{}^2 + X_r{}^2 (n_1^2 - 1)] + R_r \, [Xm_{sr}^2 - 2X_s X_r]\}^2 + \{X_s \, [R_r^2 + X_r^2 \, (n_1^2 - 1)] + X_r \, [Xm_{sr}^2 \, (1-n_1^2) - 2R_s R_r\}^2} \right\} \quad (2.12.)$$

2.5. Equação do Fluxo Concatenado em Função da Velocidade do Motor:

O fluxo do motor de indução é representado em variáveis $\alpha\beta o$, pela equação (2.13.)[1]:

$$\begin{bmatrix} \emptyset_s^{o} \\ \emptyset_s^{\alpha} \\ \emptyset_s^{\beta} \\ \emptyset_r^{o} \\ \emptyset_r^{\alpha} \\ \emptyset_r^{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{so} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 & m_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & L_s & 0 & 0 & m_{sr} \\ 0 & 0 & 0 & L_{ro} & 0 & 0 \\ 0 & m_{sr} & 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & m_{sr} & 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^{o} \\ I_s^{\alpha} \\ I_s^{\beta} \\ I_r^{o} \\ I_r^{d} \\ I_r^{q} \end{bmatrix} \qquad (2.13.)$$

Na equação (2.13.), os termos possuem o seguinte significado:

$\emptyset_s^{o}$ - fluxo do estator para desequilíbrio de fase

$\emptyset_s^{\alpha}=\emptyset_s^{d}=\emptyset_s$ - fluxo do estator no eixo direto.
É o fluxo de interesse nesse estudo.

$\emptyset_s^{\beta} = \emptyset_s^{q}$ - fluxo do estator no eixo em quadratura

$\emptyset_r^{o},\emptyset_r^{\alpha},\emptyset_r^{\beta}$ - componentes $o\alpha\beta$, do fluxo do rotor.

Da equação (2.13.), como $I_s^{\alpha} = I_s^{d}$, obtem-se a expressão (2.14.), que representa o fluxo do estator no eixo direto:

$$\emptyset_s = L_s\, I_s^{d} + m_{sr}\, I_r^{d} \qquad (2.14.)$$

Substituindo as expressões da corrente do estator no eixo direto (2.7.), e a corrente do rotor no eixo em quadratura (2.8.),na expressão (2.14.), vem:

$$\emptyset_s = \frac{L_s[(R_r + jX_r)^2 + (n_1X_r)^2].V}{det[Z]} + \frac{m_{sr}\{-jXm_{sr}[R_r + j(1-n_1^2)X_r]\}.V}{det[Z]}$$

$$\emptyset_s = \frac{L_s[(R_r^2 - X_r^2 + n_1^2X_r^2) + j2R_rX_r].V}{det[Z]} + \frac{m_{sr}\{[Xm_{sr}X_r(1-n_1^2)] - jXm_{sr}R_r\}.V}{det[Z]} \quad (2.15.)$$

Multiplicando e dividindo a expressão (2.15.) por ω:

$$\emptyset_s = \frac{\{[X_s(R_r^2 - X_r^2 + n_1^2X_r^2) + Xm_{sr}^2\ X_r(1-n_1^2)] + j[2X_sX_rR_r - Xm_{sr}^2\ R_r]\}}{det[Z]} \cdot \frac{V}{\omega}$$

Em módulo, o fluxo concatenado em função da velocidade, será dado pela expressão (2.16.):

$$\phi_s = \left\{ \frac{X_s\,(R_r^2 - X_r^2 + n_1^2 X_r^2) + Xm_{sr}^2 X_r\,(1-n_1^2)\;^2 + [2X_s X_r R_r - Xm_{sr}^2\,R_r]^2}{\{R_s\,[R_r^2 + X_r^2\,(n_1^2-1)] + R_r\,[Xm_{sr}^2 - 2X_s X_r]\}^2 + \{X_s\,[R_r^2 + X_r^2\,(n_1^2-1)] + X_r\,[Xm_{sr}^2\,(1-n_1^2) + 2R_r R_s\}^2} \right\}^{1/2} \cdot \frac{V}{\omega} \qquad (2.16.)$$

2.6. Obtenção das Características do Motor Utilizado:

As curvas das figuras (2.1.),(2.2.) e (2.3.), a seguir, foram traçadas utilizando as equações (2.10.),(2.12.) e (2.15.), respectivamente; para um motor monofásico de indução com os seguintes dados de placa:

Potência = 0,5 c.v

Tensão de Alimentação = 220/110 volts

Corrente Nominal = 4,5/9 ampères

Freqüência de Alimentação = 60Hz

Isolação Classe - A

Velocidade Nominal = 1725 RPM

Fator de Serviço = 1,25

Categoria = N

Foram obtidos os seguintes parâmetros, para esse motor (Apêndice A)[2]:

$R_s = 3.448\,\Omega$

$R_r = 3.564\,\Omega$

$X_s = X_r = 123,77\,\Omega$

$Xm_{sr} = 117,56\,\Omega$

Seu torque nominal é obtido da seguinte maneira:

$$T = \frac{\text{Potência (watts)}}{\text{Velocidade(RAD/s)}}$$

$$T_{nom} = \frac{(0,5)\ .\ 735}{1725.\ \frac{\pi}{30}}$$

$$T_{nom} = 2,03\ N\ .\ m$$

A freqüência do rotor nominal pode ser obtida da seguinte maneira:

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r$$

ou

$$\frac{\omega_m}{\omega_s} = (1 - \frac{\omega_r}{\omega_s})$$

onde:

$$\omega_s = \frac{4\,\pi\, f_s}{n}$$

e

$$\omega_r = 2\,\pi\, f_r$$

Como para o motor em estudo, n = 2, vem:

$$\frac{\omega_m}{\omega_s} = (1 - \frac{f_r}{f_s})$$

ou

$$\omega_m = \omega_s \; (1 - \frac{f_r}{f_s}) \qquad (2.17.)$$

A equação (2.17.) possibilita o cálculo da velocidade mecânica do motor, para uma determinada freqüência de alimentação e uma freqüência do rotor:

Ainda, da equação (2.17), pode-se tirar a equação (2.18.), a seguir:

$$f_r = f_s \; (1 - \frac{\omega_m}{\omega_s}) \qquad (2.18.)$$

Assim, pode-se calcular, com o uso da equação (2.18.), a freqüência do rotor nominal desse motor de 4 polos:

$$f_{r_{nom}} = 60 \left(1 - \frac{1725}{1800} \right)$$

$$f_{r_{nom}} = 2{,}5 \text{ Hz}$$

Com a freqüência do rotor nominal, utilizando a equação (2.17.), calcula-se a velocidade mecânica nominal para cada freqüência de alimentação, figura (2.1.)

Para se traçar as curvas das figuras (2.1.),(2.2.)e(2.3.), foi utilizado o programa do Apêndice (C-1)

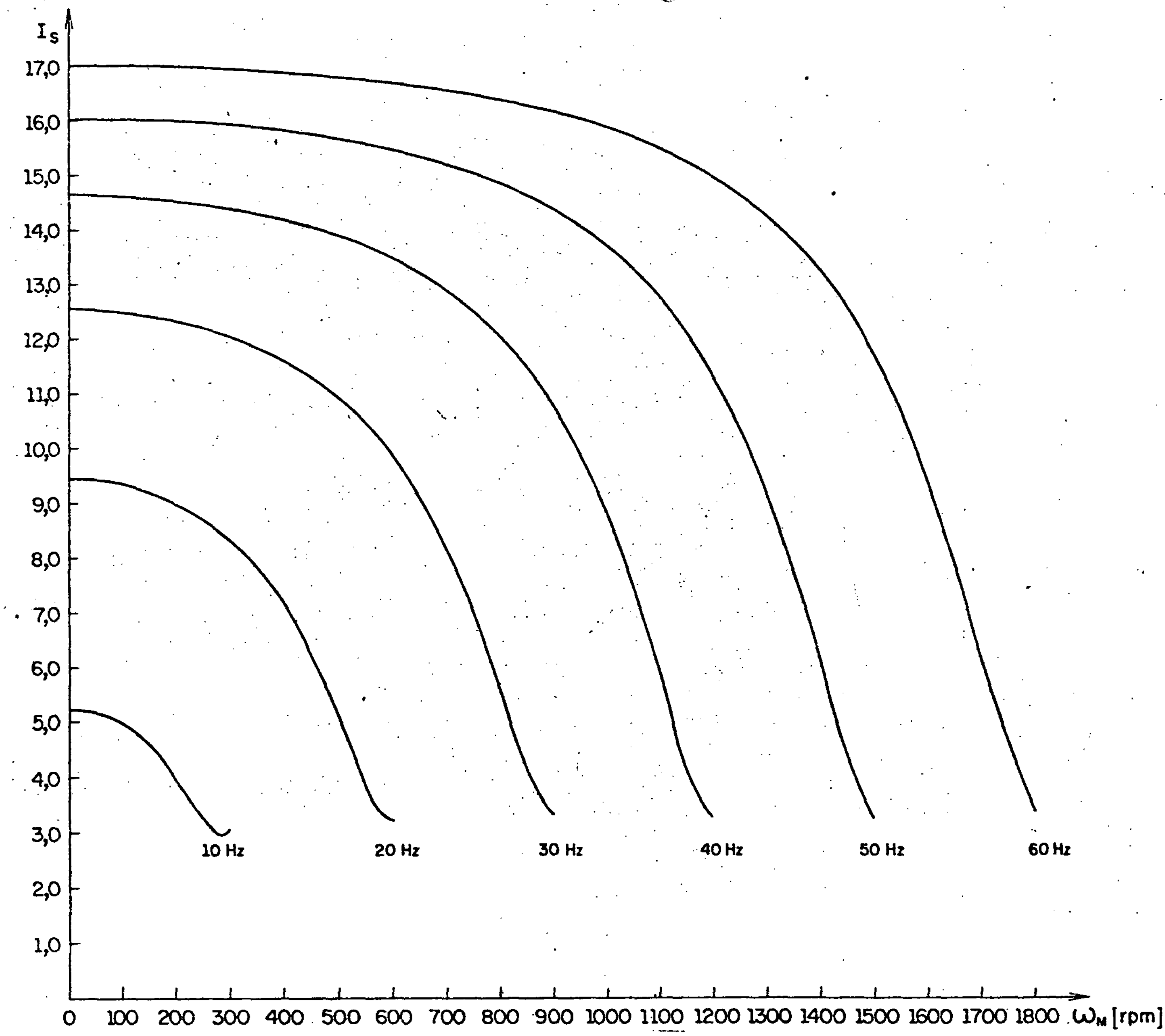

Figura 2.1. - Características corrente do estator - velocidade para várias freqüências de alimentação - Lei tensão-freqüência linear

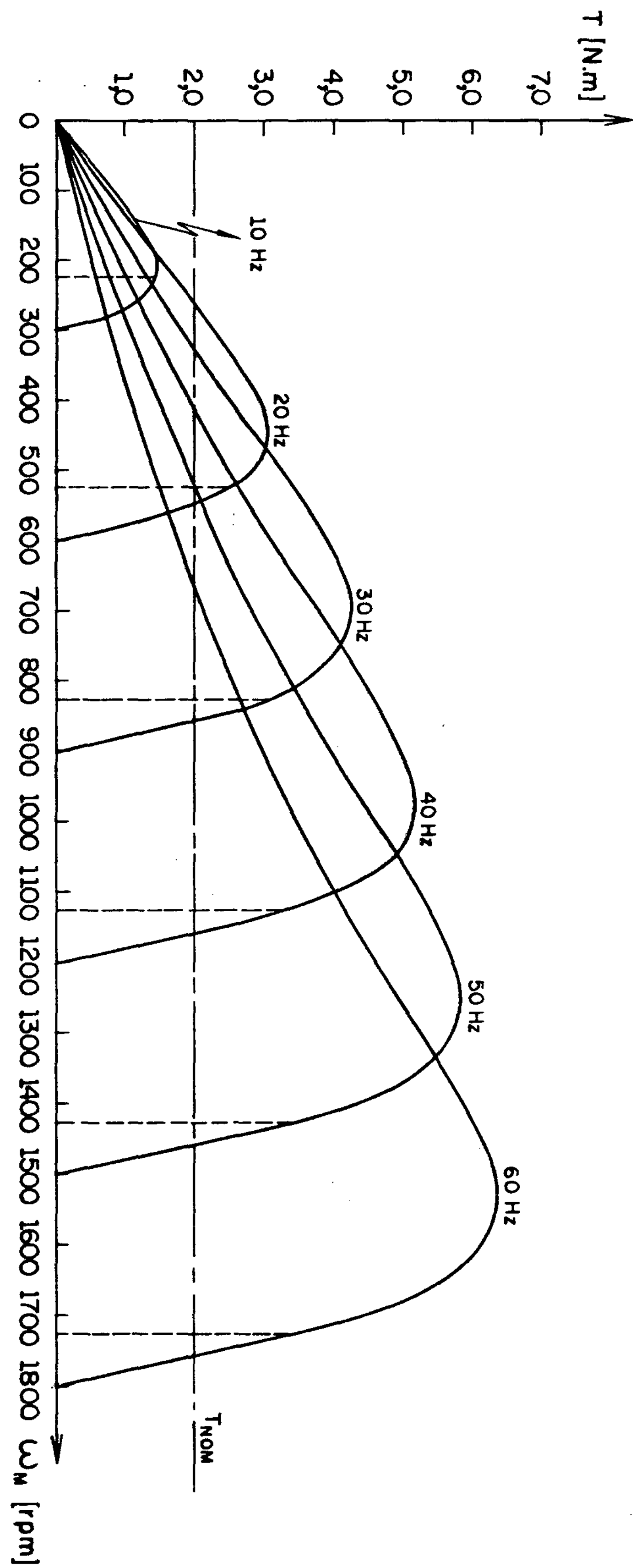

Figura 2.2. - Características torque-velocidade para várias freqüências de alimentação-Lei tensão-freqüência linear.

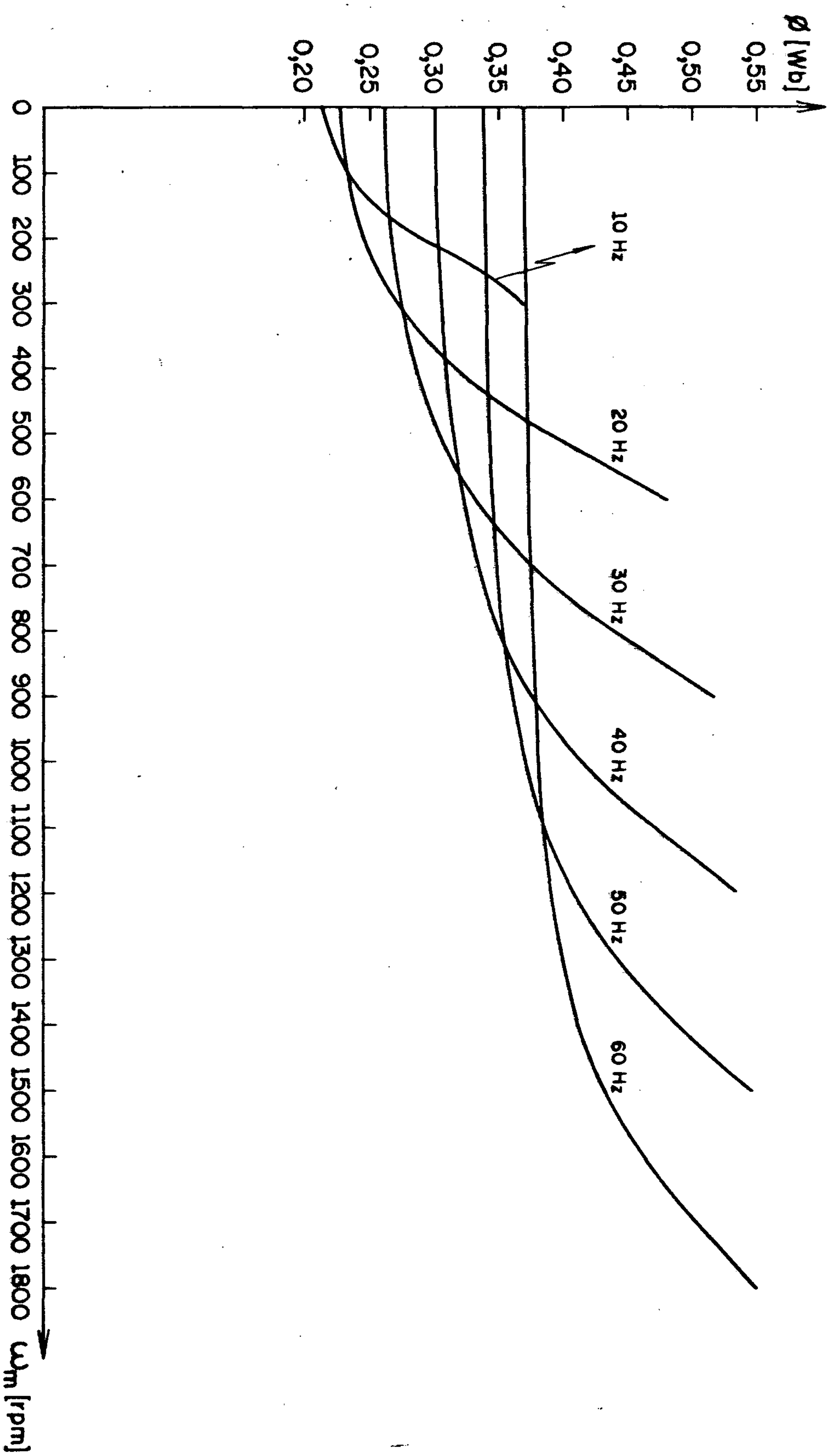

Figura 2.3. - Características fluxo-velocidade para várias freqüências de alimentação.Lei tensão-freqüência linear.

2.7. Análise das Características Obtidas:

Nas curvas da figura (2.2.), observa-se que o torque máximo cai com o decréscimo da freqüência de alimentação, tanto que,para determinadas freqüências, torna-se inferior ao torque nominal.

Isso ocorre porque o fluxo concatenado cai com o decréscimo da freqüência de alimentação, como se pode verificar nas curvas da figura (2.3.). Observa-se nessa figura, também, que o fluxo concatenado cai com a velocidade, para uma mesma freqüência de alimentação limitando dessa maneira, a operação do motor para as velocidades próximas da síncrona, para cada freqüência de alimentação, como se pode ver na figura (2.2.).

2.8. Verificação Experimental do Comportamento do Fluxo:

A seguir, faz-se um estudo comparativo entre o fluxo calculado através da expressão (2.15) e o fluxo obtido através de ensaios em laboratório.

2.8.a. - Método para obtenção de fluxo em laboratório:

Para obtenção do fluxo do motor, foram utilizadas duas bobinas de sondagem de 40 espiras cada uma, ligadas em série aditiva, alocadas nas ranhuras do estator. Na sua medição foi utilizado o sistema que se apresenta na figura (2.4.):

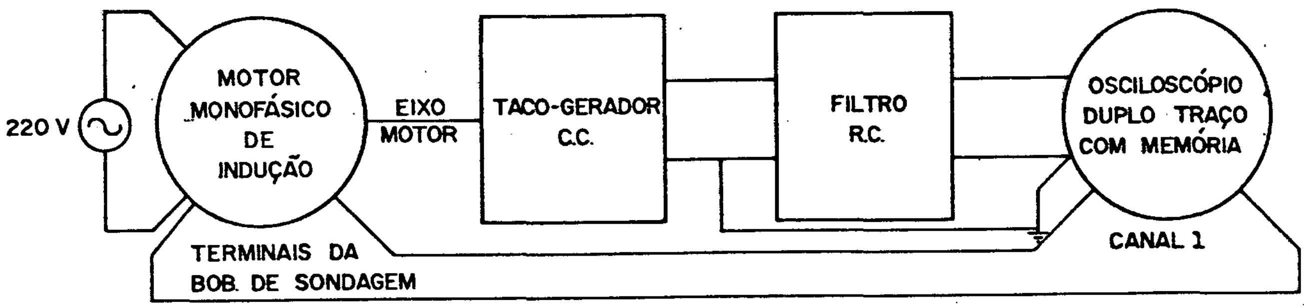

Figura 2.4. - Sistema utilizado para medição do fluxo do motor.

A seguir são discutidos os componentes do sistema de medição empregado:

2.8.a.1. - Filtro de duplo estágio:

O filtro R.C. de duplo estágio possui o circuito apresentado na figura (2.5.):

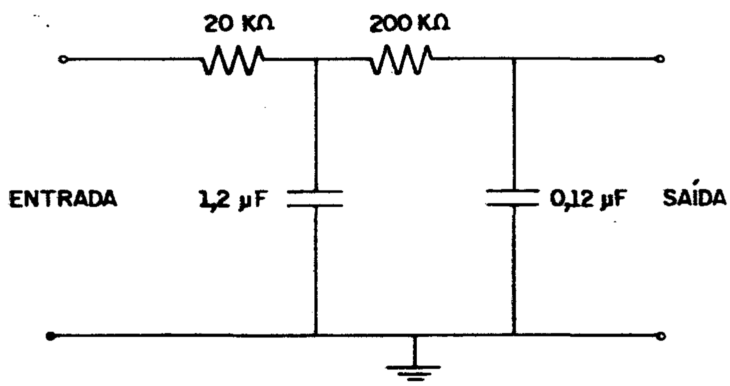

Figura 2.5. Circuito do filtro RC de duplo estágio.

Como a impedância da entrada de 5K do osciloscópio é menor que a impedância do filtro, coloca-se um amplificador operacional com configuração seguidor na saída deste, impedindo que o osciloscópio absorva o sinal observado.

2.8.a.2. - Bobinas de sondagem:

Essas bobinas possuem 40 espiras cada. São ligadas em série aditiva, dando 46,66 volts nos seus terminais, quando a tensão de alimentação é de 220 volts (valor eficaz).

Foi empregado fio esmaltado, # 22AWG, para que pudessem ser colocados nas ranhuras do estator, sem prejudicar o movimento do rotor.

O motor possui 4 polos. As bobinas foram colocadas em 2 polos distintos subsequentes.

2.8.a.3. - Taco-gerador de corrente contínua:

Ligado mecanicamente ao eixo do motor, o taco-gerador de corrente contínua fornece uma tensão de 10 volts na saída do filtro R.C. para 1790 rpm.

Este sinal é utilizado para realização da varredura do osciloscópio.

2.8.a.4. - Forma da onda do fluxo nos terminais da bobina de sondagem.

A forma de onda da tensão nos terminais da bobina de sondagem é a que se apresenta na figura (2.6.):

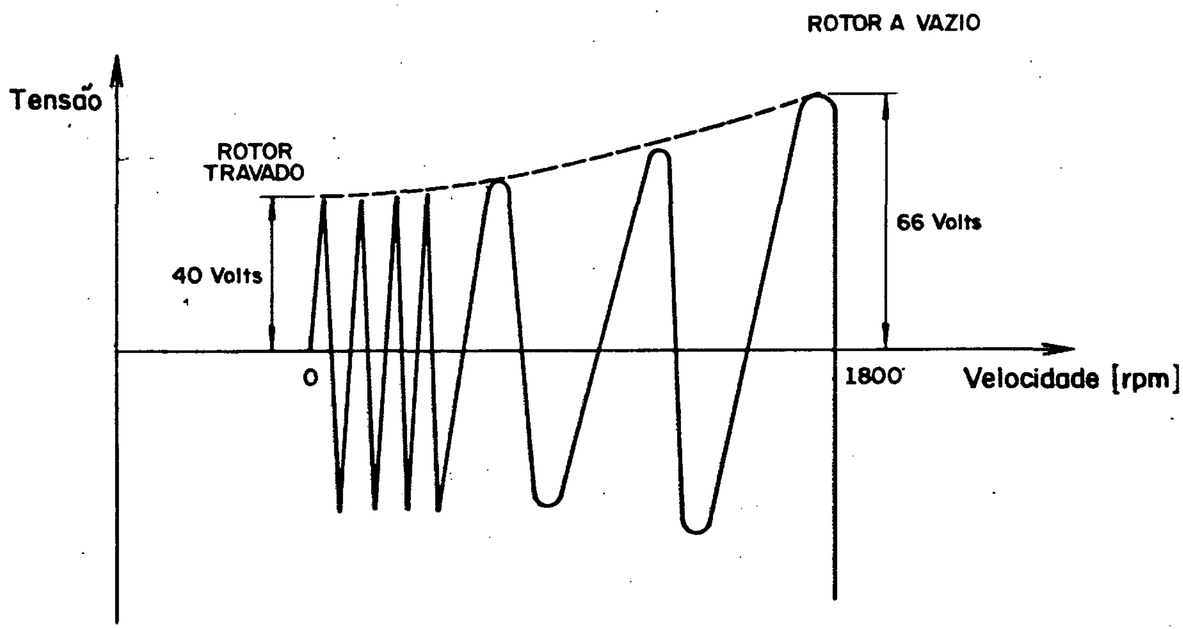

Figura 2.6. - Tensão obtida nos terminais da bobina de sondagem em função da velocidade.

2.8.b. - Obtenção do fluxo concatenado e real do motor em laboratório:

Tomando os valores de pico da forma de onda da tensão obtida nos terminais da bobina de sondagem, pode-se calcular os fluxos concatenado ($\emptyset$) e real (λ) motor.

Para obtenção desses fluxos em Weber, faz-se:

$$\emptyset = N \cdot \lambda = \frac{V_m}{\omega}$$

Sendo:

$\emptyset$ - fluxo concatenado em Weber (valor de pico)

λ - fluxo real em Weber (valor de pico)

N - número de espiras da bobina

ω - pulsação da tensão de alimentação

V_m valor máximo da tensão nos terminais da bobina de sondagem

Um exemplo do cálculo do fluxo concatenado e do fluxo real:

V_m = 66 volts

N = 80 espiras

f = 60 hertz

Assim:

$$\emptyset = \frac{66}{2.\pi.60}$$

$$\emptyset = 0,175\ [Wb]$$

e

$$\lambda = \frac{\emptyset}{N} = \frac{0,175}{80}$$

$$\lambda = 2,18 \times 10^{-3}\ [Wb]$$

Esses são os valores dos fluxos concatenado e real para o motor com funcionamento a vazio, com tensão de 220 volts e freqüência de alimentação 60 Hz.

Assim monta-se a tabela 2.2.:

Tensão de Pico (volts)	Divisões Horizontais	Escorregamento (s)	Velocidade(ω_m) [RPM]	Fluxo concatenado eficaz ($\emptyset$) [Wb]	Fluxo real eficaz (λ) x 10^{-3} [Wb]
66	0	0,0	1800	0,1237	1,54
60	1	0,104	1612,8	0,1125	1,40
52	2	0,179	1477,8	0,0975	1,21
48	3	0,253	1344,6	0,0900	1,12
46	4	0,402	1076,4	0,0862	1,07
44	5	0,552	806,4	0,0825	1,03
40	5,5	0,701	538,2	0,0750	0,93
40	6,0	0,85	270,0	0,0750	0,93
40	6,7	1,0	0,0	0,0750	0,93

Tabela 2.2 - Fluxos concatenado e real medidos para frequência de alimentação 60Hz e vários valores de velocidade.

2.8.c. - Obtenção do número de espiras equivalentes do enrolamento do estator:

Para se calcular o fluxo real do motor, é necessário a determinação do número de espiras do seu enrolamento do estator.

Assim, considera-se o motor operando com tensão nominal (220 volts) e freqüência de 60 Hz, sem carga no seu eixo. Dessa maneira, tem-se:

$I_{vazio} = 3,52A$

$R_1 = 3,448\Omega$

$X_1 = 5,617\Omega$

- Cálculo da queda de tensão no estator:

$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$

$Z_1 = \sqrt{(3,448)^2 + (5,617)^2}$

$Z_1 = 6,59\Omega$

Então:

$\Delta V = Z_1 \cdot I_{vazio}$

$\Delta V = (6,59) . (3,52)$

$\Delta V = 23,19$ volts

Os enrolamentos do estator e da bobina de sondagem estão representados na figura (2.7.):

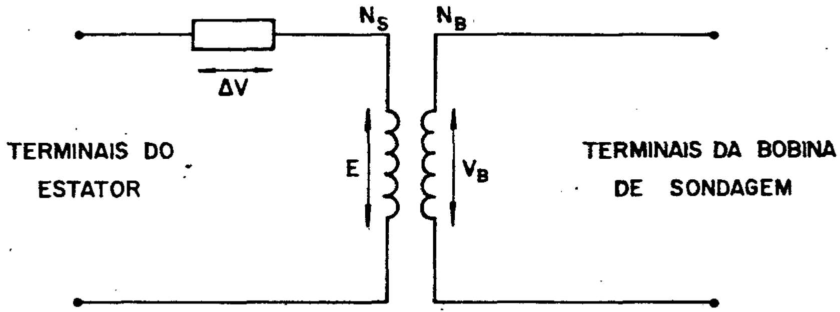

Figura 2.7. Representação dos enrolamentos do estator e da bobina de sondagem.

- Cálculo da tensão (E) de magnetização:

$E = V - \Delta V$

$E = 220 - 23,19$

$E = 196,803$ volts

- Cálculo da tensão (V_B) na bobina de sondagem:

Quando a tensão no estator é de 220 volts, 60Hz, a tensão de pico da bobina de sondagem é de 66 volts, de acordo com a tabela (2.2.).

Assim, o seu valor eficaz, será:

$V_B = 46,66$ volts

Com a tensão E e a tensão V_B, determina-se a relação de transformação (α), entre os enrolamentos do estator e da bobina de sondagem. Assim:

$$\alpha = \frac{E}{V_B}$$

$$\alpha = \frac{196,83}{46,66}$$

$$\alpha = 4,217$$

Sabendo que o número de espiras da bobina, é:

N_B = 80 espiras

- Então:

$$\frac{N_s}{N_B} = 4{,}217$$

$$\frac{N_s}{80} = 4{,}217$$

N_s = 338 espiras equivalentes

2.8.d. - Obtenção do fluxo real calculado (λ_c):

Utilizando os valores do fluxo concatenado do motor, obtido através da expressão (2.15), e dividindo-os pelo número de espiras do estator, obtem-se o fluxo real calculado, podendo ser montada a tabela (2.3.):

Escorregamento (s)	velocidade mecânica ω_m [RPM]	Fluxo concatenado calculado ($\emptyset_c$) [Wb]	Fluxo real calculado (λ_c) x 10^{-3} [Wb]
0,0	1800	0,5517	1,632
0,1	1620	0,4687	1,386
0,2	1440	0,4189	1,239
0,3	1260	0,3956	1,170
0,4	1080	0,3841	1,136
0,5	900	0,3779	1,118
0,6	720	0,3743	1,107
0,7	540	0,3721	1,10
0,8	360	0,3708	1,097
0,9	180	0,3702	1,095
1,0	0,0	0,3700	1,094

Tabela 2.3 - Fluxo real calculado para frequência de alimentação de 60Hz e vários valores de velocidade.

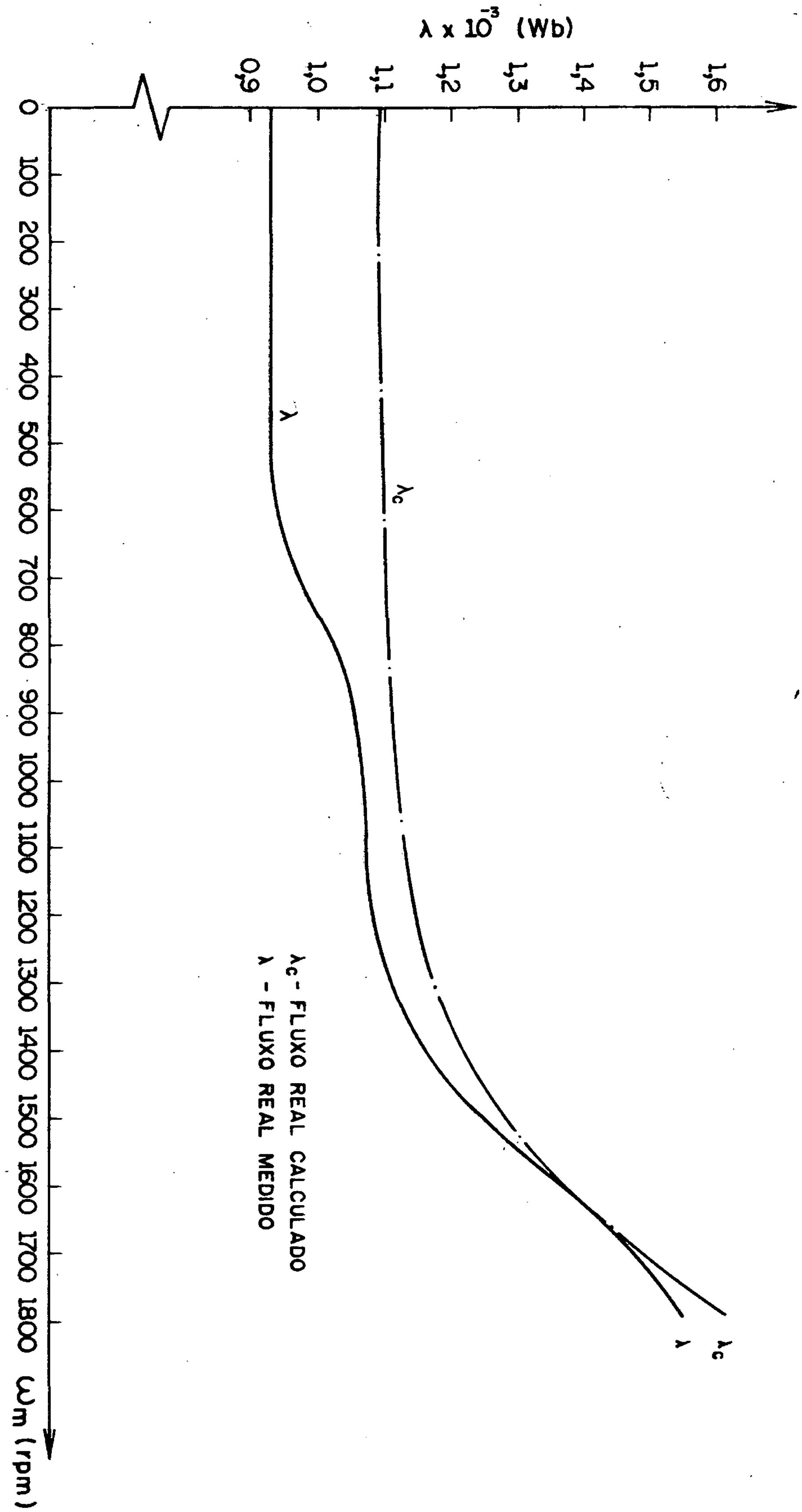

Figura 2.8. - Comparação entre fluxo real medido e fluxo real calculado, alimentação senoidal, Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

2.10. Conclusões:

Observou-se com o estudo deste capítulo que o fluxo do motor monofásico de indução cai com a velocidade, para uma dada freqüência de alimentação e cai, também com o decréscimo da mesma, para uma lei tensão-freqüência de alimentação linear.

A diminuição do fluxo para uma dada freqüência de alimentação, limita para altas velocidades a faixa onde o motor opera com estabilidade.

A diminuição do fluxo com o decréscimo da freqüência de alimentação, provoca uma diminuição do torque máximo para cada freqüência de alimentação (figuras 2.2. e 2.3.).

A comparação entre os fluxos medidos e calculados, figura (2.8.), mostra a validade dos modelos que estão sendo empregados no desenvolvimento desse trabalho.

CAPÍTULO 3

ESTUDO DA LEI TENSÃO-FREQÜÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO

3.1. Introdução:

Com a lei tensão-freqüência de alimentação linear, não foi possível manter o fluxo constante, como se pode verificar no capítulo 2.

A variação do fluxo com a velocidade, figura (2.3.), provoca no motor um decréscimo do torque máximo, na medida em que a freqüência estatórica diminui, o que é indesejável do ponto de vista prático, pois limita o valor do torque mecânico máximo aproveitável no seu eixo.

Assim será estabelecida uma nova lei tensão-freqüência de alimentação para manter o fluxo constante, em toda a faixa de operação do motor monofásico de indução, buscando eliminar ou reduzir os problemas citados no parágrafo anterior, em relação ao torque que o motor pode fornecer no seu eixo.

3.2. Lei Tensão-Freqüência de Alimentação para Manter o Fluxo Constante:

Tomando a equação (2.16.), verifica-se que ela é da forma:

$$\phi_s = \sqrt{Z} \cdot \frac{V}{\omega} \tag{3.1.}$$

Então:

$$V = \frac{1}{\sqrt{Z}} \cdot \omega \cdot \phi_s \tag{3.2.}$$

Sendo que:

Z é função dos parâmetros cíclicos do motor, da freqüência de alimentação e da freqüência do rotor, pois

$$n_1 = (1 - \frac{f_r}{f_s})$$

sendo, f_s a freqüência de alimentação do motor e f_r a freqüência do rotor.

Sabendo-se que:

$$X_r = \omega.L_r = 2.\pi.f_s.L_r$$

$$X_s = \omega.L_s = 2.\pi.f_s.L_s$$

$$Xm_{sr} = \omega.m_{sr} = 2.\pi.f_s.m_{sr}$$

Substituindo a equação (2.16.) em (3.2.) resulta a equação (3.3.).

$$V = \left\{ \frac{\{R_s\,[R_r^2 + (\omega L_r)^2 (n_1^2-1)] + R_r[(\omega\, m_{sr})^2 - 2\omega^2 L_s L_r]\}^2 + \{\omega L_s\,[R_r^2 + (\omega L_r)^2 (n_1^2-1)] + \omega L_r\,[(\omega m_{sr})^2 (1-n_1^2) + 2R_s R_r]\}^2}{\{\omega L_s\,[R_r^{\,2} + (\omega L_r)^2\,(n_1^2-1)] + (\omega m_{sr})^2\,(\omega L_r)\,(1-n_1^{\,2})\}^2 + [\,2\omega^2 L_r L_s R_r - (\omega m_{sr})^2\,.\,R_r\,]^2} \right\}^{1/2} .\,\phi_s.\omega \quad (3.3.)$$

Utilizando o motor já especificado no capítulo 2, traça-se as curvas características, tensão de alimentação em função da freqüência do estator para várias freqüências do rotor, para fluxo constante pré-estabelecido, dado por:

$$\phi_s = \frac{V}{\omega}$$

$$\phi_s = \frac{220}{2.\pi.60}$$

$$\phi_s = 0,5835 [Wb]$$

Para obtenção das curvas da figura 3.1., foi utilizado o programa DAVID FORTRAN, ver Apêndice (C-2).

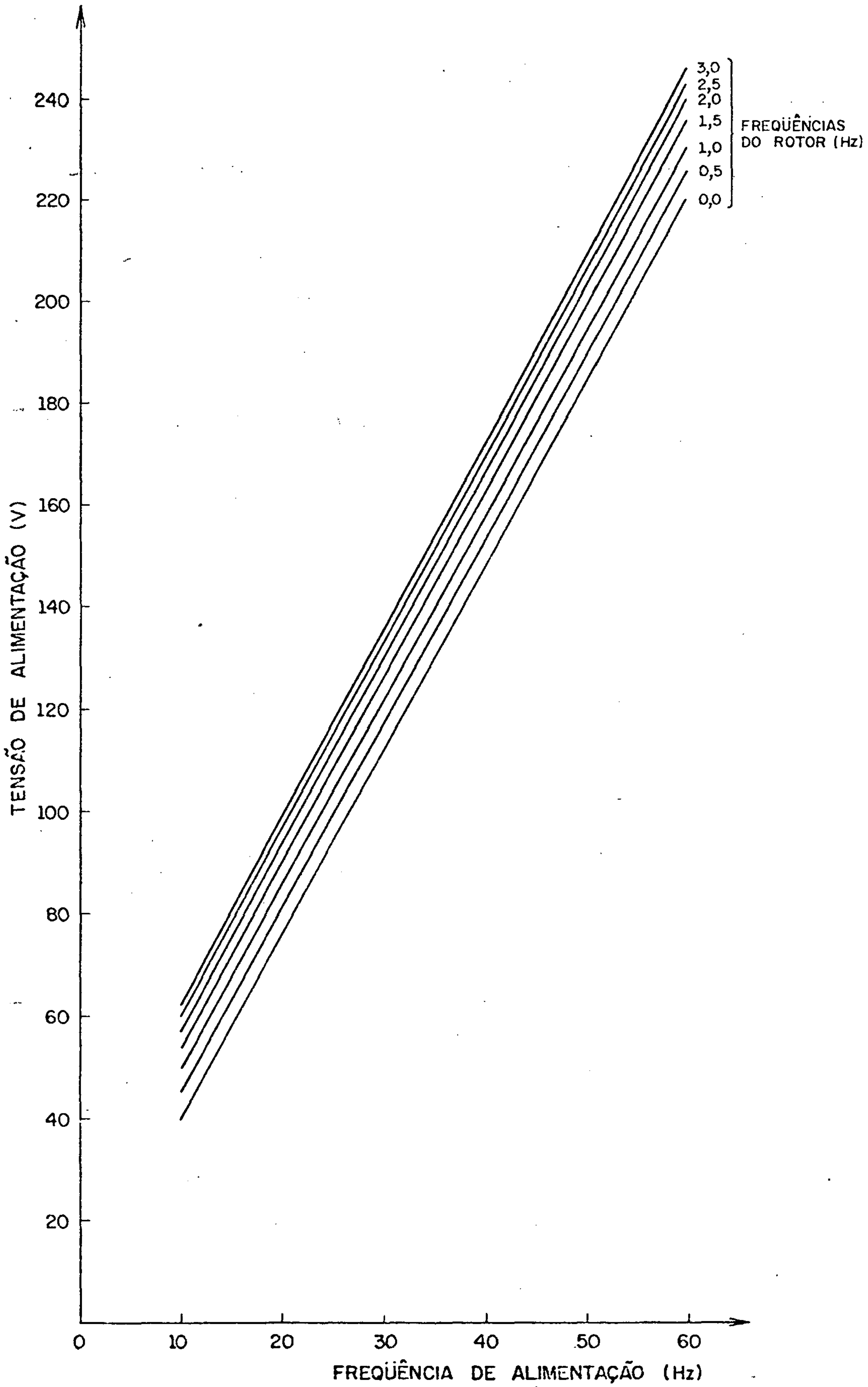

Figura 3.1. - Lei tensão-freqüência para manter o fluxo constante e igual a 0,5835 [Wb]

Apesar da complexidade e dimensão da equação (3.3.), e resultado da lei tensão-freqüência de alimentação na figura (3.1.) é simples.

3.3. Obtenção da Lei Tensão-Freqüência de Alimentação Simplificada:

A equação (3.3.) é de difícil implementação, sendo necessária uma simplificação, que será feita a partir das curvas estabelecidas na figura (3.1.).

Assim, por inspeção, verifica-se que esse conjunto de curvas pode ser apresentado, com boa aproximação, pela equação (3.4.), a seguir:

$$V = K_1 \cdot f_s + K_2 \cdot f_r \qquad (3.4.)$$

Sendo:

K_1 - a inclinação das retas

K_2 - fator multiplicativo da freqüência do rotor

Para obtenção de K_1, faz-se $f_r = 0$, daí:

$$K_1 = \frac{V}{f_s}$$

$$K_1 = \frac{220}{60}$$

$$K_1 = 3,66$$

Como, por inspeção da figura (3.1.), $K_2 = 10$, vem:

$$V = 3,66\ f_s + 10\ f_r \qquad (3.6.)$$

A equação (3.6.) é a lei tensão-freqüência de alimentação simplificada, para manter o fluxo constante.

Com essa lei, estabelece-se em seguida, novas características de torque em função da velocidade do motor.

3.4. Características Torque-Velocidade, com a Lei Tensão-Freqüência de Alimentação para Fluxo Constante:

Observa-se nas curvas da figura (2.2.), que para determinadas freqüências de alimentação, a velocidade mecânica nominal é atingida numa região de pouca estabilidade.

Substituindo na equação (2.12.), a variável V, pela expressão (3.6.), tem-se a equação do torque para a nova lei tensão-freqüência de alimentação (3.9.)

Com a equação (3.9.) e os parâmetros do motor utilizado, traça-se as curvas da figura (3.2.), ver Apêndice (C-3).

$$T = \frac{nXm_{sr}^2(3,66f_s+10f_r)^2}{\omega} \left\{ \frac{n_1 \, R_r \{X_r^2 \, [1-n_1^2] \; - R_r^2\}}{\{R_s \, [R_r^2 \; + \; X_r^2(n_1^2-1)] + R_r^2 \, [Xm_{sr}^2 \; - \; 2X_sX_r]\}^2 + \{X_s[R_r^2+X_r^2(n_1^2-1)] + X_r[Xm_{sr}^2(1-n_1^2)-2R_sR_r]\}^2} \right\} \qquad (3.9.)$$

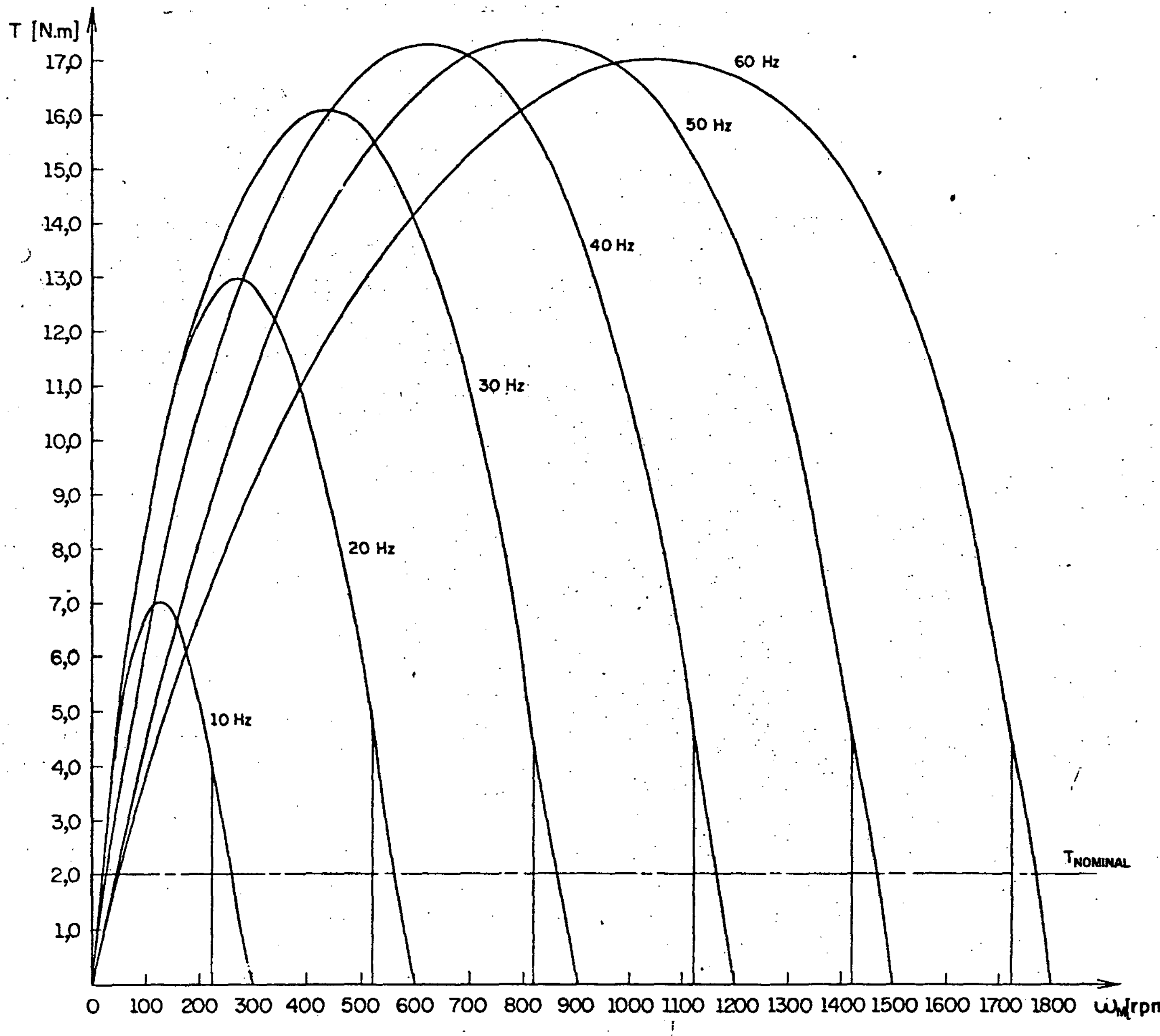

Figura 3.2. - Caraterísticas torque-velocidade sendo T = f(v) e
V = 3,66 f + 10 fr.

Com a nova lei tensão-frequência de alimentação, as características de torque em função da velocidade, figura (3.2.), se tornaram quase perpendiculares, fornecendo uma faixa ampla e segura de operação para o motor. Podendo fornecer torque nominal pelo menos até 10Hz de frequência de alimentação com margem garantida de estabilidade.

O torque máximo, para a nova lei é elevado, não sendo possível ao motor poder atingi-lo sem ser danificado pela corrente de alimentação solicitada.

O máximo torque que o motor vai fornecer, é o correspondente à velocidade nominal para cada frequência de alimentação.

3.5. Conclusões:

A lei tensão-frequência de alimentação, para manter o fluxo constante, equação (3.3.) é complexa e praticamente impossível de ser implementada.

A lei simplificada, equação (3.6.) pode ser implementada com facilidade, sem prejudicar os resultados finais.

Com essa lei, consegue-se melhorar as características de torque-velocidade, permitindo a obtenção de torque nominal, para baixas velocidades, sem correr o risco de perder a estabilidade.

CAPÍTULO 4

COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE, ALIMENTAÇÃO RETANGULAR, FREQUÊNCIA VARIÁVEL

4.1. Introdução:

Toda análise até este ponto, foi feita com motor monofásico de indução em regime permanente, alimentação senoidal, frequência variável.

A partir desse capítulo, será analisado o comportamento do motor, quando alimentado pela onda de tensão retangular, produzida pelo inversor.

É de interesse, agora, não os valores eficaz da corrente e médio do torque, mas, os seus valores instantâneos que serão obtidos através de simulação digital.

Com a simulação será possível observar os valores de pico da corrente do estator, para várias frequências de alimentação. Essas correntes, são de importância fundamental na escolha dos transistores ou tiristores do inversor.

4.2. Tensão na saída do inversor:

Deve-se aplicar na entrada do inversor um nível de tensão contínua que produza na sua saída uma onda retangular, cuja componente fundamental tenha valor eficaz igual ao da tensão de alimentação' nominal do motor.

No caso do motor utilizado, sua tensão de alimentação é de 220 volts.

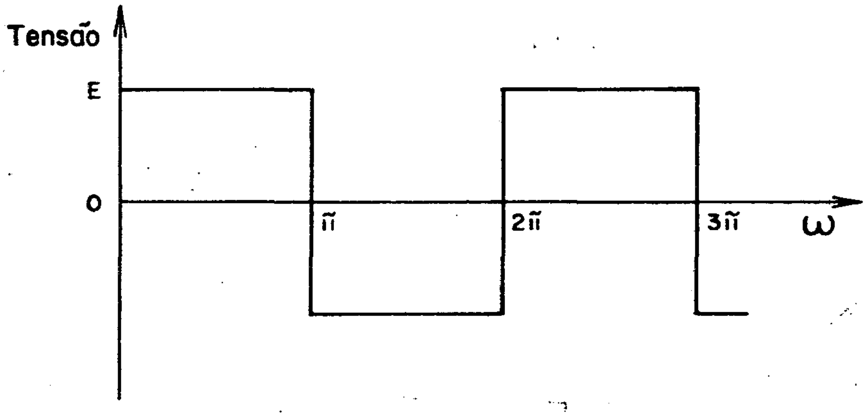

Figura 4.1. - Tensão na saída do inversor.

A seguir, a tensão de saída do inversor é decomposta em Série de Fourier.

$$f_{(t)} = a_o + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \, . \cos n \, \omega_o t + b_n . \mathrm{sen}\, n \, \omega_o . t)$$

Dai:

$$a_o = \frac{1}{T} \int_0^T f_{(t)} \, dt = 0$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f_{(t)} . \cos n \, \omega_o t \quad dt = 0$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f_{(f)} . \mathrm{sen}\, n \, \omega_o t \quad dt$$

Como só se interessa pela fundamental:

$$b_1 = \frac{8}{T} \int_0^T E . \mathrm{sen}\, \omega_o t \quad dt$$

Daí:

$$E = \frac{b_1 \, . \, \pi}{4}$$

como $b_1 = 220 \sqrt{2}$ volts

$$E = \frac{220. \sqrt{2}. \pi}{4}$$

$E = 244{,}35$ volts

Este é o nível de tensão contínua que deve ser aplicado na entrada do inversor, para que a onda retangular na saída tenha uma componente fundamental cujo valor eficaz é 220 volts.

4.3. Obtenção do modelo de estado do motor monofásico de indução:

Serão estabelecidas as equações das correntes do motor em forma de variáveis de estado, com vistas à simulação.

Tomando o modelo do motor monofásico de indução, para regime transitório, equações (1.2.a) e (1.2.b):

$$\begin{bmatrix} v_s^d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+pL_s & pm_{sr} & -m_{sr}\ \psi' \\ pm_{sr}(\psi'-\theta') & R_r+pL_r & -nL_r(\psi'-\theta') \\ n\ m_{sr}(\psi'-\theta') & nL_r(\psi'-\theta') & R_r+pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} \tag{4.3.a}$$

$$T = n\ m_{sr}(i_s^d\ i_r^q) \tag{4.3.b}$$

Colocando a referência no estator ($\psi = 0$), fazendo $\theta' = \omega_m$ e derivando em relação ao tempo, tem-se a equação (4.4.a):

$$\begin{bmatrix} v_s^d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + \frac{d}{dt} L_s) & \frac{d}{dt} m_{sr} & 0 \\ \frac{d}{dt} m_{sr} & (R_r+\frac{d}{dt} L_r) & n\omega_m L_r \\ -n.\omega_m.m_{sr} & -n.\omega_m.L_r & (R_r+\frac{d}{dt} L_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} \tag{4.4.a}$$

$$T = n.m_{sr}\ (i_s^d\ i_r^q) \tag{4.4.b}$$

Mas:

$$n = \frac{\omega_m}{\omega_s} \tag{4.5.}$$

$$n_1 = \frac{\omega_m}{\omega_s} \tag{4.6.}$$

Substituindo (4.5.) e (4.6.) na equação (4.4.a), tem-se a equação (4.7.a):

$$\begin{bmatrix} v_s^d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s+\frac{d}{dt}L_s) & \frac{d}{dt}m_{sr} & 0 \\ \frac{d}{dt}m_{sr} & (R_r+\frac{d}{dt}L_r) & n_1X_r \\ -n_1Xm_{sr} & -n_1X_r & (R_r+\frac{d}{dt}L_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} \tag{4.7.a}$$

$$T = n\ m_{sr}\ (i_s^d\ \ i_r^q) \tag{4.7.b}$$

Fazendo, $v_s^d = v$ e $i_s^d = i_s$, na equação(4.7.a) vem:

$$v=R_s\ is+L_s(\tfrac{d}{dt})is + m_{sr}(\tfrac{d}{dt})i_r^d$$

$$0=m_{sr}(\tfrac{d}{dt})is+R_r\ i_r^d+L_r(\tfrac{d}{dt})i_r^d+n_1X_r\ i_r^q$$

$$0=-n_1Xm_{sr}\ i_s - n_1X_r\ i_r^d + R_r\ i_r^q + L_r(\tfrac{d}{dt})i_r^q$$

Isolando-se as variáveis de estado, resulta:

$$(\tfrac{d}{dt})i_s=-(\tfrac{R_s}{L_s})i_s - \frac{m_{sr}}{L_s}(\tfrac{d}{dt})i_r^d + \frac{v}{L_s} \tag{4.8.}$$

$$(\tfrac{d}{dt})i_r^d = -\frac{m_{sr}}{L_r}(\tfrac{d}{dt})i_s - \frac{R_r}{L_r}i_r^d - \frac{n_1X_r}{L_r}i_r^q \tag{4.9.}$$

$$(\tfrac{d}{dt})i_r^q = \frac{n_1Xm_{sr}}{L_r}i_s + \frac{n_1X_r}{L_r}i_r^d - \frac{R_r}{L_r}i_r^q \tag{4.10.}$$

Substituindo a equação (4.8.) em (4.9.), vem:

$$(\frac{d}{dt})i_r{}^d = -\frac{m_{sr}}{L_r}\left[-\frac{R_r}{L_s}i_s - \frac{m_{sr}}{L_s}(\frac{d}{dt})i_r{}^d + \frac{v}{L_s}\right] - \frac{R_r}{L_s}i_r{}^d - \frac{n_1X_r}{L_r}i_r{}^q$$

$$(\frac{d}{dt})i_r{}^d = \frac{m_{sr}R_s}{L_rL_s}i_s + \frac{m_{sr}{}^2}{L_rL_s}(\frac{d}{dt})i_r{}^d - \frac{m_{sr}}{L_rL_s}v - \frac{R_r}{L_r}i_r{}^d - \frac{n_1X_r}{L_r}i_r{}^q$$

$$(\frac{d}{dt})i_r{}^d = (\frac{L_rL_s}{L_rL_s-m_{sr}{}^2})(\frac{m_{sr}R_s}{L_rL_s})i_s - (\frac{L_rL_s}{L_rL_s-m_{sr}{}^2})\frac{R_r}{L_r}i_r{}^d - (\frac{L_rL_s}{L_rL_s-m_{sr}{}^2})\frac{n_1X_r}{L_r}i_r{}^q -$$

$$-(\frac{L_rL_s}{L_rL_s-m_{sr}{}^2})\frac{m_{sr}}{L_rL_s}v$$

Daí:

$$(\frac{d}{dt})i_r{}^d = (\frac{1}{L_rL_s-m_{sr}{}^2})(m_{sr}R_si_s - L_sR_r i_r{}^d - n_1X_rL_s i_r{}^q - m_{sr}v)$$

fazendo, $(L_rL_s - m_{sr}{}^2) =$, vem a equação (4.11.), a seguir:

$$(\frac{d}{dt})i_r{}^d = (\frac{m_{sr}R_s}{\sigma})i_s - (\frac{L_sR_r}{\sigma})i_r{}^d - (\frac{n_1L_sX_r}{\sigma})i_r{}^q - (\frac{m_{sr}}{\sigma})v \qquad (4.11)$$

Substituindo a equação (4.11.) em (4.8.), vem:

$$(\frac{d}{dt})i_s = -\frac{R_s}{L_s}i_s - \frac{m_{sr}}{L_s}\left[(\frac{m_{sr}R_s}{\sigma})i_s - (\frac{L_sR_r}{\sigma})i_r{}^d - (\frac{L_sn_1X_r}{\sigma})i_r{}^q -\right.$$

$$\left.-\frac{m_{sr}}{\sigma}\right] + \frac{v}{L_s}$$

$$(\frac{d}{dt})i_s = -\frac{R_s}{L_s}i_s - (\frac{m_{sr}{}^2}{L_s\cdot\sigma})i_s + (\frac{m_{sr}R_r}{\sigma})i_r{}^d + (\frac{n_1X_rm_{sr}}{\sigma})i_r{}^q +$$

$$+(\frac{m_{sr}{}^2}{L_s\cdot\sigma})v + \frac{v}{L_s}$$

$$(\frac{d}{dt}) i_s = - (\frac{R_s}{L_s} + \frac{m_{sr}^2 R_s}{L_s\ \sigma}) i_s + (\frac{m_{sr} R_r}{\sigma}) i_r^d + (\frac{n_1 X_r m_{sr}}{\sigma}) i_r^q +$$

$$(\frac{m_{sr}^2}{L_s\ \sigma} + \frac{1}{L_s}) v$$

$$(\frac{d}{dt}) i_s = (\frac{\sigma R_s + m_{sr}^2 R_s}{\sigma \cdot L_s}) i_s + (\frac{m_{sr} R_r}{\sigma}) i_r^d + (\frac{n_1 X_r m_{sr}}{\sigma}) i_r^q +$$

$$(\frac{m_{sr}^2 + \sigma}{\sigma\ L_s}) v$$

Como, $\sigma = L_r L_s - m_{sr}^2$, vem que:

$$(\frac{d}{dt}) i_s = - (\frac{R_s L_r}{\sigma}) i_s + (\frac{m_{sr} R_r}{\sigma}) i_r^d + (\frac{n_1 X_r m_{sr}}{\sigma}) i_r^d + (\frac{L_r}{\sigma}) v \qquad (4.12.)$$

Juntando as equações, (4.10.), (4.11.) e (4.12.), na forma matricial, tem-se a equação (4.13.a) e (4.13.b):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r}{\sigma} & \frac{m_{sr} R_r}{\sigma} & \frac{n_1 X_r m_{sr}}{\sigma} \\ \frac{m_{sr} R_s}{\sigma} & -\frac{L_s R_r}{\sigma} & -\frac{L_s n_1 X_r}{\sigma} \\ \frac{n_1 X m_{sr}}{L_r} & \frac{n_1 X_r}{L_r} & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_r}{\sigma} \\ -\frac{m_{sr}}{\sigma} \\ 0 \end{bmatrix} v \qquad (4.13.)$$

$$T = n \cdot m_{sr} (i_s^d\ i_r^q) \qquad (4.13.b)$$

4.4. Simulação das equações do motor:

Utilizando a equação (4.13.a), como se apresenta, em forma de variáveis de estado, juntamente com a equação (4.13.b), faz-se a simulação do motor monofásico de indução. Para essa simulação numérica, utilizou-se o método de Runge-Kutta para a solução das equações diferenciais, juntamente com os métodos auxiliares de convergência de Adams-Bashforth (preditor) e Adams-Moulton(corretor). O programa denominado SIMULA WATFIV, é apresentado no Apêndice (B-4).

Os valores instantâneos de tensão de alimentação, corrente do estator e torque apresentados, são para uma relação tensão-freqüência de alimentação linear.

4.4.1. Simulação do motor monofásico de indução, alimentação senoidal:

Com o objetivo de testar o programa utilizado, fez-se algumas simulações com tensão de alimentação senoidal, freqüência de alimentação de 60 Hz, que apresentaram os seguintes resultados:

- Para freqüência do rotor nula, figura (4.2.), o torque médio é praticamente nulo, com uma pequena tendência a um valor negativo.

O motor se comporta como um circuito altamente reativo, com a corrente do estator atrasada quase 90° com relação à tensão de alimentação.

- Para freqüência do rotor igual a freqüência do estator, rotor travado, o torque instantâneo é nulo.

- Para freqüência do rotor nominal, figura (4.3.), o torque médio é elevado. Assumindo valores instantâneos negativos. O torque traçado em função do tempo não é constante, apresentando uma freqüência igual a duas vezes a freqüência da tensão de alimentação.

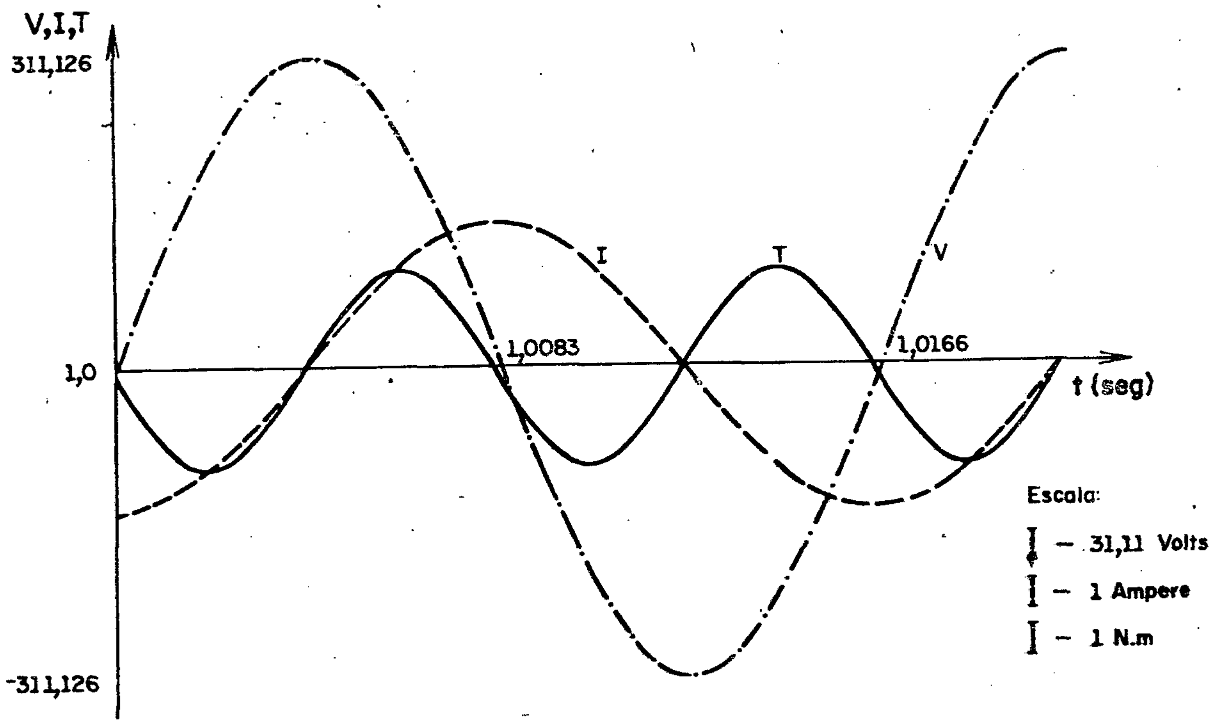

Figura 4.2. - Tensão de alimentação senoidal, freqüência de alimentação 60Hz, freqüência do rotor nula

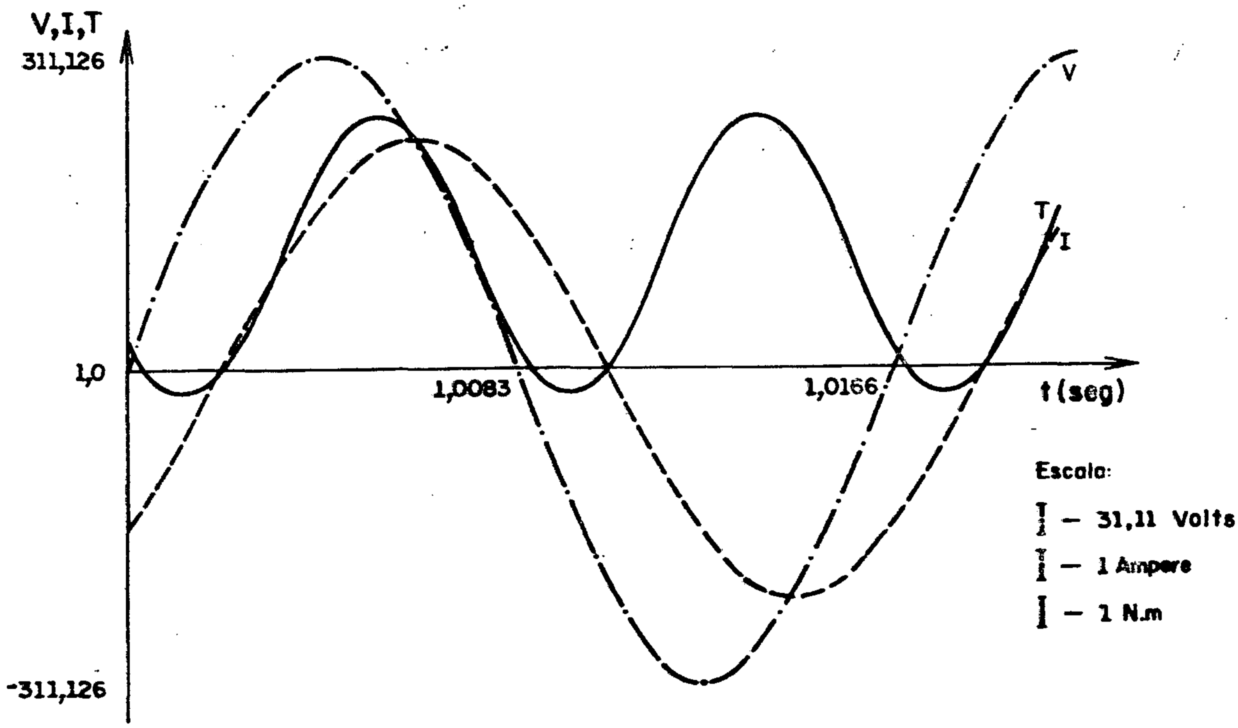

Figura 4.3. - Tensão de alimentação senoidal, freqüência de alimentação, 60 Hz, frequência do rotor nominal (2,5 Hz)

4.4.2. Simulação do motor monofásico de indução alimentado por inversor:

Utilizando o programa SIMULA WATFIV, Apêndice (C-4), com as equações (4.13.a) e (4.13.b) obtem-se a simulação do motor monofásico de indução alimentado por inversor.

A relação tensão-freqüência de alimentação é linear.

Para cada freqüência de alimentação de 10 a 60 Hz, foram obtidas curvas para várias freqüências do rotor, sendo apresentadas nas figuras (4.4.) a (4.15.) as freqüências do rotor nula e nominal, que mostra o comportamento do motor monofásico de indução alimentado por inversor.

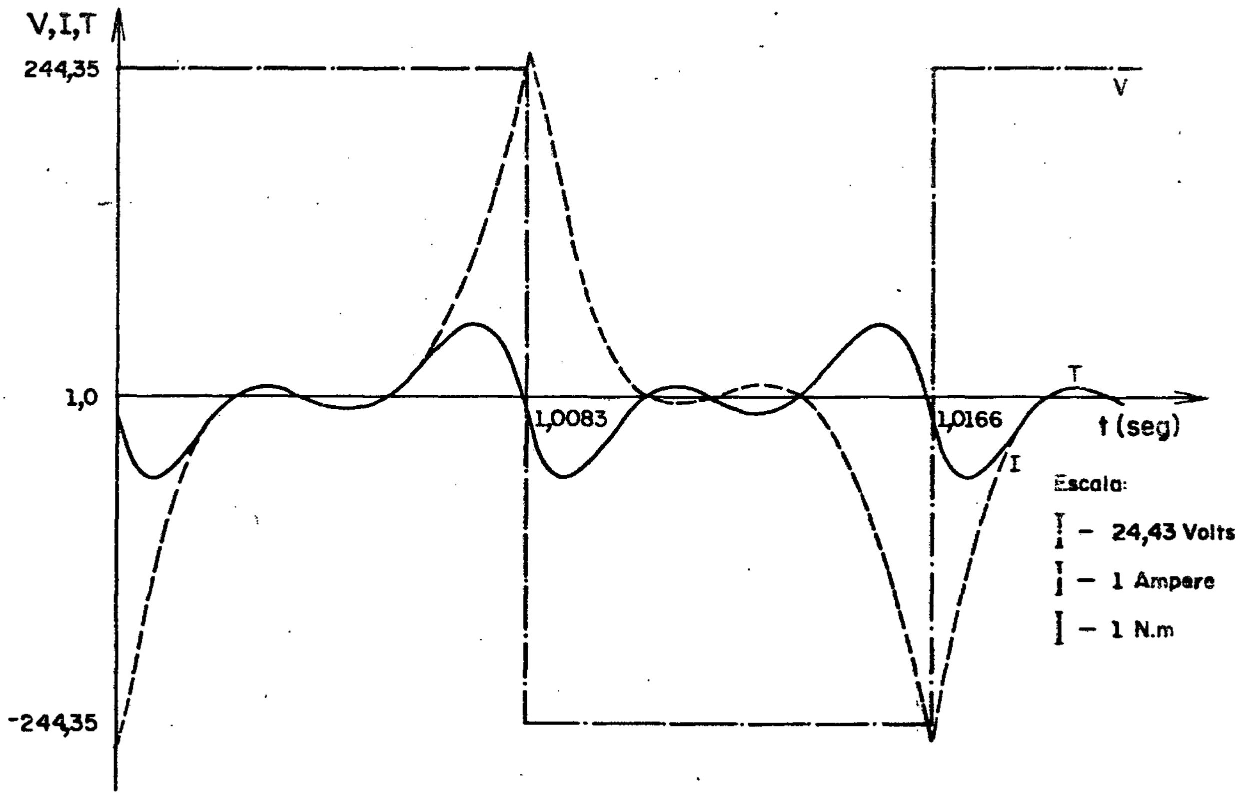

Figura 4.4. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 60Hz, freqüência do rotor nula.

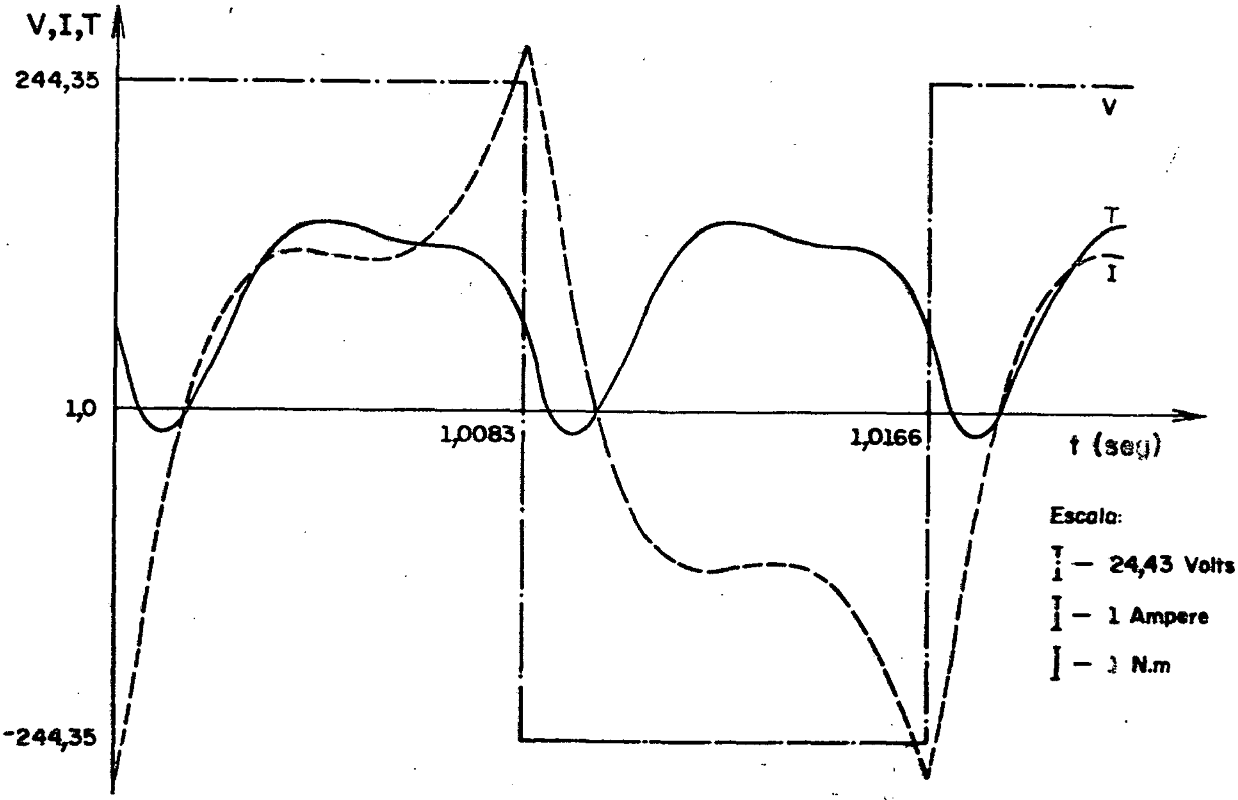

Figura 4.5. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 60Hz freqüência do rotor nominal (2.5Hz) -Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

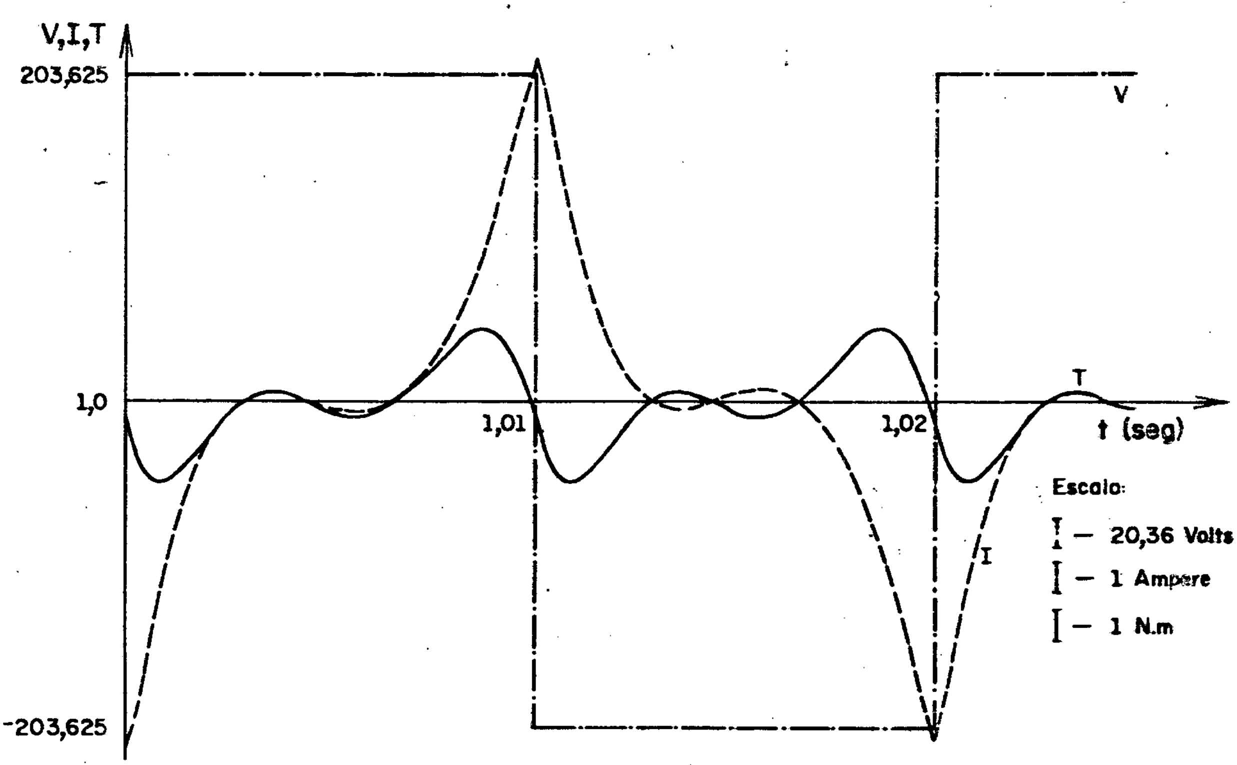

Figura 4.6. Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 50 Hz, freqüência do rotor nula - Lei tensão de alimentação linear.

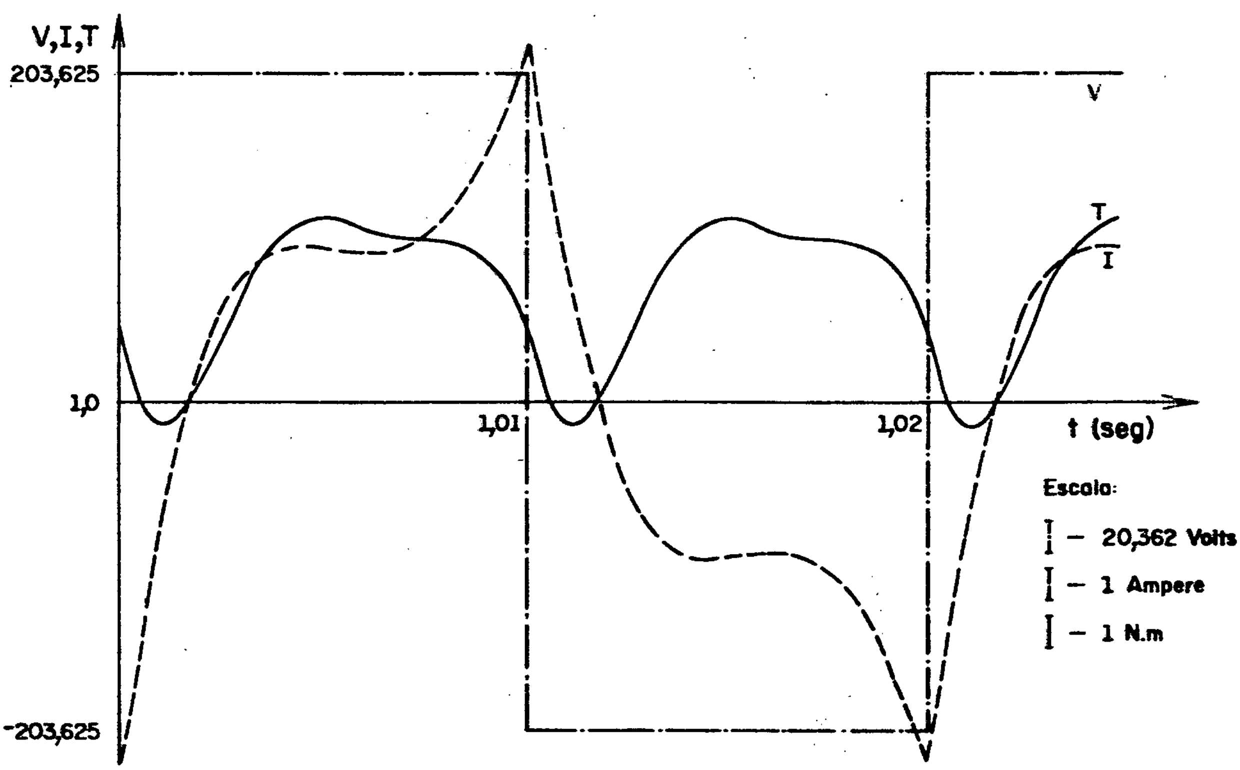

Figura 4.7. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 50 Hz freqüência do rotor nominal(2,5 Hz).
Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

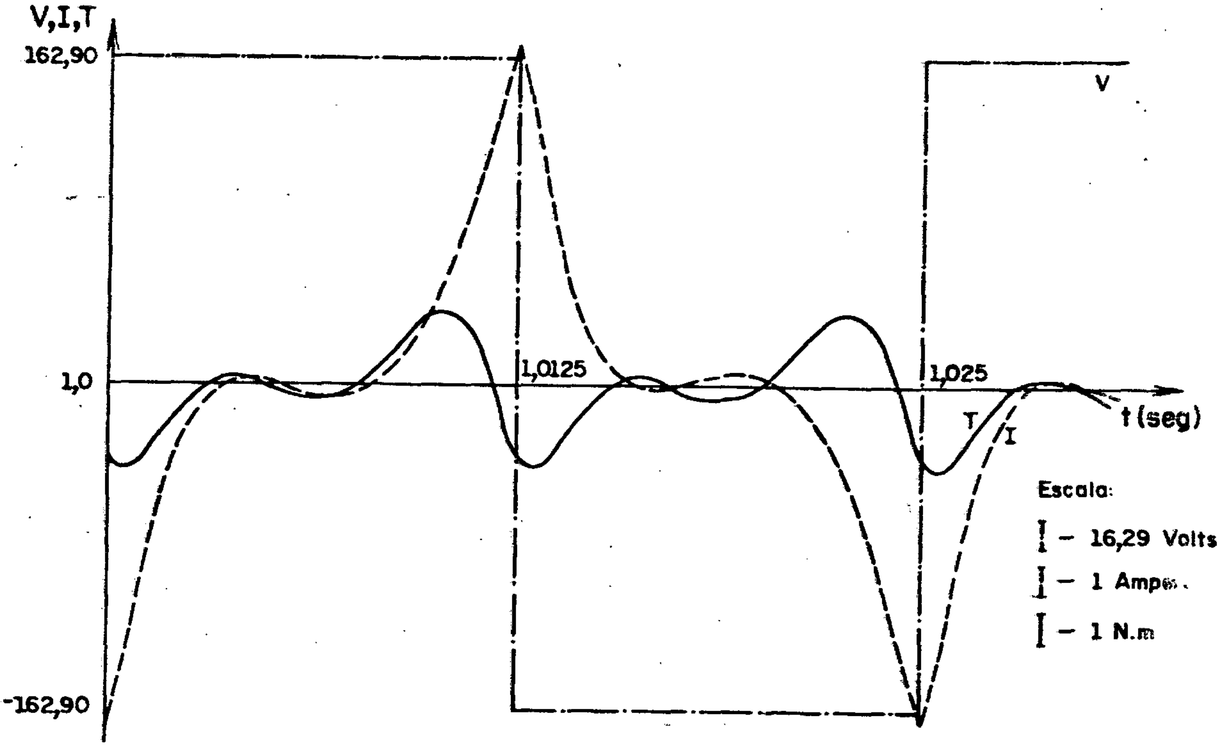

Figura 4.8. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 40 Hz, freqüência do rotor nula - Lei tensão-freqüência de alimentação Linear.

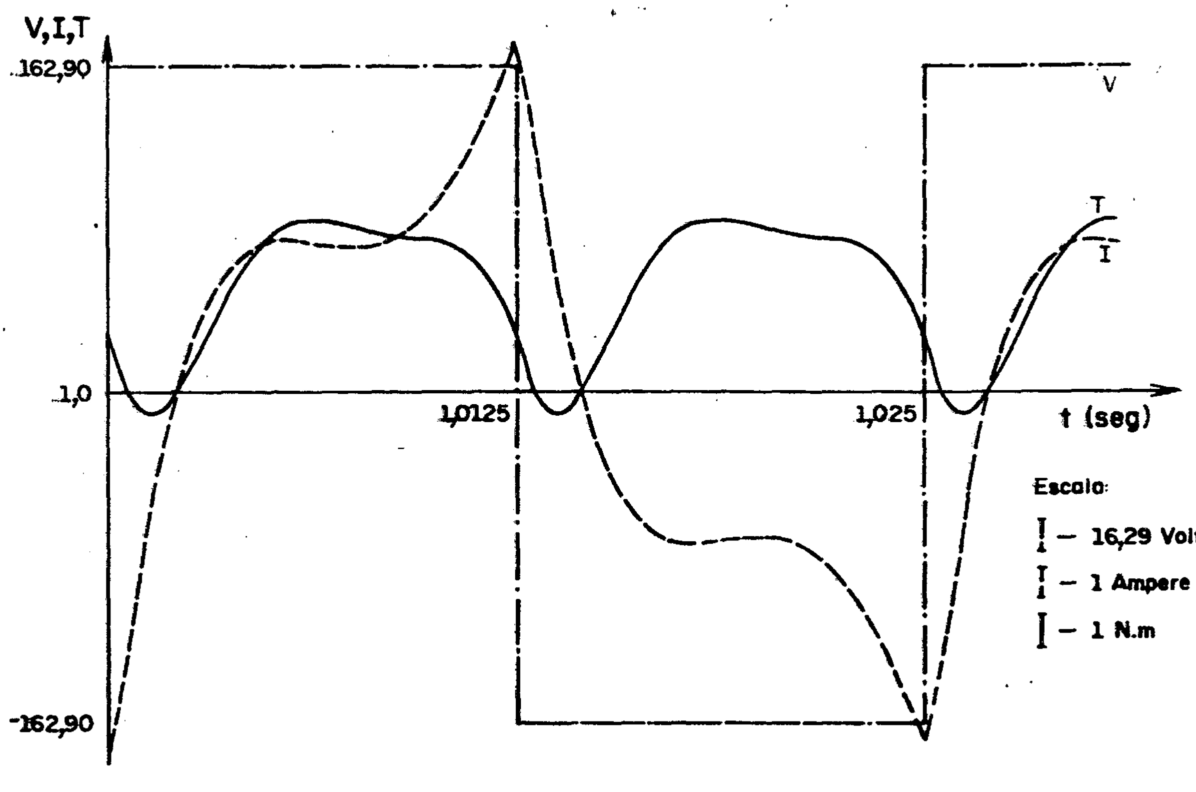

Figura 4.9. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 40 Hz Tensão do rotor nominal (2,5 Hz) Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

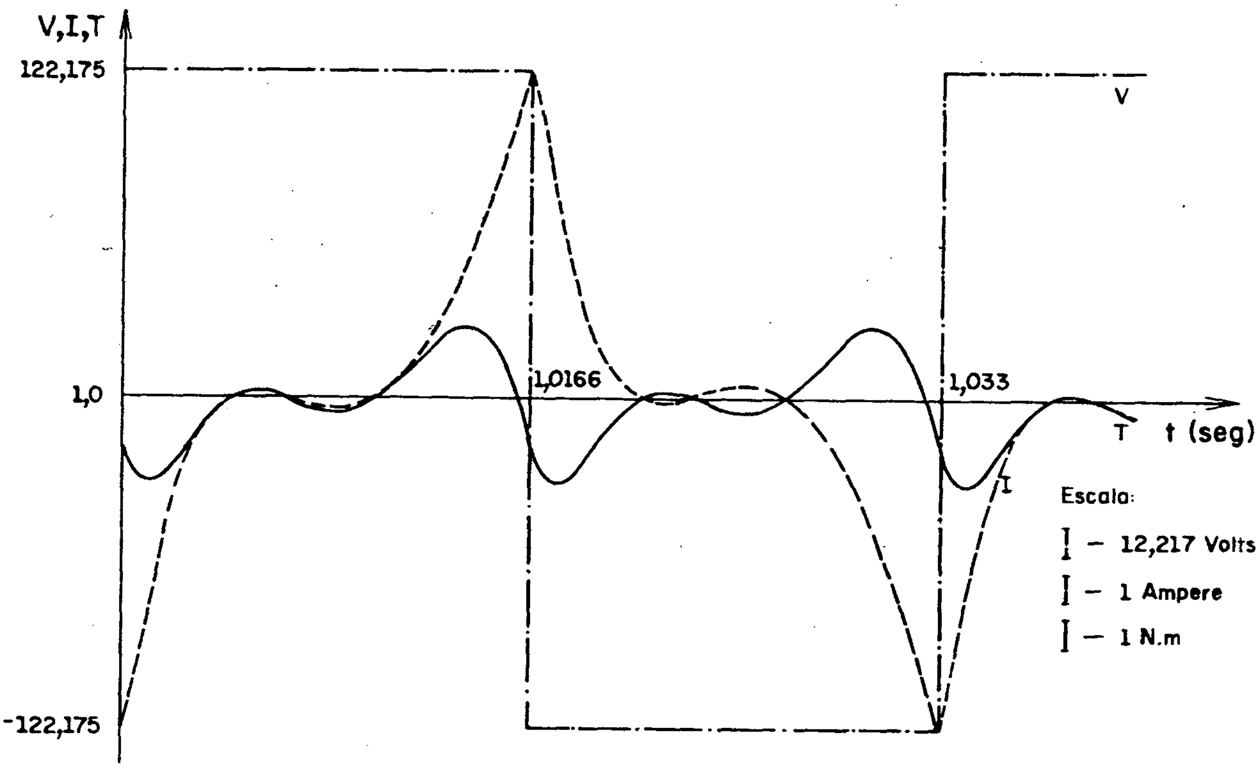

Figura 4.10. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 30 Hz, freqüência do rotor nula - Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

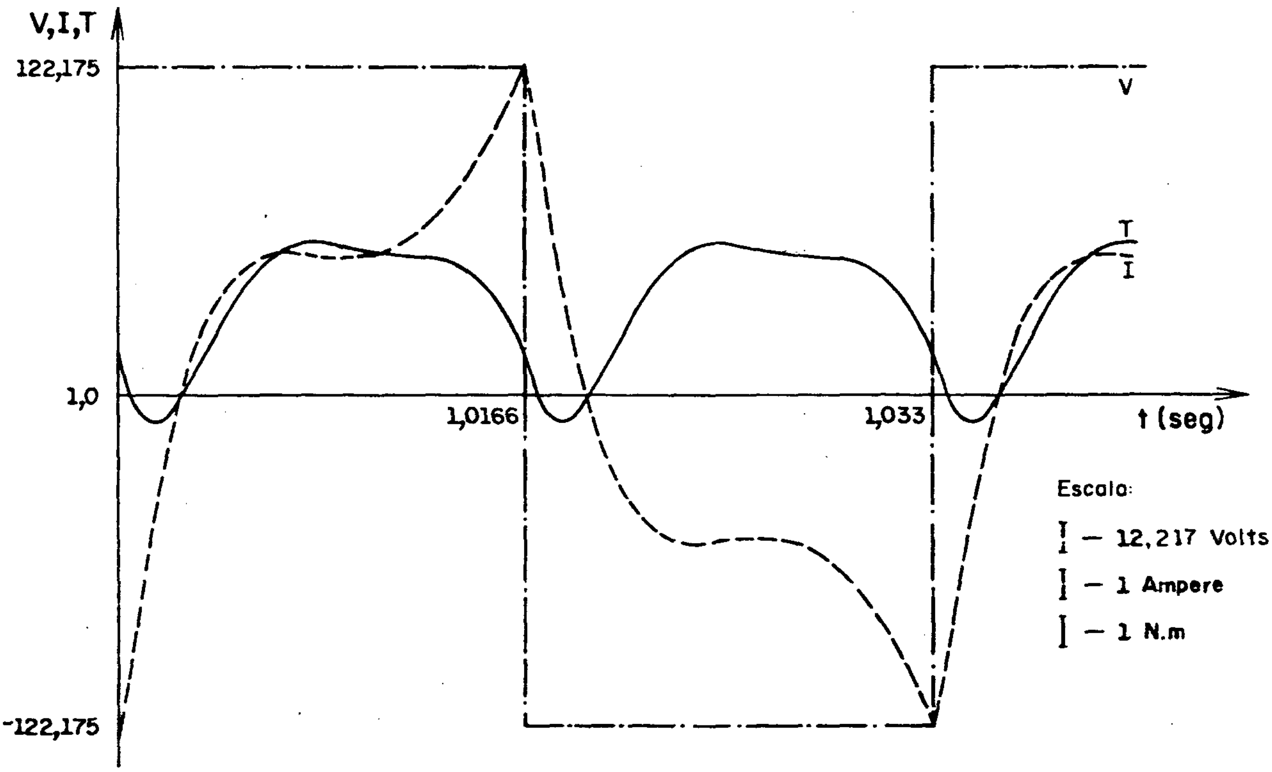

Figura 4.11. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 30 Hz, freqüência do rotor nominal (2,5Hz) - Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

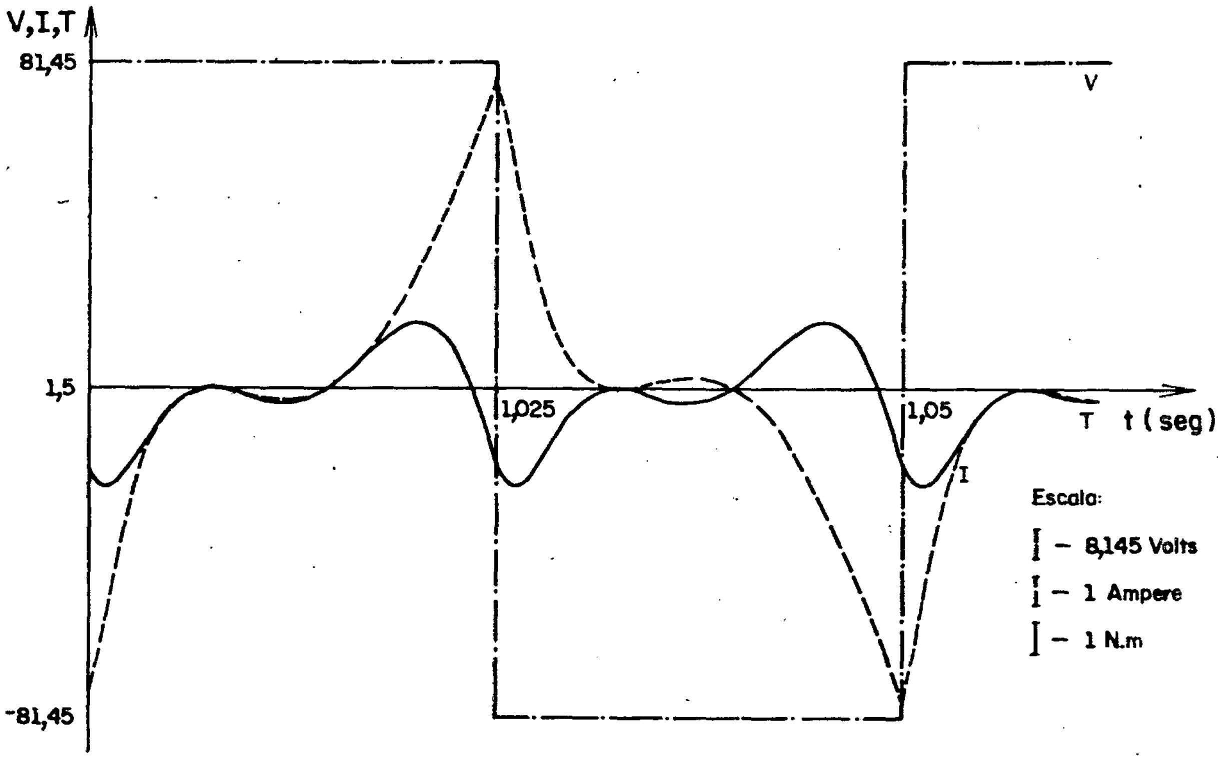

Figura 4.12. Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 20 Hz, freqüência do rotor nula - Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

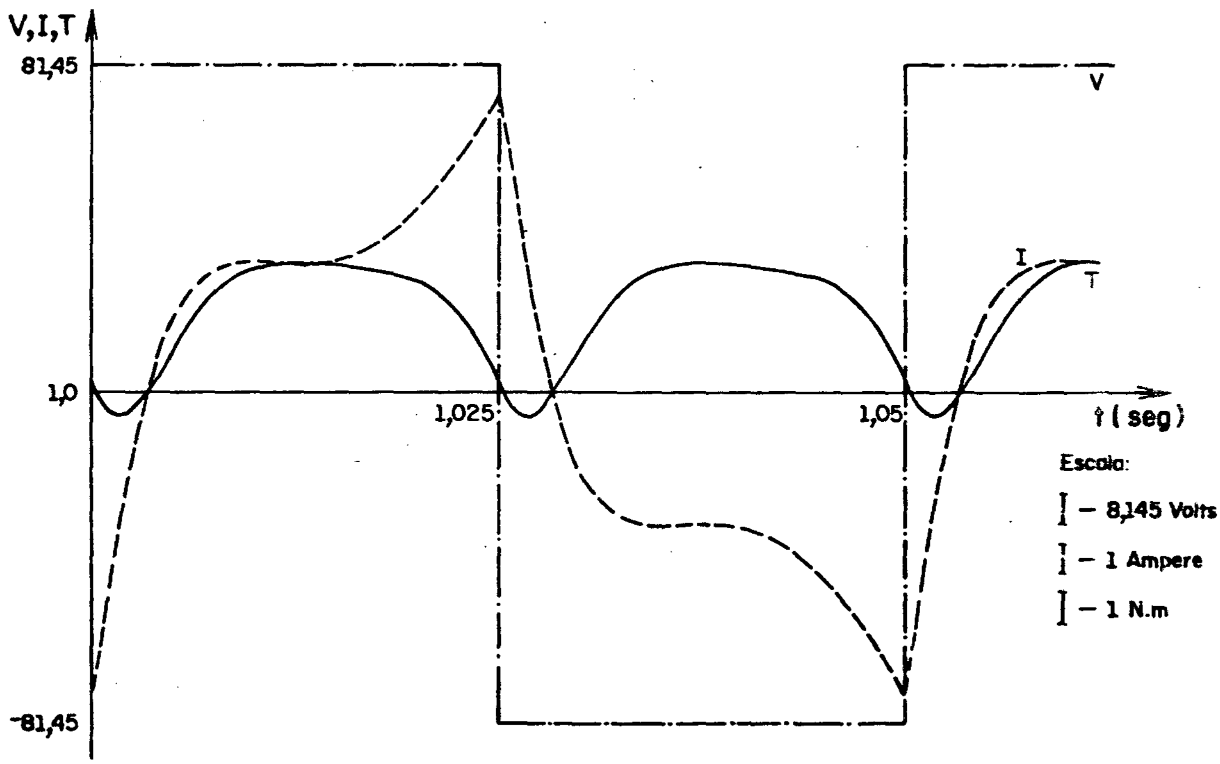

Figura 4.13. - Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 20 Hz freqüência do rotor nominal (2,5Hz) - Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

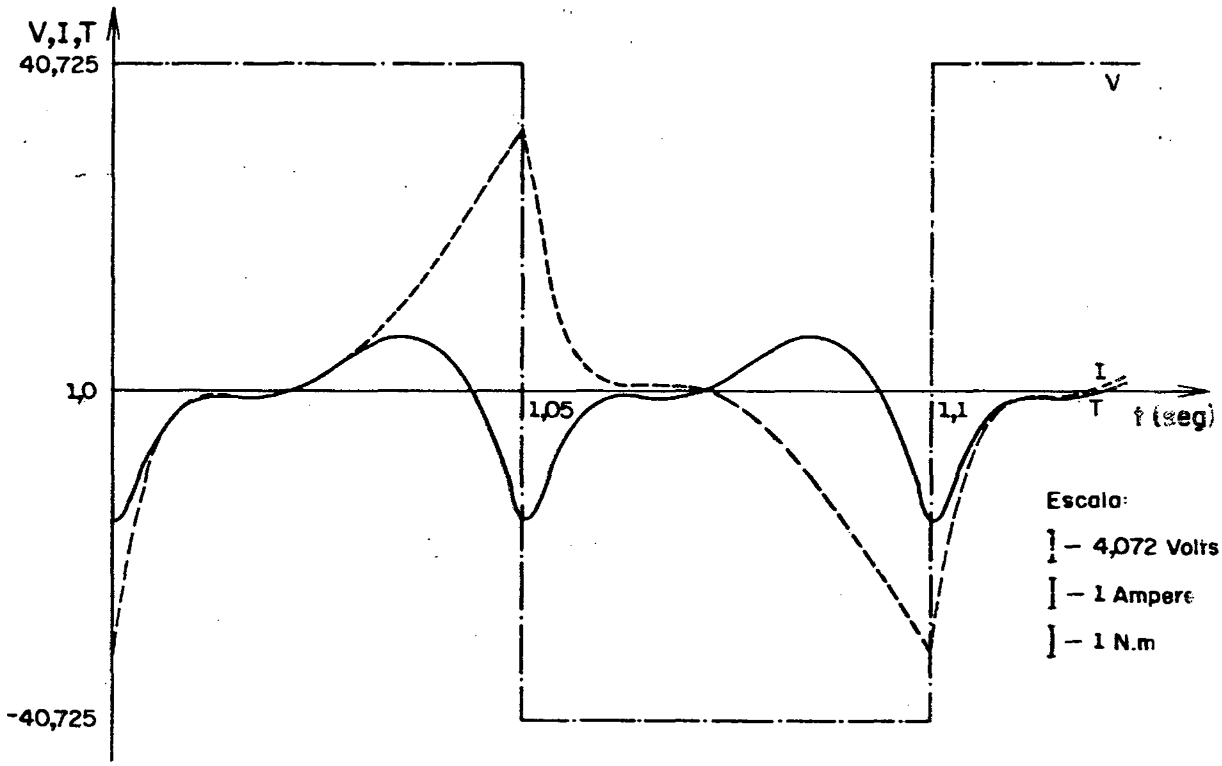

Figura 4.14. Tensão de alimentação retangular, freqüência de alimentação 10 Hz freqüência do rotor nula, Lei tensão-freqüência de alimentação linear.

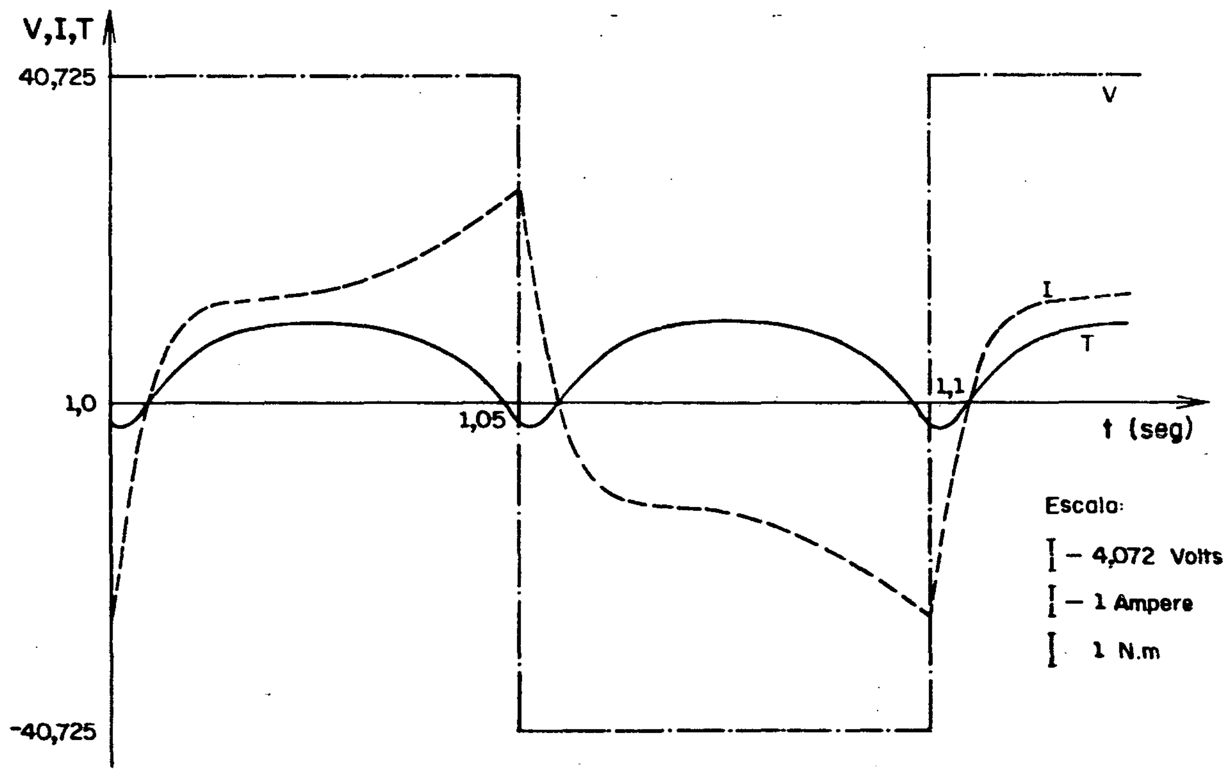

Figura 4.15. Tensão de alimentação retangular , freqüência de alimentação 10 Hz freqüência do rotor nominal (2,5Hz) - Lei tensão-freqüência de alimentação linear

4.5. Análise dos resultados obtidos na simulação:

As figuras (4.4. a 4.15), mostram as simulações para tensão de alimentação retangular, lei tensão-freqüência de alimentação linear. Para cada freqüência de alimentação de 10 a 60Hz, foram apresentadas nestas figuras, as simulações para freqüências do rotor nula e nominal (2,5Hz).

Para cada freqüência de alimentação, observa-se que a corrente do estator possui valor médio nulo e que o seu valor eficaz aumenta com a freqüência do rotor.

O torque médio para freqüência do rotor nula, é nulo. Seu valor cresce com a freqüência do rotor, para uma mesma freqüência de alimentação.

O torque instantâneo para essa mesma condição não é nulo. Ele é produzido pelas harmônicas da corrente do rotor, que criam campo girante com velocidade diferente da velocidade síncrona.

Observa-se ainda, que o torque médio cai com a freqüência de alimentação. Isso ocorre devido ao fluxo não ser constante, já que a lei tensão-freqüência de alimentação usada na simulação é linear.

4.6. Obtenção da corrente do estator em laboratório:

Para se conseguir a forma de onda da corrente do estator em laboratório utilizou-se o sistema representado na figura (4.16.).

As figuras (4.17.) e (4.18.) são fotografias das formas de onda da corrente do estator, com freqüência de alimentação de 60Hz e freqüências do rotor nula e nominal (2,5Hz), respectivamente, para uma tensão de alimentação retangular e lei tensão-freqüência de alimentação linear.

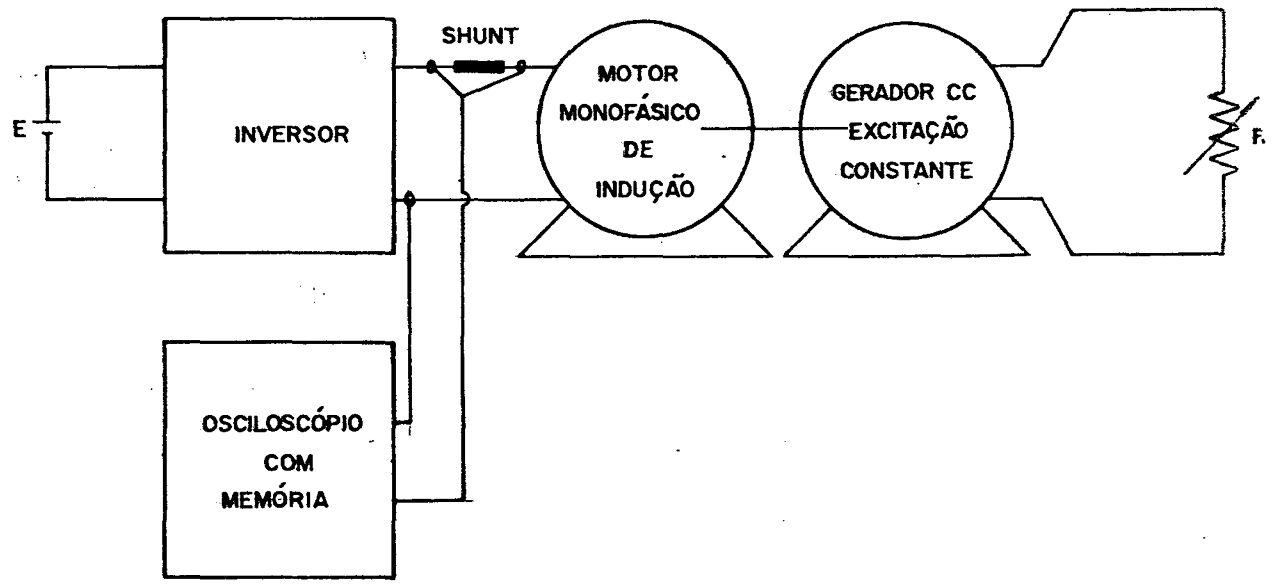

Figura 4.16. Sistema utilizado para obtenção da corrente do estator

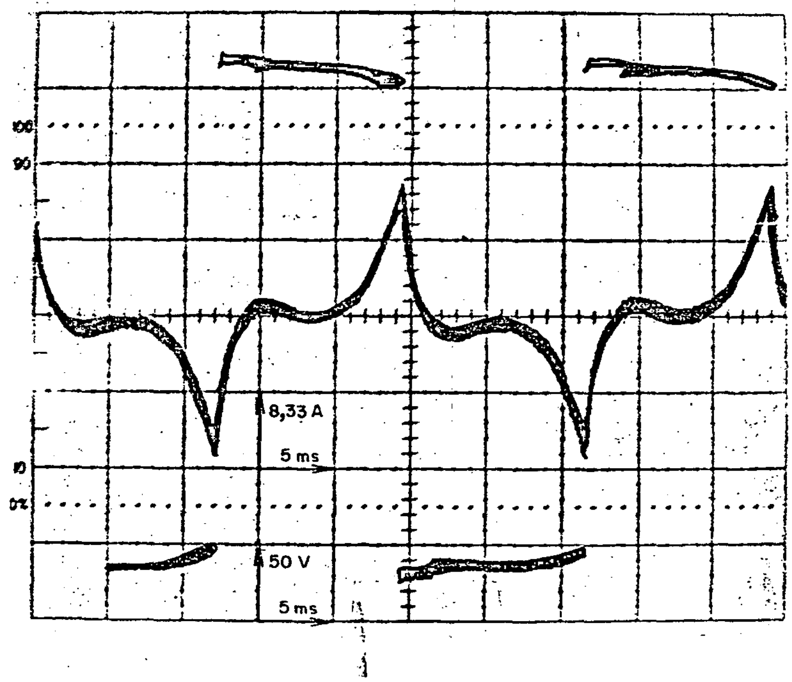

Figura 4.17. - Tensão e corrente do estator para freqüência do rotor nula.

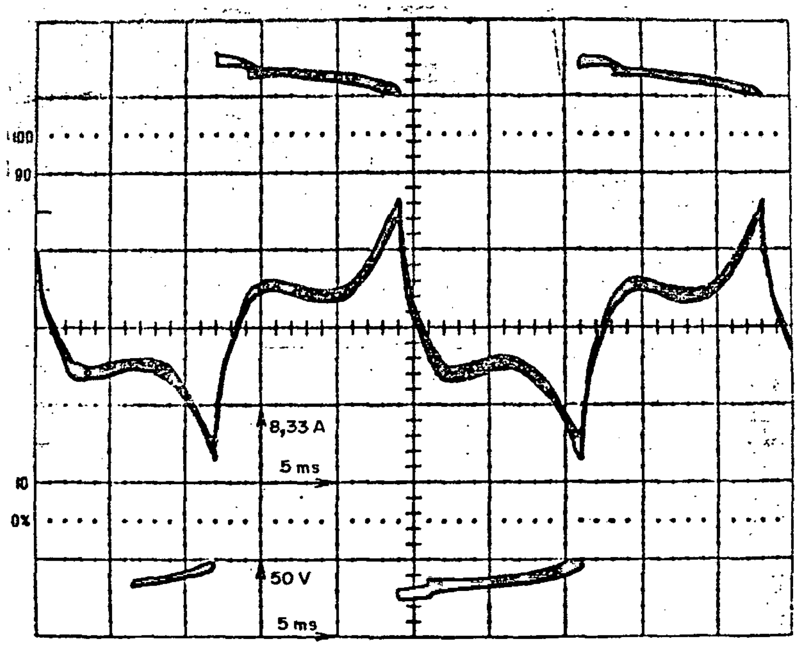

Figura 4.18. - Tensão e corrente do estator para freqüência do rotor nominal (2,5Hz)

As figuras (4.17.) e (4.18.), obtidas experimentalmente, foram estabelecidas para as mesmas condições das figuras (4.4.)e (4.5.) obtidas por simulação. Comparando-se as formas da corrente do estator verifica-se a validade do modelo e da simulação empregada.

4.7. Valor de pico da corrente do estator:

Tomando os valores de pico da corrente do estator para várias freqüências de alimentação e vários valores de freqüência do rotor, obtem-se as curvas da figura (4.19.) que são fundamentais no projeto dos inversores.

As curvas pontilhadas representam os valores obtidos em laboratório.

4.8. Conclusões:

Uma análise dos resultados obtidos na simulação mostra que o motor monofásico de indução possui torque instantâneo até mesmo para a velocidade de sincronismo (f_r=0), que seja alimentado por tensão senoidal ou retangular.

Quando o motor é alimentado por tensão senoidal e se encontra bloqueado, tanto o torque instantâneo quanto o torque médio, são nulos. Esse fenômeno, explicado pela teoria clássica das máquinas de indução,se deve ao fato de o campo de seqüência positiva ser igual ao campo de seqüência negativa. [1] , [2] , [3] .

Observa-se ainda, que o torque instantâneo é ondulado,o que poderia provocar em baixas freqüências de alimentação, um movimento rotativo pulsante no eixo do motor, sobretudo para motores com baixo momento de inércia.

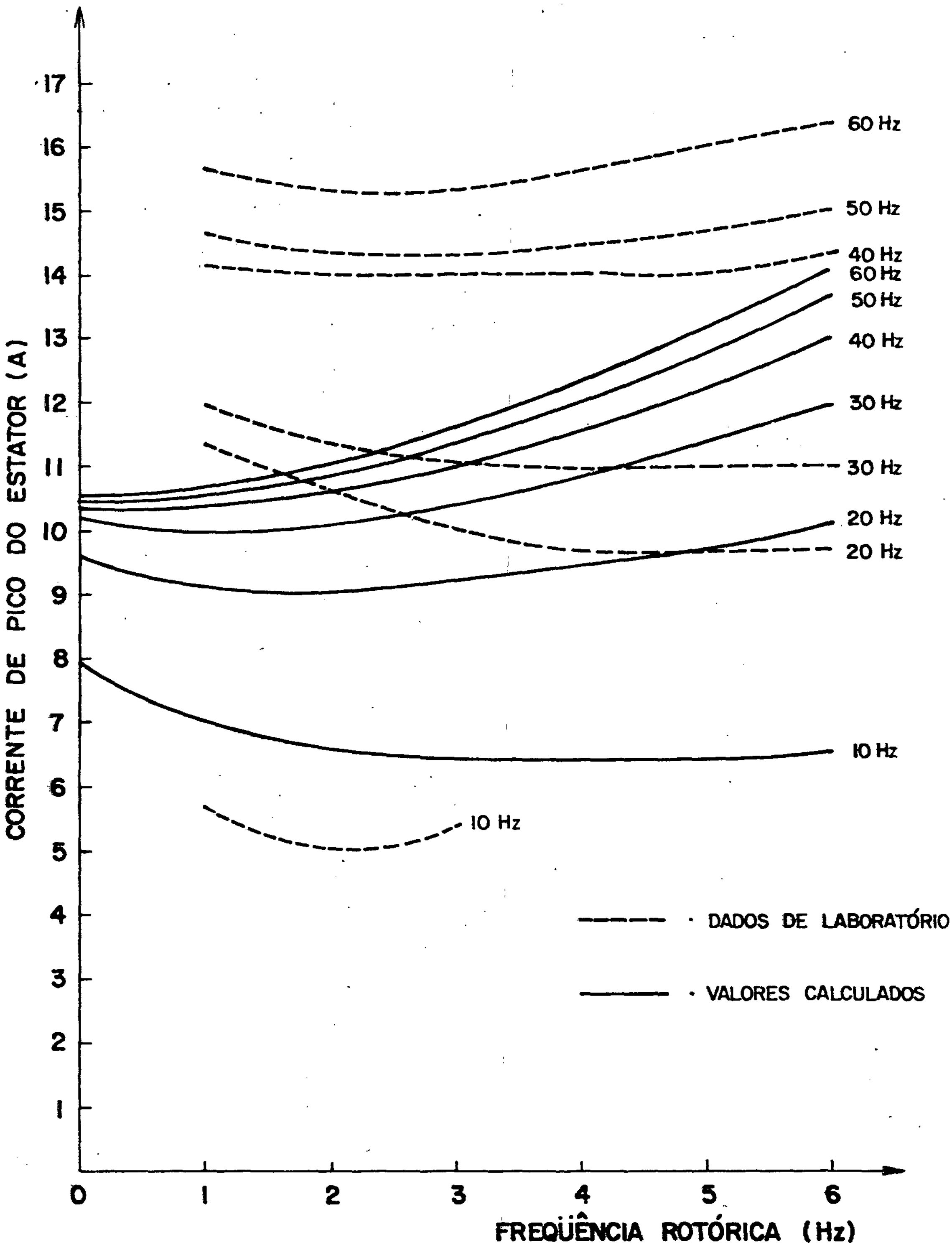

Figura 4.19 - Corrente do estator em função da frequência rotórica para várias frequências de alimentação. (Dados de laboratório e valores calculados).

Na figura (4.19), para uma mesma frequência de alimentação, verifica-se que o pico da corrente do estator sofre uma pequena variação com a frequência do rotor, e que o seu máximo valor ocorre para maior frequência de alimentação e maior frequência do rotor.

Se o fluxo do motor fosse constante, para todas as frequências de alimentação, as curvas da figura (4.19), tenderiam a ser iguais.

Uma comparação entre os valores calculados e os obtidos em laboratório é prejudicada pela imprecisão da leitura do valor de pico da corrente do estator no osciloscópio e ainda devido às elevadas perdas no inversor que não são consideradas nos valores calculados.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DO CONTROLE DO TORQUE MÁXIMO

5.1. Introdução:

Seja a figura(5.1.), na qual se representa duas curvas de torque em função da velocidade do motor monofásico de indução, para duas freqüências de alimentação diferentes.

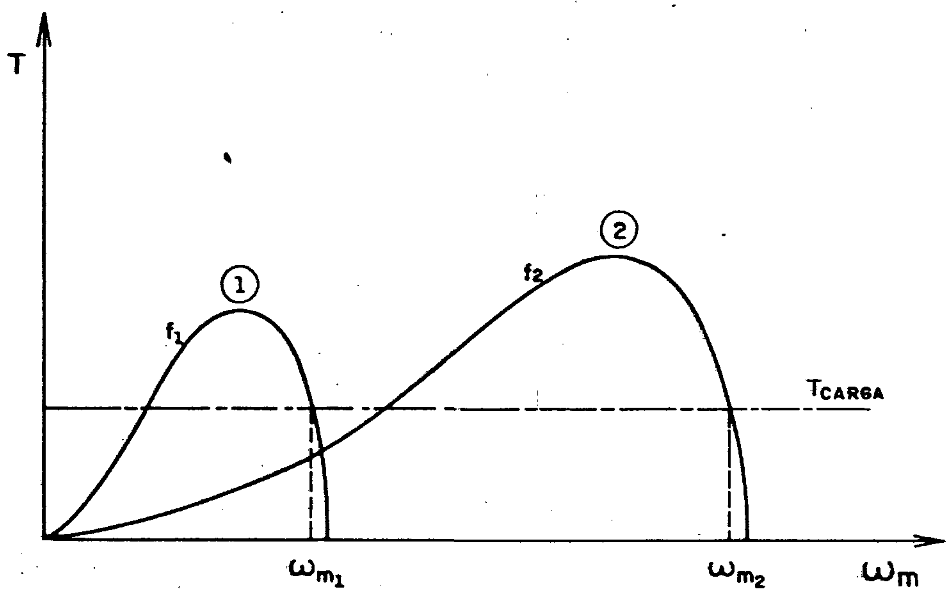

Figura 5.1. - Curvas de torque em função da velocidade para duas freqüências de alimentação diferentes e curva de carga.

Inicialmente o motor opera com freqüência f_1 e com velocidade de ωm_1. Deseja-se fazer com que o motor passe a operar com velocidade ωm_2. Para isto, deve-se fazer com que a freqüência de alimentação aumente de f_1 para f_2.

Imagina-se que ocorra uma variação brusca na freqüência de alimentação. Por ser a constante de tempo mecânica do motor elevada em relação à constante de tempo elétrica, a velocidade permanece instantaneamente igual a ω_{m1}. Como o motor passa a operar com a característica (2), na região vizinha de ω_{m1}, o torque de carga torna-se maior que o torque do motor. Ao invés dele sofrer um aumento de velocidade, sofrerá uma redução, até atingir a velocidade nula.

Este fato, mostra a necessidade de se aumentar a freqüência de alimentação de uma maneira progressiva, de modo a se evitar a situação apresentada na figura (5.1.).

Considera-se, em seguida, a figura (5.2.).

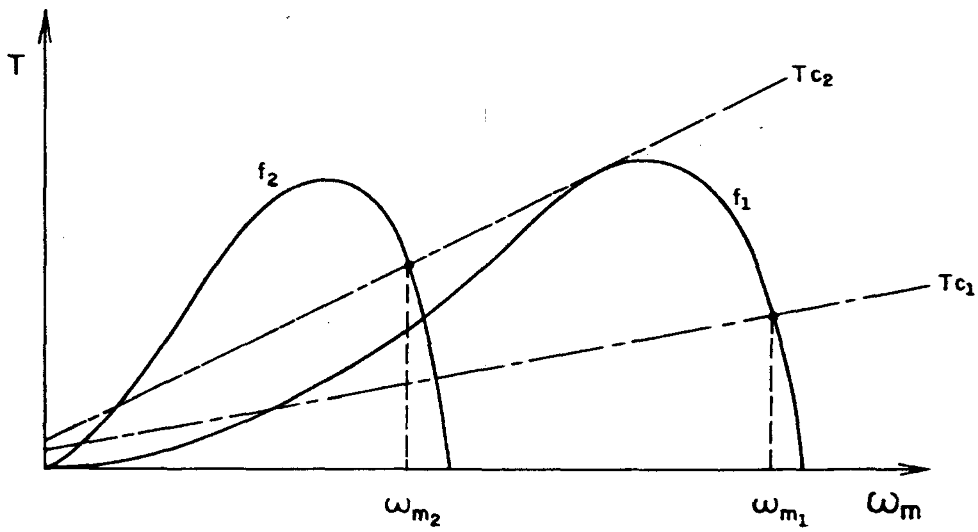

Figura 5.2. - Curvas de torque em função da velocidade para duas freqüências de alimentação e variação da curva de carga.

Considera-se o motor alimentado inicialmente com freqüência f_1, acionando uma carga com característica torque em função da velocidade representada por Tc_1. O motor opera, portanto, com velocidade ω_{m1}.

Considera-se em seguida, que a carga passe a apresentar a característica torque-velocidade representada na figura Tc_2.A interseção com a curva f_1 ocorre numa região de instabilidade e a velocidade do motor se reduz a zero. Nesse caso o conversor não exercerá mais nenhum controle sobre o motor.

Porém, se imediatamente o motor passar a operar com a freqüência de alimentação f_2, a nova curva de torque fará com que sua velocidade seja ω_{m2}, numa região estável e sem risco de perda de controle.

As duas situações apresentadas nas figuras (5.1.) e (5.2.), mostram a necessidade de se exercer um controle do torque máximo que a carga pode solicitar do motor sem risco de perda de controle ou de estabilidade.

O objetivo deste capítulo é estabelecer métodos que permitam, de uma maneira simples, realizar este controle.

5.2. Relação entre o torque e a corrente contínua na entrada do inversor:

Considere o esquema representado na figura (5.3.):

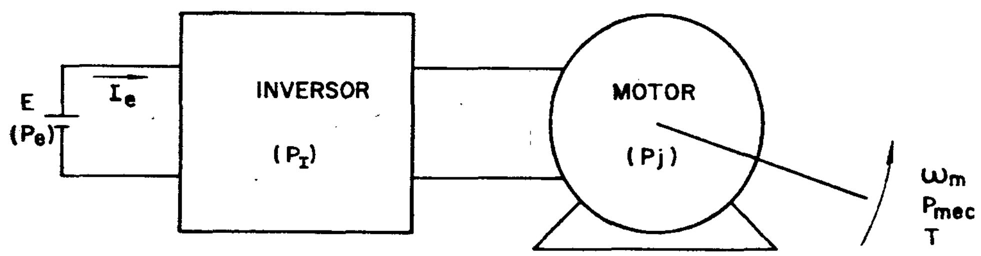

Figura 5.3. - Diagrama do motor monofásico de indução alimentado por inversor.

Onde:

Pe - potência da fonte de tensão contínua

Pi - perdas no inversor

Pj - perdas Joules no motor monofásico de indução.

Pmec - potência mecânica desenvolvida no eixo do motor

ωm - velocidade mecânica do motor

T - torque desenvolvido no eixo do motor

Então:

$$Pe = Pi + Pj + Pmec$$

$$Pmec = Pe - Pi - Pj \qquad (5.1.)$$

Como:

$$Pmec = T \cdot \omega_m$$

$$Pmec = T\,(\omega_s - \omega_r) \qquad (5.2.)$$

$$Pe = E \cdot Ie \qquad (5.3.)$$

Substituindo (5.2.) e (5.3.) em (5.1.) resulta:

$$T\,(\omega_s - \omega_r) = E.\ Ie - Pi - Pj \qquad (5.4.)$$

Para lei tensão-freqüência de alimentação linear, tem-se:

$$\omega_s = K'E$$

Substituindo (5.5.) em (5.4.), vem que:

$$T\,(K'E - \omega_r) = E \cdot Ie - Pi - Pj$$

$$T = \frac{E \cdot Ie}{(K'E - \omega_r)} - \frac{Pi}{(K'E - \omega_r)} - \frac{Pj}{(K'E - \omega_r)} \qquad (5.6.)$$

Como o motor opera com freqüências do rotor muito pequenas fazendo $\omega_r \approx 0$ na expressão (5.6.) tem-se:

$$T = KIe - \frac{K}{E}\,(Pe - Pj) \qquad (5.7.)$$

Desprezando-se as perdas do inversor e do motor na expressão (5.7.), verifica-se que o torque é diretamente proporcional à corrente de entrada do inversor e independente da freqüência de alimentação.

5.3. Relação entre o torque e a freqüência do rotor:

A análise será feita a partir do circuito equivalente do motor monofásico de indução apresentado na figura (5.4.).

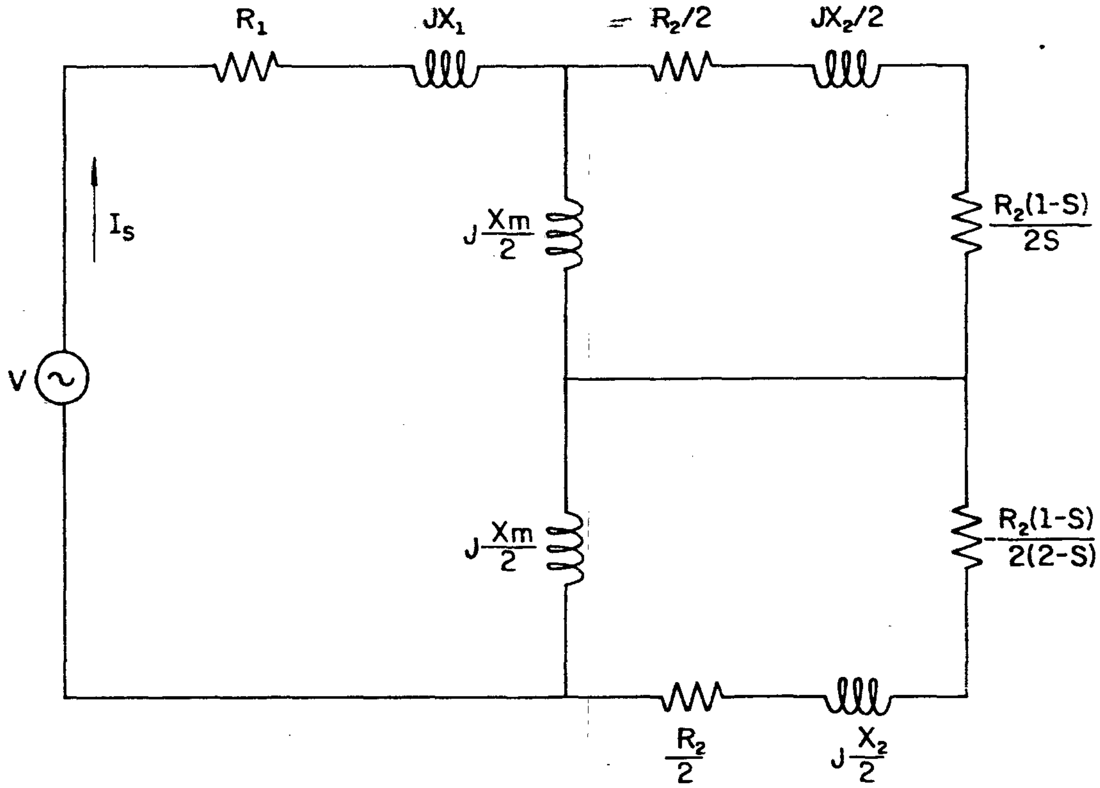

Figura 5.4. - Circuito equivalente do motor monofásico de indução.

Considera-se para efeito de simplificação que a resistência do estator é nula, daí:

$$R_1 = 0$$

Como o motor monofásico de indução opera em regime permanente com freqüências do rotor muito baixas, considera-se que:

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s} \cong 0$$

Assim,

$$\frac{R_2\ (1-s)}{2s} + \frac{R_2}{2} = \frac{R_2}{2s} = \frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_s}$$

e ainda:

$$-\frac{R_2(1-s)}{2(2-s)} \cong -\frac{R_2}{2} \cdot \frac{1}{2 - \frac{\omega_r}{\omega_s}} \cong -\frac{R_2}{4}$$

$$-\frac{R_2}{4} + \frac{R_2}{2} = \frac{R_2}{4}$$

Então para $s \cong 0$ o circuito equivalente da figura (5.4.) se torna o da figura (5.5.).

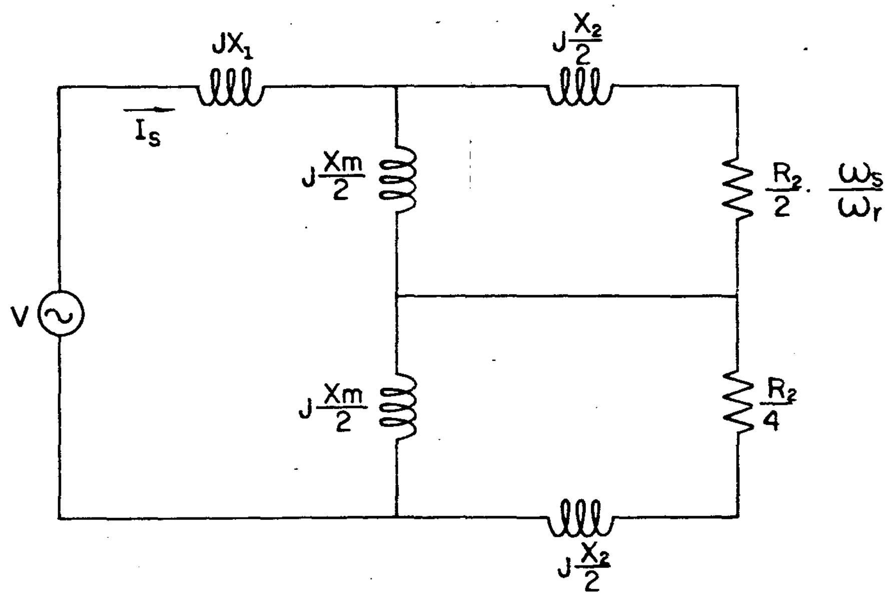

Figura 5.5. - Circuito equivalente aproximado para escorregamento e resistência do estator nulos.

Na figura (5.5.), vê-se que:

1) $\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r} >> |j\frac{X_2}{2}|$

2) $|j\frac{Xm}{2}| >> |\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r}|$

3) $(\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r}) \; // \; |j\frac{Xm}{2}| \cong (\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r})$

4) $(\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r}) >> |(\frac{R_2}{4} + j\frac{X_2}{2})| \; // \; |j\frac{Xm}{2}|$

5) $(\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r}) >> |jX_1|$

Então, $(\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r})$ é o único elemento do circuito que impede a circulação da corrente Is, daí:

$$T = \frac{\text{Potência}}{\text{Velocidade}}$$

$$T = \frac{1}{\omega_m} \cdot (\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r}) \cdot Is^2$$

$$T = \frac{1}{\omega_m} \cdot (\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r}) \cdot \frac{V^2}{(\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r})^2}$$

$$T = \frac{1}{\omega_m} \cdot \frac{V^2 \cdot \omega_r}{(\frac{R_2}{2} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_r})}$$

$$T = \frac{1}{\omega_m} \cdot \frac{V^2 \cdot \omega_r}{\frac{R_2}{2} \cdot \omega_s}$$

Como:

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r$$

Para $\omega_r \cong 0$,

$$\omega_m = \omega_s$$

Daí:

$$T = \frac{V}{\omega_s}^2 \cdot \frac{2}{R_2} \cdot \omega_r$$

Para uma lei tensão-freqüência de alimentação linear, a relação entre a tensão e a freqüência de sincronismo é constante:

$$\frac{V}{\omega_s} = K'$$

Então:

$$T = K'' \cdot \omega_r \qquad (5.8.)$$

A expressão (5.8.) pode ser verificada na figura (5.1.), onde para baixos escorregamentos o torque é aproximadamente proporcional à freqüência rotórica para cada freqüência de alimentação. Ou seja, a freqüência do rotor é uma imagem aproximada do torque, para torque de carga menor ou igual ao torque nominal do motor.

5.4. Estudo experimental do torque em função da corrente contínua na entrada do inversor:

O sistema empregado para levantar as curvas características do torque em função da corrente contínua na entrada do inversor, é o que se apresenta na figura (5.6.).

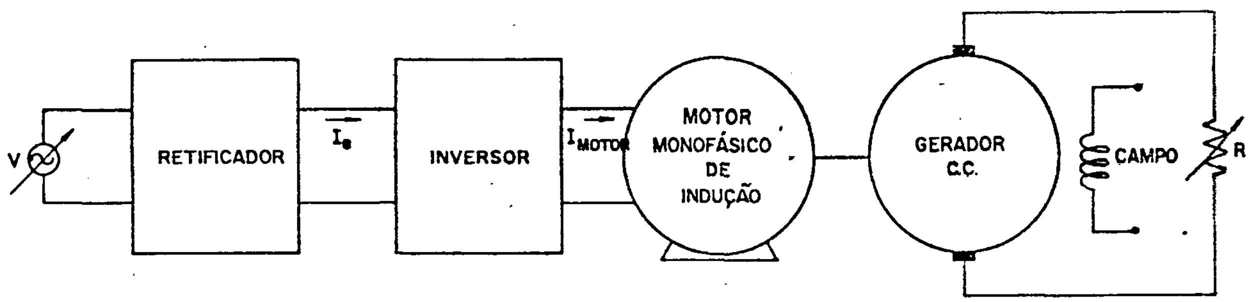

Figura 5.6. - Sistema empregado para levantar curvas características do torque.

O objetivo é verificar experimentalmente que a corrente contínua na entrada do inversor, representa o torque do motor.

Foi visto na expressão (5.8.) que a frequência do rotor é a imagem do torque, para baixos escorregamentos.

Traçando-se as curvas características da frequência do rotor em função da corrente contínua na entrada do inversor, para cada frequência de alimentação, tem-se indiretamente a relação entre o torque e essa corrente.

Se as curvas para cada frequência de alimentação se tornarem coincidentes, a corrente contínua na entrada do inversor poderá ser uma imagem do torque independente da frequência de alimentação.

Assim, utilizando o sistema da figura (5.6.) e obedecendo a lei tensão-frequência de alimentação linear, aplica-se uma determinada tensão através do transformador com variação contínua de tensão, coloca-se uma carga no eixo do motor através do gerador C.C. (excitação constante), mede-se a velocidade no eixo do sistema, lê-se a corrente Ie na entrada do inversor.

A carga no eixo do motor é variada com a carga do gerador C.C. Dessa maneira, obtém-se as curvas da figura (5.7.).

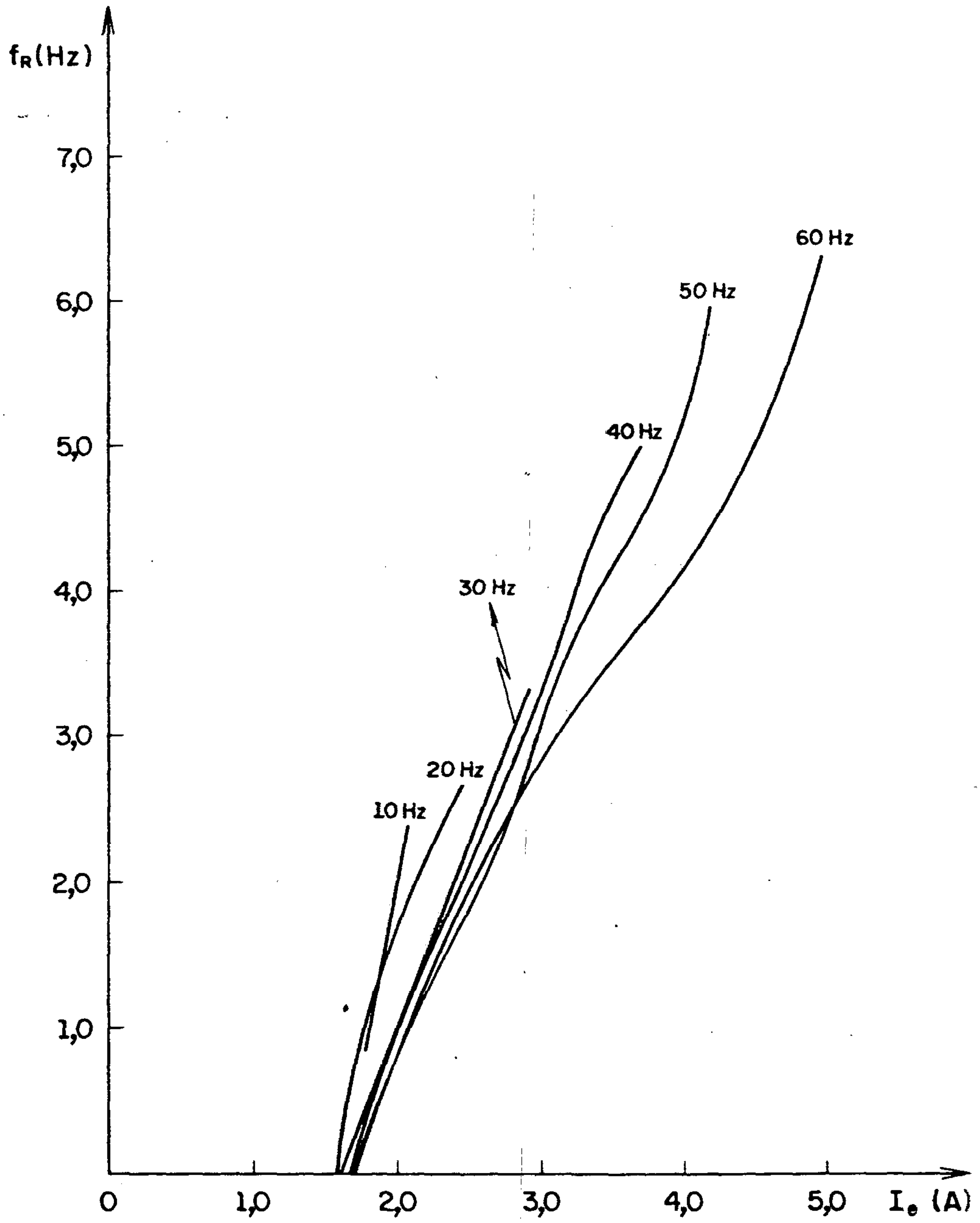

Figura 5.7 - Frequência do rotor em função da corrente contí - nua na entrada do inversor. Lei tensão-frequência de alimentação linear. (Dados de laboratório).

Observa-se na figura (5.7.) uma convergência de todas as curvas para um valor aproximado de Ie igual a 1,6 Ampéres, quando o torque é nulo ($f_r = 0$).

Essa é a corrente consumida em perdas joulicas pelo inversor McMurray-Redforf utilizado. Ver apêndice B.

Nota-se, que as curvas para as várias frequências de alimentação, quando o torque e a corrente do inversor são mais elevados, separam-se.

Isso se deve ao fluxo não permanecer constante para todas as frequências de **alimentação**. Uma correção do fluxo pode aproximar mais essas curvas entre si.

5.5 - Torque em função da corrente contínua na entrada do inversor, para fluxo corrigido:

Utiliza-se a lei tensão-frequência de alimentação para corréção do fluxo dada pela expressão (5.9.):

$$V = \frac{244,35}{60} f_s + 10 f_r$$

$$V = 4.072 f_s + 10 f_r \tag{5.9}$$

porque a tensão de alimentação é retangular e igual a 244,35 volts, para que sua componente fundamental tenha valor eficaz de 220 volts, ítem (4.2.) do capítulo 4.

Essa lei possibilita uma operação do motor com fluxo constante, para todas as frequências de alimentação, tornando possível o controle do torque através da corrente contínua na entrada do inversor.

O sistema empregado é apresentado na figura (5.6.).

Neste sistema, fixa-se a tensão da alimentação com o varivolt, impõe-se uma frequência do rotor, através da carga do gerador C.C. e utilizando-se a expressão (5.9.) calcula-se a frequência de alimentação, com a equação (5.10.):

$$f_s = \frac{V - 10f_r}{4,072} \qquad (5.10.)$$

Assim, traça-se as curvas da figura (5.8.)

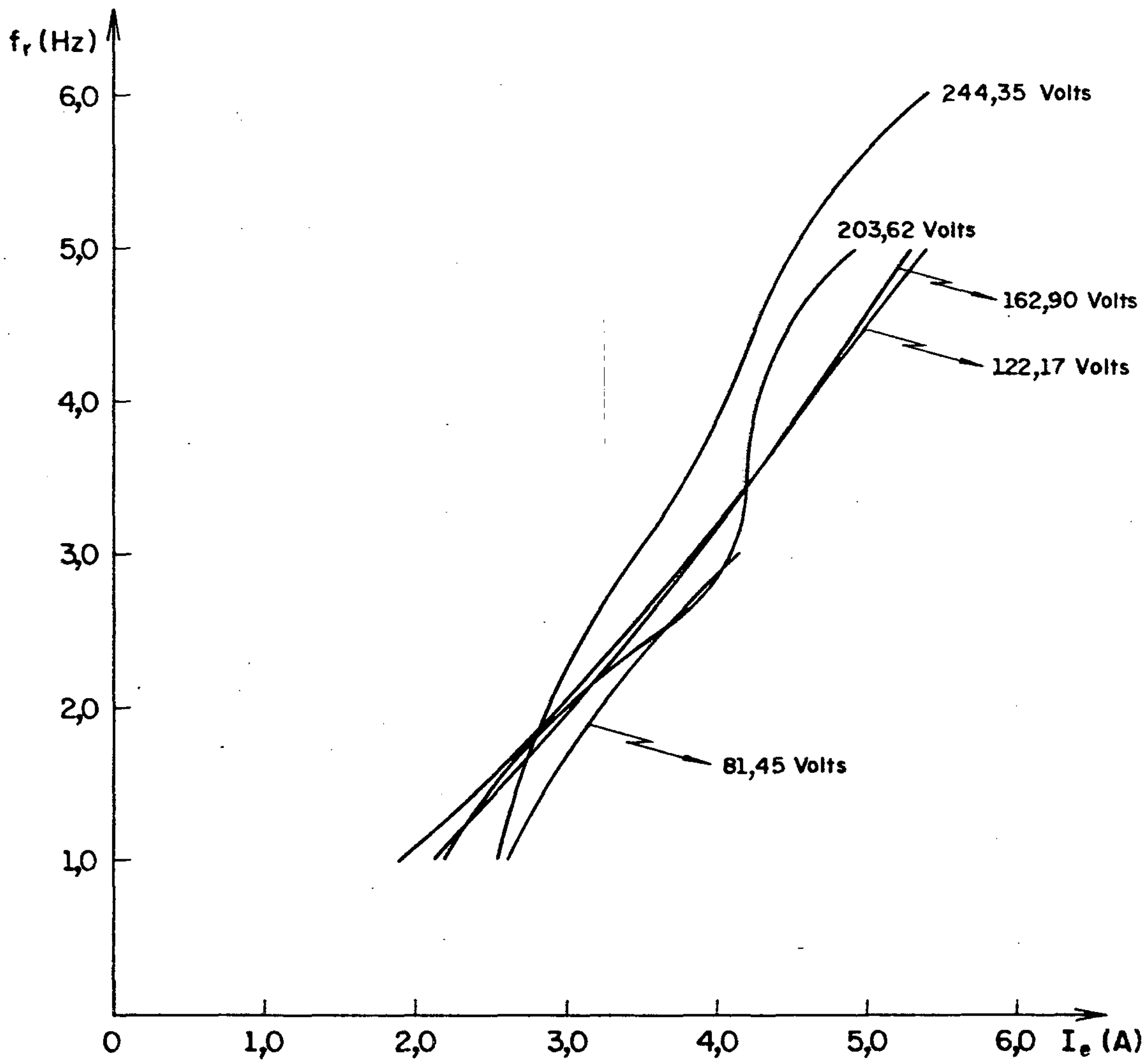

Figura 5.8 - Frequência do rotor em função da corrente contínua na entrada do inversor para fluxo corrigido. Lei tensão-frequência linear. (Dados do laboratório).

Com o fluxo corrigido, observa-se que há uma tendência das curvas, para os vários níveis de tensão de alimentação retangular, de se superporem.

Assim, como exemplo, tornando-se na figura (5.8.) o valor de corrente na entrada do inversor igual a 3 Ampêres, verifica-se que para todas as curvas o torque máximo e mínimo estão dentro de ± 15% do valor central, obedecendo aproximadamente a expressão (5.7.), estabelecida no ítem (5.2.).

Com a correção do fluxo, o torque pode ser monitorado pela corrente contínua na entrada do inversor, numa faixa mais ampla de operação do motor.

5.6. Conclusões:

Como se pode verificar através das curvas apresentadas, figuras (5.7.) e (5.8.), o torque pode ser controlado pela corrente contínua na entrada do inversor e para valores mais elevados de torque e corrente, o fluxo do motor deve ser corrigido.

Como no caso, por exemplo, de se querer acelerar o motor, de que maneira se deve aumentar a frequência, para que o torque de carga não seja maior que o seu torque. Ou quando há uma variação da curva de carga, de que maneira se deve apresentar a frequência de alimentação para que a nova curva de carga, intercepte a curva de torque do motor numa região de estabilidade.

Assim, com o conhecimento do torque a cada momento do acionamento, é possível evitar todos os problemas de estabilidade apresentados na introdução deste capítulo.

CAPÍTULO 6

ESTUDO EXPERIMENTAL DO CONTROLE DO TORQUE SOB CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS

6.1. Introdução:

O objetivo deste capítulo é verificar como se comporta dinamicamente no plano experimental, o motor monofásico de indução quando alimentado por inversor, com lei tensão-freqüência de alimentação linear, com controle indireto do torque, através da limitação automática da corrente na entrada do inversor.

6.2. Descrição do ensaio e resultados:

O sistema empregado para o ensaio dinâmico é o que se apresenta na figura (6.1.).

Material utilizado:

- Uma fonte de tensão regulada, com controle automático da corrente máxima de carga;
- Inversor de Mc Murray-Bedford;
- Um shunt de 60mv - 10 A;
- Osciloscópio duplo traço com memória;
- O motor monofásico de indução especificado no capítulo 2, acoplado a um gerador C.C. de 1,5 C.V;
- Uma carga resistiva (6 resistências de 120 Ω e 10 A cada uma);
- Uma fonte de tensão contínua para excitação do campo do gerador C.C.;

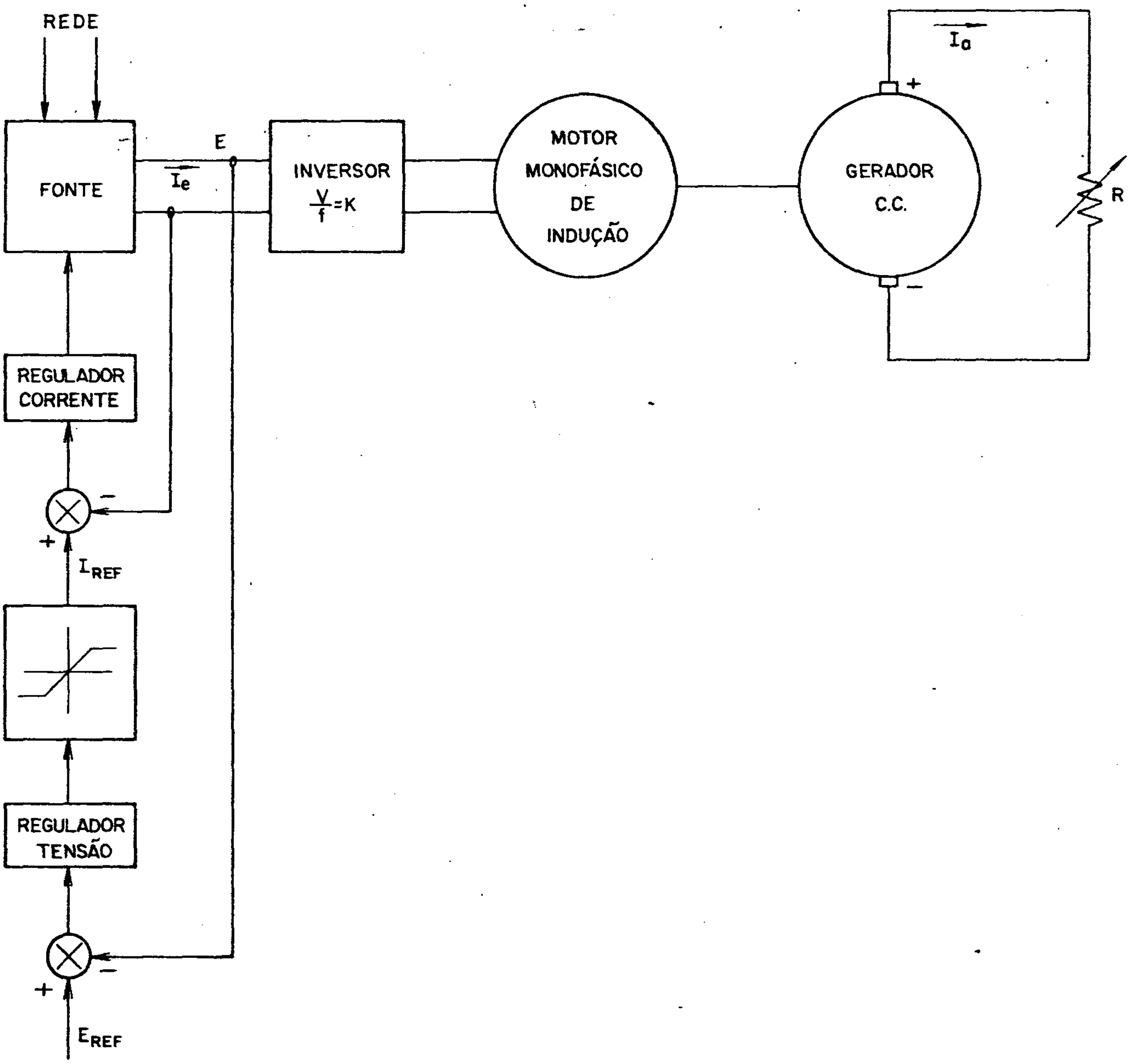

Figura 6.1. - Sistema empregado para limitação do torque do motor.

Utilizando uma excitação independente e constante para o gerador C.C., sua tensão gerada passa a ser uma imagem da velocidade do motor, pois:

$$Eg = K\ \emptyset\ \omega_m$$

Como

$\emptyset$ - constante

Vem que:

$$Eg = K' . \omega_m$$

Em seguida deve-se obter uma tensão gerada e uma corrente da armadura do gerador C.C. para que o torque fornecido pelo motor seja o nominal.

Sabe-se que:

$$T = \frac{\text{Potência}}{\text{Velocidade}}$$

Então:

$$T = \frac{\text{Potência do gerador C.C.}}{\text{Velocidade no eixo do motor}}$$

Daí, como o torque nominal do motor é 2,03 N.m, vem que:

$$T_{nom} = \frac{Eg . Ia}{\omega_m}$$

$$2{,}03 = \frac{Eg . 2{,}4}{121{,}47\ (rad/s)}$$

$$Eg = 102{,}74 \text{ volts}$$

Esse é o valor da tensão na saída do gerador C.C., quando o motor está fornecendo torque nominal e a fonte de tensão regulada está fornecendo a máxima tensão. Essa tensão gerada, corresponde a uma velocidade de 1.160 rpm medida no eixo do conjunto motor-gerador.

Assim, nas figuras (6.2.), (6.3.) e (6.4.), observa-se o comportamento do conjunto apresentado na figura (6.1.) quando uma variação brusca na tensão de referência é aplicada no sistema para provocar uma aceleração do motor, a partir de uma velocidade inicial baixa.

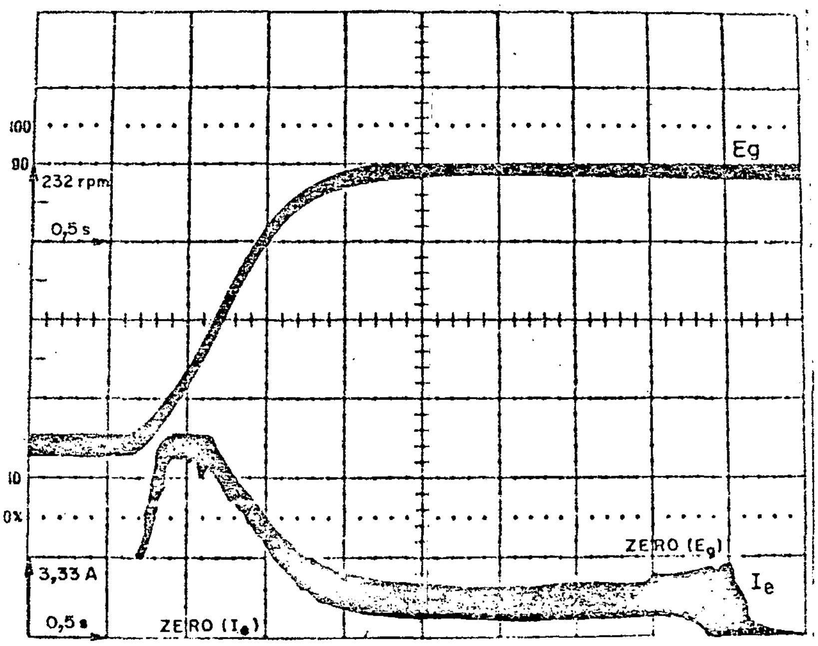

Figura 6.2. -Curvas da corrente contínua na entrada do inversor(torque) e da tensão gerada (velocidade) para grande variação da tensão de referência.

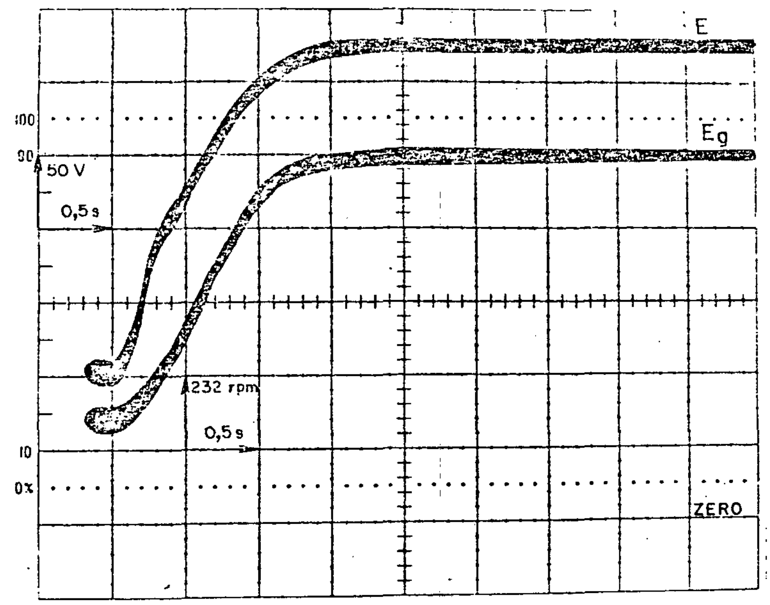

Figura 6.3. - Curvas da tensão da fonte E e tensão gerada E_g (velocidade)

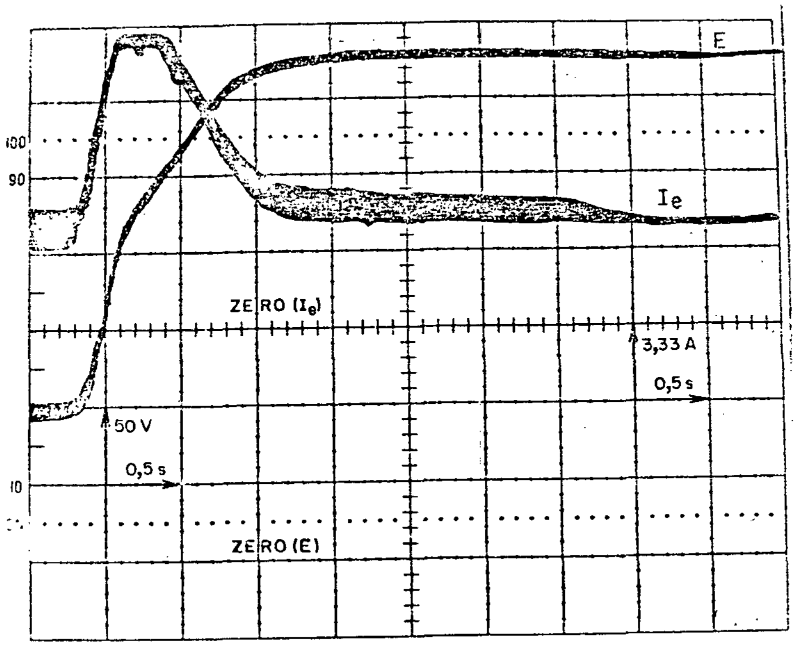

Figura 6.4. - Tensão na fonte E e corrente contínua na entrada do inversor I_e (torque)

6.3. Interpretação dos resultados experimentais:

Esse sistema para limitação do torque, figura (6.1.), garante uma aceleração do motor, sem que haja a possibilidade de perda de estabilidade.

Por mais elevado que seja a variação da tensão de referência, a corrente na entrada do inversor aumenta até o valor determinado pelo regulador de corrente.

Durante o tempo que a corrente na entrada do inversor permanece constante, o motor ganha velocidade com aceleração constante. Quando o motor se aproxima da velocidade de regime permanente, a corrente na entrada do inversor cai, atingindo um valor constante de manutenção da velocidade.

Esses fenômenos podem ser todos observados nas figuras (6.2.), (6.3.) e (6.4.).

A faixa de variação da velocidade, medida no eixo do motor, foi de 368 a 1.160 rpm, a partir do momento em que a variação de tensão é aplicada até o motor atingir o regime permanente.

6.4. Conclusões:

A partir dos resultados experimentais descritos no parágrafo precedente, conclui-se que o controle indireto do torque do motor, através da corrente contínua na entrada do inversor, permite operação estável, mesmo para as situações mais críticas, como a aceleração a partir de baixas velocidades.

CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados no desenvolvimento do trabalho apresentado, podemos concluir que:

1 - O motor monofásico de indução pode ser empregado em processos que exigem velocidade variável, quando alimentado por fonte de freqüência variável.

2 - É possível mantê-lo em operação estável, controlando-se o torque indiretamente, por meio do controle da corrente contínua na entrada do inversor.

3 - É possível controlá-lo, utilizando-se uma lei tensão-freqüência simplificada, de fácil implementação.

4 - O conversor utilizado é mais simples, mais compacto e mais confiável que o trifásico.

É importante salientar que o problema da partida não foi estudado e se impõe como prioridade na continuação do presente estudo, para complementá-lo e permitir a realização de um protótipo final com o grau de operacionalidade exigido em aplicações industriais.

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO APROXIMADA DOS PARÂMETROS DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO

O circuito do motor monofásico de indução é o da figura(1-A):

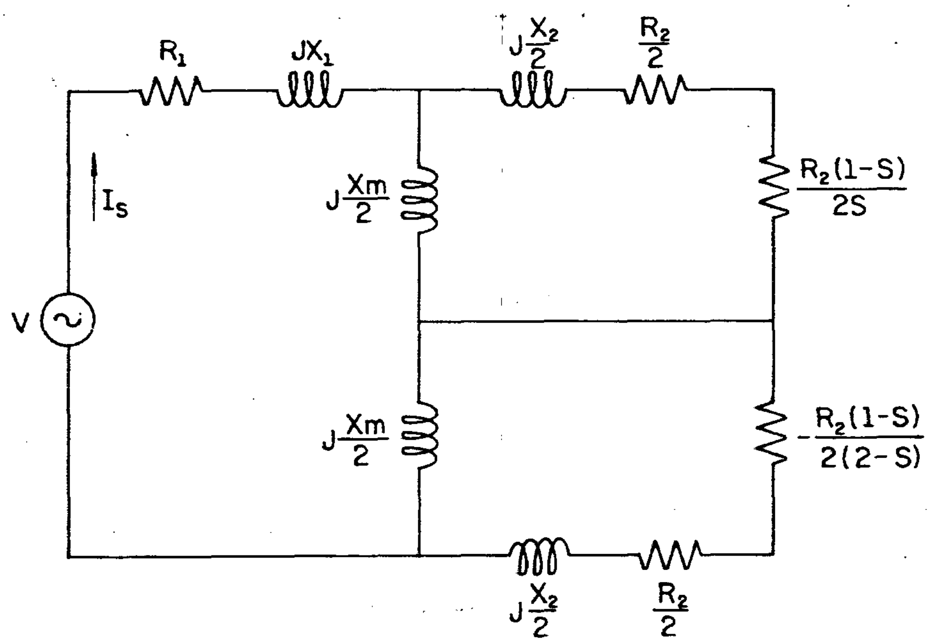

Figura 1-A- Circuito equivalente do motor monofásico de indução em termos dos parâmetros de dispersão.

Para determinação dos parâmetros de dispersão apresentados no circuito equivalente da figura (1), devem ser realizados dois ensaios:

1 - Ensaio com rotor travado;

2 - Ensaio com motor a vazio

1 - Ensaio com rotor travado

A determinação dos parâmetros do motor é aproximada, porque se considera que, para s = 1 (rotor travado), a impedância da reatância magnetizante (Xm), é muito grande se comparada com:

$$\frac{R_2}{2s} + j\left(\frac{X_2}{2}\right)$$

podendo, dessa maneira, ser desprezada.

Assim, o circuito equivalente para o motor monofásico de indução com rotor travado é apresentado na figura (2-A).

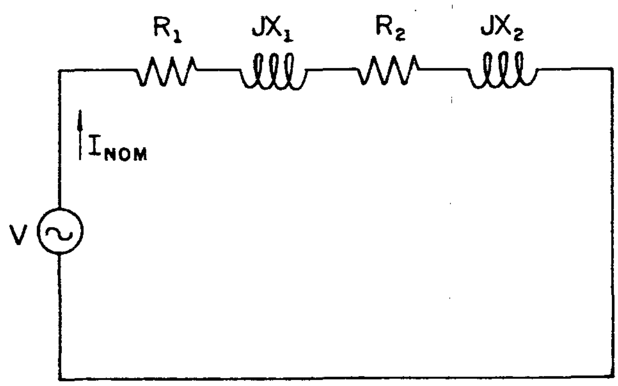

Figura 2-A - Circuito equivalente do motor de indução monofásico com rotor travado.

O procedimento para esse ensaio consiste em se travar o eixo do motor, aplicar tensão de alimentação com varivolt até fazer circular a sua corrente nominal.

As medidas obtidas em laboratório para o motor utilizado nesse trabalho, foram:

$V_{rt} = 59{,}6$ volts

$I_{rt} = 4{,}5$ A

$P_{rt} = 142$ watts

Com os valores de tensão e corrente do estator, calcula-se a impedância equivalente referida ao estator:

$$Z_e = \frac{V_{rt}}{I_{rt}}$$

$$Z_e = \frac{59{,}6}{4{,}5}$$

$$Z_e = 13{,}244\ \Omega$$

A resistência equivalente será:

$$R_e = \frac{P_{rt}}{I_{rt}^2}$$

$$R_e = \frac{142}{(4{,}5)^2}$$

$$R_e = 7{,}0123\ \Omega$$

Para se determinar a resistência do estator, aplica-se tensão contínua no estator até que circule no máximo a corrente nominal do motor, logo:

$$R_1 = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

$$R_1 = \frac{10}{2{,}9}$$

$$R_1 = 3{,}448\ \Omega$$

Assim, a resistência do rotor referida ao estator, será:

$R_2 = R_e - R_1$

$R_2 = (7,0123) - (3,448)$

$R_2 = 3,564\ \Omega$

A reatância equivalente é dada por:

$X_e = \sqrt{Z_e^{\,2} - R_e^{\,2}}$

Daí:

$X_e = \sqrt{(13,224)^2 - (3,564)^2}$

$X_e = 11,235\ \Omega$

Como a reatância de dispersão do estator é igual a do rotor referida ao estator, tem-se:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_e}{2}$$

$X_1 = X_2 = 5,617\ \Omega$

2 - Ensaio do motor monofásico de indução a vazio

Quando o motor está a vazio, o seu escorregamento é próximo de zero, então, a resistência

$$\frac{R_2}{2} + \frac{R_2\ (1-s)}{2s} = \frac{R_2}{2s}\ ,$$

se torna muito grande, podendo ser considerado um circuito aberto.

Na parte de seqüência negativa do circuito equivalente da figura (1), a resistência para escorregamento próximo de zero, será:

$$\frac{R_2}{2} + \frac{R_2(1-s)}{2(2-s)} = \frac{R_2}{4}$$

O circuito equivalente para o ensaio com o motor a vazio se apresenta na figura (3-A):

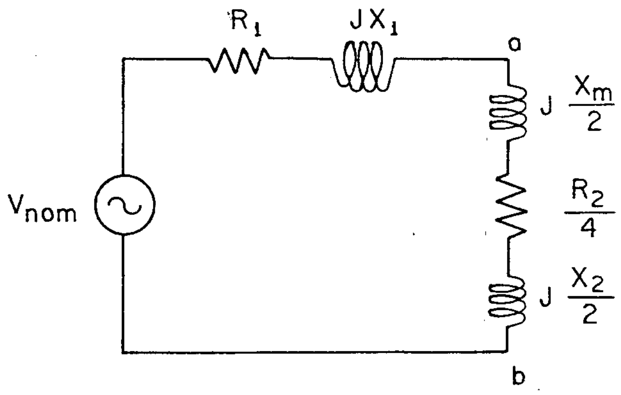

Figura 3-A - Circuito equivalente para o motor monofásico de indução a vazio.

As medidas para esse ensaio, foram:

$I_v = 3{,}52$ A

$V_{nom} = 220$ volts

Assim:

$\Delta V = (R_1{}^2 + X_1{}^2) \ . \ I_v$

$\Delta V = \sqrt{(3{,}448)^2 + (5{,}617)^2} \ . \ (3{,}52)$

$\Delta V = 23{,}02$ volts

A tensão nos pontos a e b, será:

$V_{ab} = V - \Delta V$

$V_{ab} = 220 - 23{,}02$

$V_{ab} = 196{,}797$ volts

A reatância de magnetização será calculada da seguinte maneira:

$$V_{ab} = \sqrt{\left(\frac{R_2}{4}\right)^2 + \left(\frac{Xm}{2} + \frac{X_2}{2}\right)^2} \cdot I_v$$

Então:

$$(196{,}797)^2 = \left(\frac{3{,}564}{4}\right)^2 + \left(\frac{Xm}{2} + \frac{5{,}617}{2}\right)^2 \cdot (3{,}52)^2$$

Daí:

$$Xm^2 + 11{,}26\ Xm - 12.448{,}86 = 0$$

Resolvendo a equação do 2º grau, resulta:

$$Xm = 117{,}56\ \Omega$$

3 - Cálculo dos parâmetros cíclicos do motor monofásico de indução:

Com os ensaios com rotor travado e a vazio, foram obtidos os parâmetros de dispersão do motor:

$R_1 = 3{,}448\ \Omega$

$R_2 = 3{,}564\ \Omega$

$X_1 = X_2 = 5{,}617\ \Omega$

$X_m = 117{,}56\ \Omega$

Como:

$Xm = a\ Xm_{sr}$

$X_2 = a\ X_r - aXm_{sr}$

Sendo:

$a = 1$

Tem-se:

$Xm_{sr} = Xm = 117{,}56$

$X_s = X_r = 5{,}617 + 117{,}56$

$X_s = X_r = 123{,}177\ \Omega$

Os parâmetros cíclicos do motor monofásico de indução, são:

$R_s = 3{,}448\ \Omega$

$R_r = 3{,}564\ \Omega$

$X_s = X_r = 123,177\ \Omega$

$Xm_{sr} = 117,56\ \Omega$

Em termos de indutância cíclica, tem-se:

$$L_s = L_r = \frac{X_s}{2.\pi.f} = \frac{123,177}{2.\pi.60}$$

$$L_s = L_r = 0,3267\ H$$

$$m_{sr} = \frac{Xm}{2.\pi.f} = \frac{117,5}{2.\pi.60}$$

$$m_{sr} = 0,3118\ H$$

APÊNDICE B

INVERSOR DE McMURRAY - BEDFORD

O inversor utilizado, McMURRAY-BEDFORD, apresenta a configuração da figura(1-B).

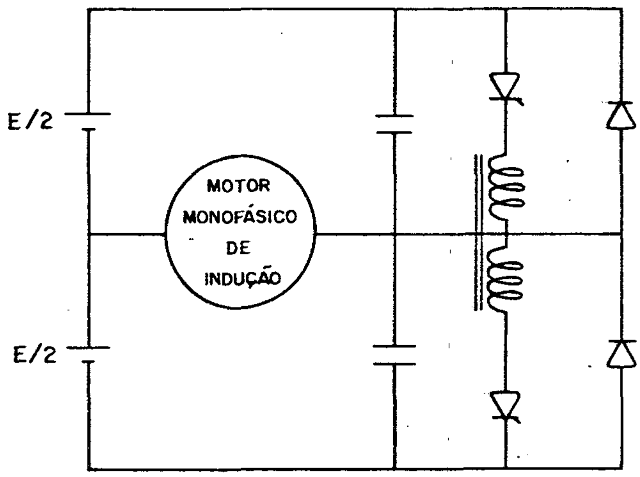

Figura 1-B - Uma fase do inversor de McMurray-Bedford, com ponto médio.

APÊNDICE C

PROGRAMAS UTILIZADOS

1 - KLEIBER FORTRAN - este programa calcula torque médio, corrente do estator (valor eficaz) e fluxo concatenado para várias freqüências de alimentação, em função da velocidade do motor. Usado para traçar as curvas das figuras (2.1), (2.2), (2.3).

2 - DAVID FORTRAN - calcula a tensão para manter o fluxo constante. Usado para traçar as curvas da figura (3.1).

3 - TORQUE FORTRAN - calcula o torque para o fluxo corrigido. Traça as curvas da figura (3.2).

4 - SIMULA WATFIV - simula o motor de indução monofásico. Utilizado para traçar as curvas das figuras (4.2) a (4.15).

```
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
C     ESTE PROGRAMA CALCULA O CORRENTE DO ESTATOR (EFICAZ),TORQUE MEDIO
C     E FLUXO CONCATENADO, PARA VARIAS FREQUENCIAS DE ALIMENTACAO, EM
C     FUNCAO DA VELOCIDADE DO MOTOR(WM),USADO PARA TRACAR AS CURVAS DAS
C     FIGURAS 2.1,2.2,2.3
      REAL IS,IR,LR,LS,LM
      DIMENSION F(50),WS(50),T(100),IS(100),FL(100),WM(100),XR(50),
     *XM(50),XS(50),WREDE(50),DR(50),DR1(50),DI(50),DI1(50),ANMT(50),
     *DEN(50),ANMI(50),IR(50),AD(50),ANIS(50),ANIR(50),FLR(100),FLI(100)
     *,AIS(50),AIR(50),TIS(50),TIR(50),TAD(50),FLR1(50),FLR2(50),FLI1(50
     *),FLI2(50)
      LEI=1
      IMP=3
      PI=ARCOS(-1.)
C     LEITURA DO NUMERO DE FREQUENCIAS
      READ(LEI,5)NF
    5 FORMAT(I5)
C     LEITURA DOS PARAMETROS DO MOTOR MONOFASICO
      READ(LEI,10)RS,LS,LM,RR,LR
   10 FORMAT(5F10.6)
      WRITE(IMP,15)RS,LS,LM,RR,LR
   15 FORMAT(/,1X,'RS=',F10.6,/,1X,'LS=',F10.6,/,1X,'LM=',F10.6,/,1X,'RR
     *=',F10.6,/,1X,'LR=',F10.6)
      DO 100 I=1,NF
C
C     LEITURA DA FREQUENCIA DE ALIMENTACAO
      READ(LEI,25)F(I)
   25 FORMAT(F5.2)
      WRITE(IMP,28)
   28 FORMAT(/,1X,84('*'))
      WRITE(IMP,30)F(I)
   30 FORMAT(//,T15,'FREQUENCIA DE ALIMENTACAO =',F6.2,' HERTZ')
      S=0.0
      WREDE(I)=2.*F(I)*PI
C     CALCULO DAS REATANCIAS CICLICAS
      XR(I)=2.*PI*F(I)*LR
      XS(I)=2.*PI*F(I)*LS
      XM(I)=2.*PI*F(I)*LM
      WRITE(IMP,32)
   32 FORMAT(/,14X,'XR',18X,'XS',20X,'XM',/)
      WRITE(IMP,33)XR(I),XS(I),XM(I)
   33 FORMAT(5X,E15.8,7X,E15.8,7X,E15.8)
      KONT=0.0
      J=0.0
      WS(I)=PI*F(I)
   40 A=(1.-S)
      J=KONT+1
      DR(I)=RS*(RR**2-XR(I)**2+(A**2)*(XR(I)**2))
      DR1(I)=RR*(XM(I)**2-2*XS(I)*XR(I))
      DI(I)=XS(I)*(RR**2-XR(I)**2+(A**2)*(XR(I)**2))
      DI1(I)=XR(I)*(XM(I)**2-(A**2)*(XM(I)**2)+2*RS*RR)
      ANMT(I)=A*RR*((XR(I)**2)*(1-A**2)-RR**2)
      DEN(I)=(DR(I)+DR1(I))*(DR(I)+DR1(I))+(DI(I)+DI1(I))*(DI(I)+DI1(I))
      AD(I)=(DR(I)+DR1(I))/(DI(I)+DI1(I))
      AD(I)=1/AD(I)
```

```
      TAD(I)=DATAN(AD(I))
      TAD(I)=TAD(I)+PI
C
C     CALCULO DO TORQUE
      T(J)=(((0.58356812OD0)**2)*WREDE(I)*(XM(I)**2)*ANMT(I))/DEN(I)
C     NUMERO DE PARES DE POLOS=2
      T(J)=T(J)*2.
C
C     CALCULO DA CORRENTE DO ESTATOR (IS)
      ANMI(I)=(RR**2-XR(I)**2+(A**2)*(XR(I)**2))*(RR**2-XR(I)**2+(A**2)*
     *(XR(I)**2))+(2*RR*XR(I))**2
      AIS(I)=(RR**2-XR(I)**2+(A**2)*(XR(I)**2))
      AIS(I)=AIS(I)/(2*RR*XR(I))
      TIS(I)=(1/AIS(I))
      ANIS(I)=DATAN(TIS(I))
      IF(A.EQ.1)GO TO 333
      ANIS(I)=(ANIS(I)+PI)-TAD(I)
      GO TO 334
  333 ANIS(I)=ANIS(I)-TAD(I)
  334 IS(J)=DSQRT(ANMI(I)/DEN(I))*0.58356812OD0*WREDE(I)
C     CALCULO DA CORRENTE DO ROTOR (IR)
      IR(J)=XM(I)*DSQRT((XR(I)*(1-A**2)*XR(I)*(1-A**2)+RR**2)/DEN(I))*
     *0.58356812OD0*WREDE(I)
      IF(A.EQ.1)GO TO 101
      TIR(I)=(-RR/(XR(I)*(1-(A**2))))
      ANIR(I)=DATAN(TIR(I))
      ANIR(I)=(2*PI+ANIR(I))-TAD(I)
      GO TO 102
  101 ANIR(I)=((3./2)*PI)-TAD(I)
C     CALCULO DO FLUXO (FL)
  102 FLR1(J)=LS*IS(J)*(DCOS(ANIS(I)))
      FLR2(J)=LM*IR(J)*(DCOS(ANIR(I)))
      FLR(J)= LS*IS(J)*(DCOS(ANIS(I)))+LM*IR(J)*DCOS(ANIR(I))
      FLI(J)= LS*IS(J)*(DSIN(ANIS(I)))+LM*IR(J)*DSIN(ANIR(I))
      FLI1(I)=LS*IS(I)*(DSIN(ANIS(I)))
      FLI2(I)=LM*IR(I)*(DSIN(ANIR(I)))
      FL(J)= DSQRT((FLR(J)+FLI(J))*(FLR(J)+FLI(J)))
C     V(J)=(0.54/FL(J))*WREDE
      WM(J)=A*WS(I)*30.0D0/PI
      IF(J.NE.1)GO TO 60
      WRITE(IMP,50)
   50 FORMAT(//,5X,'VELOCIDADE(WM) (RPM)',3X,'TORQUE(T) (N*M)',3X,'CORRE
     *NTE(IS) (A)',3X,'CORRENTE(IR) (A)',3X,'FLUXO (WEBER)')
   60 WRITE(IMP,70)WM(J),T(J),IS(J),IR(J),FL(J)
   70 FORMAT(/,T10,F9.2,T30,F9.2,T48,F9.2,T68,F9.2,T88,E15.8)
      S=S+0.05000
      KONT=KONT+1
      IF(S-1.0)40,40,99
   99 WRITE(IMP,200)KONT
  200 FORMAT(/,T15,'NUMERO DE PONTOS =',I6,/)
  100 CONTINUE
      STOP
      END
```

```
  6                                                    CLE00330
 3.448   0.326700 0.311800 3.564    0.326700           CLE00340
60.0                                                   CLE00350
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
```

```
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
C     ESTE PROGRAMA PERMITE CALCULAR A TENSAO DE ALIMENTACAO EM FUNCAO
C     DA FREQUENCIA DE ALIMENTACAO PARA VARIOS VALORES DE FREQUENCIA DO
C     ROTOR(FR) PARA QUE O FLUXO PERMANECA CONST. E IGUAL AO VALOR DO
C     FLUXO A VAZIO (0.58222637 WEBER). USADO PARA TRACAR AS CURVAS DA
C     DA FIGURA 3.1
      INTEGER FREDE
      REAL LR,LS,LM
      LEI=1
      IMP=3
      PIODO=ARCOS(-1.)
C
C     LEITURA DOS PARAMETROS DO MOTOR MONOFASICO
      READ(LEI,10)RR,LR,LM,RS,LS
   10 FORMAT(5F10.6)
      WRITE(IMP,15)RR,LR,LM,RS,LS
   15 FORMAT(/,1X,'RR=',F10.6,/,1X,'LR=',F10.6,/,1X,'LM=',F10.6,/,1X,'RS
     *=',F10.6,/,1X,'LS=',F10.6)
      FR=0.0
   20 WRITE(IMP,30)
   30 FORMAT(/,1X,84('*'))
      WRITE(IMP,40)FR
   40 FORMAT(/,T9,'FREQUENCIA DO ROTOR=',F5.2)
      WRITE(IMP,50)
   50 FORMAT(//,5X,'FREQ. ALIMENT. (HZ)',3X,'TENSAO (VOLTS)')
   25 J=FR
      IF(FR-J)26,26,27
   27 I=FR+0.5
      GO TO 55
   26 I=FR
   55 DO 555 FREDE=1,60
      IF(FREDE.LE.10)GO TO 60
      FREDE=FREDE+9.0
C
C     CALCULO DA FREQUENCIA DE SINCRONISMO (FS)
   60 FS=FREDE/2.
C     CALCULO DAS REATANCIAS CICLICAS
      XR=2.*PIODO*FREDE*LR
      XS=2.*PIODO*FREDE*LS
      XM=2.*PIODO*FREDE*LM
C
C     CALCULO DO NUMERADOR DA EQUACAO DE TENSAO
      A=(1.-(FR/FS))
      SR=RS*(RR**2-XR**2+(A**2)*(XR**2))
      SR1=RR*(XM**2-2*XS*XR)
      SI=XS*(RR**2-XR**2+(A**2)*(XR**2))
      SI1=XR*(XM**2-(A**2)*(XM**2)+2*RS*RR)
      SUP=(SR+SR1)*(SR+SR1)+(SI+SI1)*(SI+SI1)
C
      DR=XS*(RR**2-XR**2+(A**2)*XR**2)+(XM**2)*XR*(1-(A**2))
      DI=(2*RR*XS*XR-(XM**2)*RR)
      DEN=(DR**2)+(DI**2)
      WREDE=2.*PIODO*FREDE
C
C     CALCULO DA TENSAO
```

FILEO DAVID   FORTRAN A1 UFSC - NUCLEO DE PROCESSAMENTO DE DADOS   PAGE 002

```
      V=DSQRT(SUP/DEN)*WREDE*0.58356812                              DAV00560
C                                                                    DAV00570
      WRITE(IMP,70)FREDE,V                                           DAV00580
   70 FORMAT(/,T10,I5,T30,F9.3)                                      DAV00590
  555 CONTINUE                                                       DAV00600
      FR=FR+0.5                                                      DAV00610
      IF(FR-5.0)20,20,66                                             DAV00620
   66 STOP                                                           DAV00630
      END                                                            DAV00640
```

FILEO DAVID   DADOS   A1 UFSC - NUCLEO DE PROCESSAMENTO DE DADOS   PAGE 001

```
 3.564     0.326700  0.311800  3.448     0.326700                    CLE00340
```

```
C       ESTE PROGRAMA CALCULA O TORQUE MEDIO DO MOTOR
C     MONOFASICO DE INDUCAO PARA UMA TENSAO CUJA LEI E DADA POR -
C     V=(3.666*FREDE)+(10*FR) USADO PARA TRACAR AS CURVAS DA FIGURA 3.2
C
C                   PARAMETROS CICLICOS DO MOTOR MONAFASICO
C
C     RS = RESISTENCIA DO ESTATOR
C     RR = RESISTENCIA DO ROTOR
C     LS = INDUTANCIA DO ESTATOR
C     LR = INDUTANCIA DO ROTOR
C     LM = INDUTANCIA DE MAGNETIZACAO
C
C                   OUTRAS VARIAVEIS
C
C     FREDE = FREQUENCIA DA REDE
C     FR = FREQUENCIA DO ROTOR
C     V = TENSAO DE ALIMENTACAO
C     WREDE = PULSACAO DA REDE
C     WS = VELOCIDADE DE SINCRONISMO
C     S = ESCORREGAMENTO
      INTEGER FREDE
      REAL LR,LS,LM
      LEI=1
      IMP=3
      PI=ARCOS(-1.)
C
C     LEITURA DOS PARAMETROS DO MOTOR MONOFASICO
      READ(LEI,10)RR,LR,LM,RS,LS
   10 FORMAT(5F10.6)
      WRITE(IMP,15)RR,LR,LM,RS,LS
   15 FORMAT(/,1X,'RR=',F10.6,/,1X,'LR=',F10.6,/,1X,'LM=',F10.6,/,1X,'RS
     *=',F10.6,/,1X,'LS=',F10.6)
      N1=1
      N2=10
      N3=1
  500 DO 666 FREDE=N1,N2,N3
C
      S=0.00
      WRITE(IMP,30)
   30 FORMAT(/,1X,84('*'))
      WRITE(IMP,40)FREDE
   40 FORMAT(/,T9,'FREQUENCIA DA REDE = ',I3)
      WRITE(IMP,50)
   50 FORMAT(//,5X,'VELOCIDADE MEC.(WM)',5X,'TORQUE (N*M)')
C     CALCULO DAS REATANCIAS CICLICAS
   20 XR=2.*PI*FREDE*LR
      XS=2.*PI*FREDE*LS
      XM=2.*PI*FREDE*LM
      FR=S*FREDE
C     CALCULO DO DENOMINADOR DA EQUACAO DO FLUXO
      A=(1.-S)
      DR1=RS*(RR*RR+(XR*XR)*((A*A)-1))
      DR2=RR*((XM*XM)-2*XS*XR)
      DR=DR1+DR2
      DI1=XS*((RR*RR)+(XR*XR)*((A*A)-1))
```

```
      DI2=XR*((XM*XM)*(1-(A*A))+2*RS*RR)
      DI=DI1+DI2
      DEN=((DI*DI)+(DR*DR))
C
C     CALCULO DO NUMERADOR DA EQUACAO DO TORQUE
      TN=A*RR*((XR**2)*(1-(A**2))-(RR**2))
C
C     CALCULO DA TENSAO
      V=(3.666*FREDE)+(10*FR)
      WREDE=2.*PI*FREDE
      WS=WREDE/2
C     CALCULO DO TORQUE
      T=TN/DEN
      TORQ=T*(XM**2)*(V**2)/WREDE
C     NUMERO DE PARES DE POLOS=2
      TORQ=TORQ*2
C
      WM=A*WS*30./PI
      WRITE(IMP,70)WM,TORQ
   70 FORMAT(/,T10,F8.2,T30,F11.4)
      S=S+0.05
      IF(S-1.)20,20,666
C
  666 CONTINUE
      IF(N2-60)80,100,100
   80 N1=20
      N2=60
      N3=10
      GO TO 500
  100 STOP
C
      END
```



```
  3.564     0.326700  0.311800  3.448     0.326700                  CLE00340
```

```
//GCGTESE  JOB PGEEL00C,'EEL22.KLEIBER',CLASS=A,MSGLEVEL=1,MSGCLASS=V
//         EXEC WATFIV,CLASS=V
//GO.SYSIN DD *
$JOB            KLEIBER,KP=29,NOEXT                                   STA00040
C                                                                     SIM00020
C     SIMULACAO DE UM MOTOR DE INDUCAO MONOFASICO                     SIM00030
C                                                                     SIM00040
C           EQUACAO DO SISTEMA                                        SIM00050
C                                                                     SIM00060
C                D(I) = A*I + B*VSD                                   SIM00070
C                                                                     SIM00080
C                  T = N*MSR*ISD*IRQ                                  SIM00090
C                                                                     SIM00100
C           DADOS DE ENTRADA GERAIS                                   SIM00110
C                                                                     SIM00120
C                 N  = NUMERO DE EQUACOES DIFERENCIAIS                SIM00130
C                 NM = NUMERO DE CURVAS A SEREM PLCTADAS              SIM00140
C                 X  = VETOR ONDE SERAO INTRODUZIDAS AS CONDICOES     SIM00150
C                      INICIAIS                                       SIM00160
C               CONT = MATRIZ DE IDENTIFICACAO DAS CURVAS             SIM00170
C                 TO = TEMPO INICIAL                                  SIM00180
C                 TF = TEMPO FINAL                                    SIM00190
C                  H = PASSO DE INTEGRACAO                            SIM00200
C                 H1 = NUMERO DE PONTOS IGNORADOS NO ARMAZENAMENTO    SIM00210
C                      OBS - DEVEMOS TER ((TF-TO)/(H*H1)).LE.200      SIM00220
C                  F = FREQUENCIA DE ALIMENTACAO                      SIM00230
C                                                                     SIM00240
C           PARAMETROS DA MAQUINA                                     SIM00250
C                                                                     SIM00260
C                 RS = RESISTENCIA DO ESTADOR                         SIM00270
C                 RR = RESISTENCIA DO ROTOR                           SIM00280
C                 LS = INDUTANCIA DE DISPERSAO DO ESTATOR             SIM00290
C                 LR = INDUTANCIA DE DISPERSAO DO ROTOR               SIM00300
C                 LM = INDUTANCIA  MUTUA                              SIM00310
C                 RN = RELACAO ENTRE VELOC. MECANICA E VELOC. SINCRONA SIM00320
C                                                                     SIM00330
C           DADOS DA TENSAO DE ALIMENTACAO                            SIM00340
C                                                                     SIM00350
C                IAL = FLAG DE ESCOLHA DA TENSAO DE ALIMENTACAO       SIM00360
C                      TAL = 0 - ONDA RETANGULAR                      SIM00370
C                      TAL = 1 - ONDA SENOIDAL                        SIM00380
C                                                                     SIM00390
C                AMP = AMPLITUDE DA TENSAO DE ALIMENTACAO             SIM00400
C                PER= PERIODO OU FREQUENCIA ANGULAR (DEPENDE DE IAL)  SIM00410
C                DEF = DEFASAGEM                                      SIM00420
C                                                                     SIM00430
      COMMON/DAD/N,NM,IAL,X                                           SIM00440
      COMMON/GER/A,B,AMP,DEF,PER                                      SIM00450
      COMMON/MON/RS,RR,LS,LR,LM,RN,F                                  SIM00460
      DIMENSION A(3,3),B(3),X(5,201),CONT(5,5),ICURV(5)               SIM00470
      DOUBLE PRECISION TO,TF,H,SPEC,HI,TINT,PER,FA                    SIM00480
      INTEGER R,W,H1,F                                                SIM00490
      DATA CONT/25*'    '/                                            SIM00500
      REAL LR,LS,LM                                                   SIM00510
      R=5                                                             SIM00520
```

```
      W=6                                                         SIM00530
C                                                                 SIM00540
C     LEITURA DOS DADOS GERAIS                                    SIM00550
C                                                                 SIM00560
      READ(R,10)N,NM,FA                                           SIM00570
10    FORMAT(2I1,E11.4)                                           SIM00580
      F=FA                                                        SIM00590
C
C     TEMPO INICIAL E TEMPO FINAL                                 SIM00600
C                                                                 SIM00610
      READ(R,20)T0,TINT                                           SIM00620
20    FORMAT(2E11.4)                                              SIM00630
      TF=TINT+3.0D0*(1.0D0/FA)
C                                                                 SIM00640
C     NO. DE PONTOS IGNORADOS E PASSO DE INTEGRACAO               SIM00650
C                                                                 SIM00660
      READ(R,30)H1                                                SIM00670
30    FORMAT(I3)                                                  SIM00680
      H=1.0D0/(FA*100.0D0)
C                                                                 SIM00690
C     IDENTIFICACAO DAS CURVAS                                    SIM00700
C                                                                 SIM00710
      READ(R,40)((CONT(I,J),J=1,5),I=1,NM)                        SIM00720
40    FORMAT(5A4)                                                 SIM00730
C                                                                 SIM00740
C     CONDICOES INICIAIS                                          SIM00750
C                                                                 SIM00760
      READ(R,50)(X(I,1),I=1,NM)                                   SIM00770
50    FORMAT(5F10.4)                                              SIM00780
C                                                                 SIM00790
C     TESTE DA RESTRICAO SOBRE H E H1                             SIM00800
C                                                                 SIM00810
      IF((TF-TINT)/(H*H1).LE.200)GO TO 60                         SIM00820
      H1=((TF-TINT)/(H*200))+1                                    SIM00830
C                                                                 SIM00840
C     LEITURA DOS PARAMETROS DA MAQUINA                           SIM00850
C                                                                 SIM00860
60    READ(R,70)RS,RR,LS,LR,LM,RN                                 SIM00870
70    FORMAT(5F10.4,F10.7)                                        SIM00880
C                                                                 SIM00090
C     LEITURA DOS DADOS DA TENSAO DE ALIMENTACAO                  SIM00900
C                                                                 SIM00910
      PER=1.0D0/FA
      READ(R,80)IAL                                               SIM00920
80    FORMAT(I1)                                                  SIM00930
      IF(IAL.NE.0)GO TO 100                                       SIM00940
      READ(R,90)AMP,DEF                                           SIM00950
90    FORMAT(2F10.4)                                              SIM00960
      GO TO 110                                                   SIM00970
100   READ(R,90)AMP,DEF                                           SIM00980
      PER=2.0D0*3.1415927D0*FA
110   CONTINUE                                                    SIM00990
C                                                                 SIM01000
C     CHAMADA A ROTINA PARA MONTAGEM DE A E B                     SIM01010
C                                                                 SIM01020
```

120

```
      CALL MONTA                                                        SIMO1030
C                                                                       SIMO1040
C---- IMPRESSAO DOS DADOS                                               SIMO1050
C                                                                       SIMO1060
      WRITE(W,120)N,NM,TINT,TF,H,H1,F                                   SIMO1070
  120 FORMAT(////,T40,'SIMULACAO DE UM MOTOR DE INDUCAO MONOFASICO',//,T SIMO1080
     *52,'EQUACOES DO SITEMA',//,T53,'D(I) = A*I + B*VSD',/,T54,'T = N*MSIMO1090
     *SR*ISD*IRQ',//,T45,'*** DADOS DE ENTRADA GERAIS ******',/,T48,'NUMSIMO1100
     * EQUACOES DIFERENCIAIS =',1X,I2,/,T 48,'NUM. DE CURVAS A SEREM PLOSIMO1110
     *TADAS =',1X,I2,/,T48,'TEMPO INICIAL =',1X,F10.4,/,T48,'TEMPO FINALSIMO1120
     * =',1X,F10.4,/,T48,'PASSO DE INTEGRACAO =',1X,F10.4,/,T48,'NUM. DESIMO1130
     * PONTOS A SEREM IGNORADOS NO ARMAZENAMENTO =',1X,I2,/,T48,'FREQUENSIMO1140
     *CIA DE ALIMENTACAO =',1X,I2)                                      SIMO1150
C                                                                       SIMO1160
C---- FREQUENCIA DO ROTOR                                               SIMO1170
      FR=(1-RN)*60                                                      SIMO1180
C                                                                       SIMO1190
      WRITE(W,130)RS,RR,LS,LR,LM,FR                                     SIMO1200
  130 FORMAT(///,T48,'*** PARAMETROS DA MAQUINA ***',/,T48,'RESIST. DO ESIMO1210
     *STATOR =',1X,F10. 4,/,T48,'RESIST. DO ROTOR =',1X,F10.4,/,T48,'INDSIMO1220
     *UTANCIA CICLICA DO ESTATOR =',1X,F10.4,/,T48,'INDUTANCIA CICLICA DSIMO1230
     *O ROTOR =',1X,F10.4,/,T48,'INDUTANCIA CICLICA MUTUA =',1X,F10.4,/,SIMO1240
     *T48,'FREQUENCIA DO ROTOR (FR) EM HZ =',1X,F10.4)                  SIMO1250
C                                                                       SIMO1260
      WRITE(W,140)                                                      SIMO1270
  140 FORMAT(//,T52,'*** MATRIZ A ***')                                 SIMO1280
      DO 300I=1,N                                                       SIMO1290
  300 WRITE(W,150)(A(I,J),J=1,N)                                        SIMO1300
  150 FORMAT(T44,3F10.4,/)                                              SIMO1310
      WRITE(W,160)                                                      SIMO1320
  160 FORMAT(//,T52,'*** MATRIZ B ***')                                 SIMO1330
      DO 400 I=1,N                                                      SIMO1340
  400 WRITE(W,150)B(I)                                                  SIMO1350
      WRITE(W,170)IAL,AMP,PER,DEF                                       SIMO1360
  170 FORMAT(//,T41,'*** DADOS DA TENSAO DE ALIMENTACAO ***',//,T45,'FLASIMO1370
     *G DE ESCOLHA DA TENSAO DE ALIMENTACAO =',1X,I1,/,T45,'AMPLITUDE DASIMO1380
     * TENSAO DE ALIMENTACAO =',1X,F10.4,/,T45,'PERIODO OU FREQUENCIA ANSIMO1390
     *GULAR =',1X,E11.4,/,T45,'DEFASAGEM =',1X,F10.4,/)                 SIMO1400
C                                                                       SIMO1410
C     CHAMADA A ROTINA DE INTEGRACAO NUMERICA                           SIMO1420
C                                                                       SIMO1430
      H2=FLOAT(H1)                                                      SIMO1440
      H3=DBLE(H2)                                                       SIMO1450
      SPEC=H*H1                                                         SIMO1460
      CALL SIAM4(H,SPEC,TO,TF,TINT)                                     SIMO1470
C                                                                       SIMO1480
C     IMPRESSAO DA TABELA                                               SIMO1490
C                                                                       SIMO1500
      HI=H*H2                                                           SIMO1510
      T=TINT-HI                                                         SIMO1520
      IA=((TF-TINT)/(H*H1)+1)                                           SIMO1530
      WRITE(W,500)                                                      SIMO1540
  500 FORMAT(/,18X,'**** IMPRESSAO DA TABELA ****',/)                   SIMO1550
      DO 510 I=1,IA                                                     SIMO1560
      T=T+HI                                                            SIMO1570
```

```
  510 WRITE(W,520)T,(J,X(J,I),J=1,NM)
  520 FORMAT(3X,'TEMPO =',1X,F9.4,5(3X,'X(',I2,') =',1X,F10.4),/)
C
C     IMPRESSAO DAS CURVAS
C
      DO 530 I=1,NM
  530 ICURV(I)=0
      DO 540 I=1,NM
      ICURV(I)=1
      CALL PLOTER(TINT,TF,HI,CONT,ICURV,W,SPEC)
      ICURV(I)=0
  540 CONTINUE
      STOP
      END
      SUBROUTINE MONTA
      COMMON/MON/RS,RR,LS,LR,LM,RN,F
      COMMON/GER/A,B,AMP,DEF,PER
      DOUBLE PRECISION PER
      DIMENSION A(3,3),B(3)
      INTEGER F
      REAL LS,LR,LM
      PI=3.1415927
      OMEGA=2*PI*F
      XR=OMEGA*LR
      XMSR=OMEGA*LM
      SIGMA=LR*LS-LM*LM
      A(1,1)=-(RS*LR)/SIGMA
      A(1,2)=(LM*RR)/SIGMA
      A(1,3)=(RN*XR*LM)/SIGMA
      A(2,1)=(LM*RS)/SIGMA
      A(2,2)=-(LS*RR)/SIGMA
      A(2,3)=-(LS*RN*XR)/SIGMA
      A(3,1)=(RN*XMSR)/LR
      A(3,2)=(RN*XR)/LR
      A(3,3)=-RR/LR
      B(1)=LR/SIGMA
      B(2)=-LM/SIGMA
      B(3)=0.
      RETURN
      END
      SUBROUTINE SIAM4(CI,SPEC,TI,TF,TINT)
      COMMON/CAD/N,NM,IAL,X
      COMMON/ENT/U
      DIMENSION X(5,201),DER1(3),DER2(3),DER3(3),ELE1(3),ELE2(3)
      DOUBLE PRECISION TI,TF,SPEC,CI,DER1,DER2,DER3,ELE1,ELE2
      DOUBLE PRECISION TEMP,SIVAR,VAR,CUVAR,DER,H,TO,U,DEL
      DOUBLE PRECISION DELP,DELT,DH,DOUB,TINT,MULT
      DIMENSION TEMP(3),SIVAR(4),VAR(4),CUVAR(4),DER(4)
      MULT=1.0D0
      VAR(1)=TI
      DO 1 I=1,N
      DER1(I)=0.D0
      DER2(I)=0.D0
      DER3(I)=0.D0
    1 VAR(I+1)=DBLE(X(I,1))
```

```
      N1=N+1                                                         SIM02120
      N2=N+2                                                         SIM02130
      IJ=1                                                           SIM02140
      II=0                                                           SIM02150
 2    T=0.D0                                                         SIM02160
      IF(II)6,6,17                                                   SIM02170
C                                                                    SIM02180
C     GUARDAR CI                                                     SIM02190
C                                                                    SIM02200
 6    H=CI                                                           SIM02210
      TO=VAR(1)                                                      SIM02220
      MODE=1                                                         SIM02230
      II=1                                                           SIM02240
      DO 7 J=1,N1                                                    SIM02250
      CUVAR(J)=VAR(J)                                                SIM02260
 7    CONTINUE                                                       SIM02270
C                                                                    SIM02280
C     SECAO DE CALCULO                                               SIM02290
C                                                                    SIM02300
 8    CALL DERSUB(CUVAR,DER,MULT)                                    SIM02310
      IF(MODE.LE.1)GO TO 2                                           SIM02320
      DO 10 J=1,N1                                                   SIM02330
 10   VAR(J)=CUVAR(J)                                                SIM02340
      GO TO 14                                                       SIM02350
 11   IF(VAR(1).LT.TINT)GO TO 30                                     SIM02360
      IJ=IJ+1                                                        SIM02370
      DO 13 I=1,N                                                    SIM02380
 13   X(I,IJ)=VAR(I+1)                                               SIM02390
      X(N1,IJ)=U                                                     SIM02400
      X(N2,IJ)=-0.6236*X(1,IJ)*X(3,IJ)                               SIM02410
C                                                                    SIM02420
C     TESTE SE T = TF                                                SIM02430
C                                                                    SIM02440
 30   IF(VAR(1).LT.TF)GOTO2                                          SIM02450
      RETURN                                                         SIM02460
 14   IF(SPEC)15,11,15                                               SIM02470
 15   CEL=VAR(1)-TO                                                  SIM02480
      DELP=DEL*(1.+CI/10.)                                           SIM02490
      IF(DABS(DELP)-DABS(SPEC))17,16,16                              SIM02500
 16   TO=VAR(1)                                                      SIM02510
      GOTO11                                                         SIM02520
 17   II=1                                                           SIM02530
      IF(MODE-4)18,26,26                                             SIM02540
C                                                                    SIM02550
C RUNGE-KUTTA                                                        SIM02560
C                                                                    SIM02570
 18   DO19J=2,N1                                                     SIM02580
      DER3(J-1)=DER2(J-1)                                            SIM02590
      DER2(J-1)=DER1(J-1)                                            SIM02600
      DER1(J-1)=DER(J)                                               SIM02610
      ELE1(J-1)=DER(J)                                               SIM02620
      CUVAR(J)=T                                                     SIM02630
      DELT=0.4D0*ELE1(J-1)*H                                         SIM02640
      SIVAR(J)=VAR(J)                                                SIM02650
      CUVAR(J)=SIVAR(J)+DELT                                         SIM02660
```

```
19    CONTINUE                                                          SIM02670
      S1VAR(1)=VAR(1)                                                   SIM02680
      CUVAR(1)=S1VAR(1)+0.4D0*H                                         SIM02690
      CALLDERSUB(CUVAR,DER,MULT)                                        SIM02700
      CUVAR(1)=S1VAR(1)+0.45573725421879D0*H                            SIM02710
      DO21J=2,N1                                                        SIM02720
      ELE2(J-1)=DER(J)                                                  SIM02730
      DELT=(0.29697760924775D0*ELE1(J-1)+0.15875964497104D0*ELE2(J-1))*HSIM02740
      CUVAR(J)=VAR(J)+DELT                                              SIM02750
21    CONTINUE                                                          SIM02760
      CALLDERSUB(CUVAR,DER,MULT)                                        SIM02770
      CUVAR(1)=S1VAR(1)+H                                               SIM02780
      DO23J=2,N1                                                        SIM02790
      TEMP(J-1)=DER(J)                                                  SIM02800
      DELT=(0.21810038822592D0*ELE1(J-1)-3.05096514869290D0*ELE2(J-1)+  SIM02810
     13.83286476046700D0*TEMP(J-1))*H                                   SIM02820
      CUVAR(J)=S1VAR(J)+DELT                                            SIM02830
23    CONTINUE                                                          SIM02840
      CALLDERSUB(CUVAR,DER,MULT)                                        SIM02850
      DH=H                                                              SIM02860
      CUVAR(1)=VAR(1)+CH                                                SIM02870
      DO25J=2,N1                                                        SIM02880
      DOUB=(0.17476028226269D0*ELE1(J-1)-0.55148066287873D0*ELE2(J-1)+  SIM02890
     11.20553559939650D0*TEMP(J-1)+0.17118478121952D0*DER(J))           SIM02900
25    CONTINUE                                                          SIM02910
      MODE=MODE+1                                                       SIM02920
      GOTO8                                                             SIM02930
C                                                                       SIM02940
C ADAMS-MOULTON                                                         SIM02950
C ADAMS-BASHFORTH PREDITOR                                              SIM02960
C                                                                       SIM02970
26    CUVAR(1)=VAR(1)+H                                                 SIM02980
      DH=H/24.D0                                                        SIM02990
      DO27J=2,N1                                                        SIM03000
      DOUB=(55.0D0*DER(J)-59.0D0*DER1(J-1)+37.0D0*DER2(J-1)             SIM03010
     *-9.0D0*DER3(J-1))                                                 SIM03020
      CUVAR(J)=VAR(J)+CH*DOUB                                           SIM03030
27    CONTINUE                                                          SIM03040
      DO28J=1,N                                                         SIM03050
      DER3(J)=DER2(J)                                                   SIM03060
      DER2(J)=DER1(J)                                                   SIM03070
28    DER1(J)=DER(J+1)                                                  SIM03080
      CALLDERSUB(CUVAR,DER,MULT)                                        SIM03090
C                                                                       SIM03100
C     ADAMS-MOULTON CORRETOR                                            SIM03110
C                                                                       SIM03120
      DO29J=2,N1                                                        SIM03130
      TEMP(1)=CUVAR(J)                                                  SIM03140
      DOUB=(9.0D0*DER(J)+19.0D0*DER1(J-1)-5.0D0*DER2(J-1)+DER3(J-1))    SIM03150
      CUVAR(J)=VAR(J)+CH*DOUB                                           SIM03160
29    CONTINUE                                                          SIM03170
      GOTO8                                                             SIM03180
      END                                                               SIM03190
      SUBROUTINE DERSUB(CUVAR,DER,MULT)                                 SIM03200
      COMMON/DAD/N,NM,IAL,X                                             SIM03210
```

112

```
      COMMON/GER/A,B,AMP,DEF,PER                                        SIM03220
      COMMON/ENT/U                                                      SIM03230
      DIMENSION A(3,3),B(3),X(5,201)                                    SIM03240
      DIMENSION CUVAR(4),DER(4)                                         SIM03250
      DOUBLE PRECISION DER,CUVAR,TEP,U,PER,MULT                         SIM03260
      DO  50 I=1,N                                                      SIM03270
      DER(I+1)=0.D0                                                     SIM03280
      DO 10 J=1,N                                                       SIM03290
   10 DER(I+1)=DER(I+1)+DBLE(A(I,J))*CUVAR(J+1)                         SIM03300
C                                                                       SIM03310
C     ALIMENTACAO                                                       SIM03320
C                                                                       SIM03330
      IF(IAL.EQ.1)GO TO 30                                              SIM03340
      TEP=0.5D0*MULT*PER                                                SIM03360
      IF(CUVAR(1).LE.TEP)GOTO20
      MULT=MULT+1.0D0                                                   SIM03380
      AMP=-AMP                                                          SIM03390
   20 U=DBLE(AMP)                                                       SIM03400
      GO TO 40                                                          SIM03410
   30 U1=AMP*DSIN(PER*CUVAR(1)+DEF)                                     SIM03430
      U=DBLE(U1)                                                        SIM03450
   40 DER(I+1)=DER(I+1)+DBLE(B(I))*U                                    SIM03460
   50 CONTINUE                                                          SIM03470
      RETURN                                                            SIM03480
      END                                                               SIM03490
      SUBROUTINE PLOTER(XI,XF,HI,CONT,ICURV,W,DELTA)                    SIM03500
      COMMON/DAD/KN,NC,KIAL,FUN                                         SIM03510
      DIMENSION FUN(5,201),CONT(5,5),ICURV(5)                           SIM03520
      DOUBLE PRECISION XI,XF,HI,DELTA                                   SIM03530
      INTEGER A(110),W                                                  SIM03540
      INTEGERBRAN,PT,TV,II,SIG(5),AST                                   SIM03550
      DATABRAN,PT,TV,II/' ','.','-','I'/                                SIM03560
      DATASIG/'1','2','3','4','5'/                                      SIM03570
      NZ=0                                                              SIM03580
C                                                                       SIM03590
C FAZ CONSISTENCIA DOS DADOS                                            SIM03600
C                                                                       SIM03610
      IF((XI+XF+DELTA).NE.0D0)GOTO2                                     SIM03620
      WRITE(W,1)                                                        SIM03630
    1 FORMAT(18X,'FALTAM DADOS DOS LIMITES DE X NOS PARAMETROS DA PLOTERSIM03640
     1',/)                                                              SIM03650
      RETURN                                                            SIM03660
C                                                                       SIM03670
C GERACAO DO NUMERO DE PONTOS A SEREM PLOTADOS                          SIM03680
C                                                                       SIM03690
    2 NL=((XF-XI)/DELTA+1)                                              SIM03700
      XIS=XI                                                            SIM03710
C                                                                       SIM03720
C PESQUISA OS VALORES DE MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO                      SIM03730
C                                                                       SIM03740
      XMA=0.                                                            SIM03750
      XMI=0.                                                            SIM03760
      DO 20 N=1,NC                                                      SIM03770
      IF(ICURV(N).EQ.0)GOTO20                                           SIM03780
      DO420M=1,NL                                                       SIM03790
```

```
      AAA=FUN(N,M)                                                  SIM03800
      IF(AAA.GT.XMA)XMA=FUN(N,M)                                    SIM03810
      IF(AAA.LT.XMI)XMI=FUN(N,M)                                    SIM03820
420   CONTINUE                                                      SIM03830
20    CONTINUE                                                      SIM03840
      XMULT=(XMA-XMI)/108                                           SIM03850
      IF(XMULT.EQ.0.)RETURN                                         SIM03860
C                                                                   SIM03870
C POSICAO DO EIXO X=0                                               SIM03880
C                                                                   SIM03890
      IA=-XMI/XMULT+2                                               SIM03900
C                                                                   SIM03910
C IMPRESSAO DA ESCALA DE Y                                          SIM03920
C                                                                   SIM03930
      WRITE(W,95)                                                   SIM03940
95    FORMAT(T11,'ORDENADA',/,T11,'+',108('-'),'+')                 SIM03950
      DX=(XMA-XMI)/5                                                SIM03960
      T2=XMI+DX                                                     SIM03970
      T3=XMI+2*DX                                                   SIM03980
      T4=XMI+3*DX                                                   SIM03990
      T5=XMI+4*DX                                                   SIM04000
      IF(DX.LT.0.001.OR.ABS(XMI).GE.1.E6)GOTO54                     SIM04010
      IF(DX.LT.0.001.OR.ABS(XMA).GE.1.E6)GOTO54                     SIM04020
      WRITE(W,53)XMI,T2,T3,T4,T5,XMA                                SIM04030
53    FORMAT(T11,'-',F11.3,T24,F11.3,T47,F11.3,T69,F11.3,T91,F11.3,T109,SIM04040
     1F11.3,'-')                                                    SIM04050
      GOTO56                                                        SIM04060
54    WRITE(W,55)XMI,T2,T3,T4,T5,XMA                                SIM04070
55    FORMAT(T11,'-',E11.4,T24,E11.4,T47,E11.4,T69,E11.4,T91,E11.4,T109,SIM04080
     1E11.4,'-')                                                    SIM04090
56    WRITE(W,57)                                                   SIM04100
57    FORMAT(1X,'ABSCISSA',T11,'+',21('-'),'V',3(21('-'),'V'),20('-'),'+SIM04110
     1')                                                            SIM04120
C                                                                   SIM04130
C DETERMINA O TAMANHO DAS QUADRICULAS                               SIM04140
C                                                                   SIM04150
      IKH=11                                                        SIM04160
      IKV=7                                                         SIM04170
C                                                                   SIM04180
C FORMACAO E IMPRESSAO DAS CURVAS                                   SIM04190
C                                                                   SIM04200
      DO90M=1,NL                                                    SIM04210
      DO59N=1,110                                                   SIM04220
59    A(N)=BRAN                                                     SIM04230
      NZ=NZ+1                                                       SIM04240
      IF(NZ-IKV)70,60,70                                            SIM04250
60    DO62N=1,110,2                                                 SIM04260
62    A(N)=PT                                                       SIM04270
      NZ=0                                                          SIM04280
      GOTO73                                                        SIM04290
70    DO72N=1,110,IKH                                               SIM04300
72    A(N)=PT                                                       SIM04310
73    A(1)=TV                                                       SIM04320
      A(110)=TV                                                     SIM04330
      A(IA)=II                                                      SIM04340
```

```
C                                                                       SIM04350
C DETERMINA NOVOS PONTOS DA CURVA JA ENQUADRADOS                         SIM04360
C                                                                       SIM04370
      DO75N=1,NC                                                        SIM04380
      IF(ICURV(N).EQ.0)GOTO75                                           SIM04390
      LF=IFIX((FUN(N,M)-XMI)/XMULT+2)                                   SIM04400
      A(LF)=SIG(N)                                                      SIM04410
75    CONTINUE                                                          SIM04420
C                                                                       SIM04430
C IMPRESSAO DA CURVA                                                    SIM04440
C                                                                       SIM04450
      WRITE(W,83)XIS,A                                                  SIM04460
83    FORMAT(1X,F9.3,T11,110A1)                                         SIM04470
      XIS=XIS+DELTA                                                     SIM04480
90    CONTINUE                                                          SIM04490
C                                                                       SIM04500
C IMPRIME FINAL                                                         SIM04510
C                                                                       SIM04520
      WRITE(W,96)                                                       SIM04530
96    FORMAT(T11,'+',21('-'),'+',3(21('-'),'+'),20('-'),'+')            SIM04540
      WRITE(W,98)(SIG(N),(CONT(N,M),M=1,5),N=1,NC)                      SIM04550
98    FORMAT(T11,'-',4(A1,'-',5A4,4X),T120,'-',/,T11,'-',4(A1,'-',5A4,4XSIM04560
     1),T120,'-',/,T11,'-',4(A1,'-',5A4,4X),T120,'-',/,T11,'-',4(A1,'-',SIM04570
     25A4,4X),T120,'-')                                                 SIM04580
      WRITE(W,99)                                                       SIM04590
99    FORMAT(T11,'+',108('-'),'+')                                      SIM04600
      RETURN                                                            SIM04610
      END                                                               SIM04620
$ENTRY                                                                  SIM04630
3560.CDO                                                                SIM04640
 0.00       1.000                                                       SIM04650
  2                                                                     SIM04660
CORRENTE ESTATOR                                                        SIM04670
CORRENTE ROTOR D                                                        SIM04680
CORRENTE ROTOR Q                                                        SIM04690
TENSAO ALIMENTACAO                                                      SIM04700
TORQUE                                                                  SIM04710
     0.0       0.0       0.0       0.0       0.0                        SIM04720
     3.448     3.564     0.3267    0.3267    0.3118 0.0000000           SIM04730
1                                                                       SIM04740
  244.35  0.                                                            SIM04750
$STOP
/*                                                                      STA21740
//                                                                      STA21750
```

REFERÊNCIAS

1 - BARBI, I. - Conversão Eletromecânica de Energia. Publicações internas. UFSC. 1981.

2 - DEL TORO, V. - Electromechanical Devices for Energy Conversion and Control Sistems, Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice-Hall, Inc. 1968 pp. 361/90.

3 - JEVONS, M. - Electrical Machine Teory. Glasgow London. Blakie. 1966.