

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

CONTROLE DE TORQUE E VELOCIDADE DO MOTOR MONOFÁSICO DE
INDUÇÃO ALIMENTADO EM CORRENTE, SOB FREQUÊNCIA VARIÁVEL

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


JOÃO BATISTA VIEIRA JÚNIOR

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO 1984

CONTROLE DE TORQUE E VELOCIDADE DO MOTOR MONOFÁSICO DE
INDUÇÃO ALIMENTADO EM CORRENTE, SOB FREQUÊNCIA VARIÁVEL

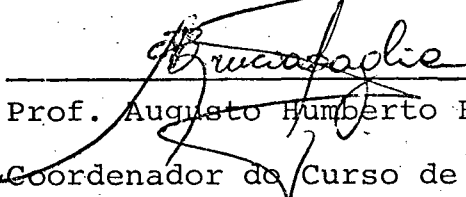
JOÃO BATISTA VIEIRA JÚNIOR

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




Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

ORIENTADOR

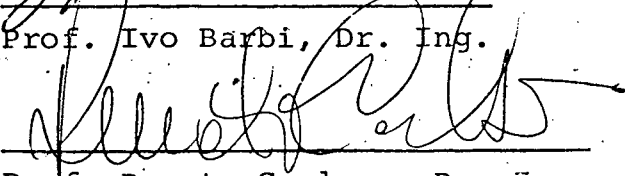


Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr. Ing.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em En
genharia Elétrica

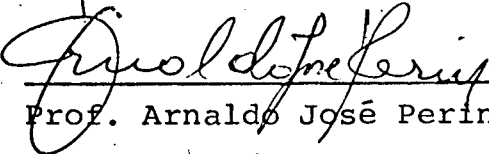
BANCA EXAMINADORA:



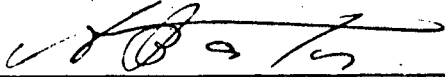
Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.



Prof. Renato Carlson, Dr. Ing.



Prof. Arnaldo José Perin, Dr. Ing.



Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr. de Estado

À minha esposa Lilian
Aos meus filhos Flávio,
Ticiane e Guilherme

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Ivo Barbi pela orientação, e principalmente pela dedicação e amizade que muito contribuiu no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação e do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC que, de uma forma ou de outra, auxiliaram para a realização deste trabalho.

À Fundação Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa CAPES pelo apoio financeiro.

À minha esposa Lilian, meus filhos Flávio, Ticiane e Guilherme e a meus pais João e Luiza pelo incentivo e contribuição.

Aos componentes da banca examinadora, Professores Renato Carlson, Arnaldo José Perin e João Pedro Assumpção Bastos, pela boa vontade, sugestões e incentivo.

R E S U M O

Este trabalho trata do estudo do comportamento do motor monofásico de indução alimentado por fonte de corrente e frequência variáveis, com o objetivo de eliminar os problemas de estabilidade através do controle do torque médio.

Trata também do estudo do controle de velocidade através da variação da frequência da corrente rotórica.

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

São mostrados os circuitos desenvolvidos para o controle de torque médio e velocidade.

Todos os resultados teóricos são comparados experimentalmente, com o emprego de um protótipo de laboratório.

A B S T R A T

This work studies the behavior of the single-phase induction motor fed by a current source and variable frequencies with the objective of eliminating the problems stability through the control of the mean torque.

It is also concerned with the study the speed control through frequency changes of the rotor current.

Models for the study of the steady state and transient behavior of the motor are presented, as well as computer programs to analyze the behavior with the models.

The circuits developed for the control of the mean torque and speed are shown.

All the theoretical results are experimentally verified by means of a laboratory prototype.

S I M B O L O G I A

- D - constante de atrito
- F - freqüência da corrente de alimentação do motor
- Fr - freqüência da corrente do rotor
- Fs - freqüência síncrona
- Ic - corrente na carga do gerador cc
- Is - corrente do estator (valor eficaz)
- J - momento de inércia
- K - constante do sistema que mede a velocidade no eixo
- K',K'' - constantes do circuito de controle do torque médio
- K₁ - constante do torque de carga em relação à velocidade do motor
- K₂ - constante do torque de carga em relação à corrente da armadura do gerador cc
- K₃ - constante da tensão da armadura, do gerador cc, em rela

ção à sua corrente

- K_4 - constante do torque médio em relação à frequência da corrente do rotor
- K_t - constante do torque médio em relação à pulsação da corrente do rotor
- L_r - indutância cíclica do rotor
- L_s - indutância cíclica do estator
- m - constante relativa de amortecimento
- msr - indutância mútua cíclica estator-rotor
- n - número de pares de polos
- n_1 - relação entre velocidade mecânica e velocidade síncrona
- R_a - resistência da armadura da máquina de corrente contínua
- R_r - resistência do rotor
- R_s - resistência do estator
- T_a - torque de atrito
- T_e - torque no eixo

- T_j - torque de inércia
- T_l - torque de carga
- T_m - torque do motor
- $|V_s|$ - módulo da tensão do estator
- X_{msr} - reatância de magnetização
- X_r - reatância cíclica do rotor
- X_s - reatância cíclica do estator
- α - inclinação das curvas $|V_s| \times F$
- β - inclinação das curvas $F_x |V_s|$
- ω - pulsação da corrente de alimentação do motor
- ω_0 - pulsação natural
- ω_m - velocidade mecânica
- ω_r - pulsação da corrente no rotor
- ω_s - velocidade síncrona

S U M Á R I O

SIMBOLOGIA	VII
INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO	
1.1 - Introdução	03
1.2 - Problemas	03
1.3 - Soluções	05
CAPÍTULO 2 - ESTUDO DO CONTROLE DO TORQUE MÉDIO DO MOTOR ATRAVÉS DO CONTROLE DA FREQUÊNCIA DA CORRENTE DO ROTOR	
2.1 - Introdução	08
2.2 - Equação do Torque Médio em Função da Frequência da Corrente Rotórica (Fr)	08
2.3 - Obtenção Teórica das Características do Motor Utili- zado	22
2.4 - Obtenção Experimental das Características TxFr do Mo- tor Utilizado	26
2.5 - Controle do Torque através do Controle da Frequência da Corrente do Rotor (Fr)	32
2.6 - Comportamento Dinâmico na Região de Baixo Escorrega- mento com Fr Imposta	37

2.7 - Conclusões 54

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DO CONTROLE DO TORQUE MÉDIO DO MOTOR
 ATRAVÉS DO CONTROLE DO MÓDULO DA TENSÃO DO
 ESTATOR

3.1 - Introdução 56

3.2 - Estudo do Torque Médio em Função do Módulo da Tensão
 do Estator 57

3.3 - Obtenção Teórica das Características do Motor Utili-
 zado 67

3.4 - Estudo Experimental de $|V_s| \times I_r$, para Torque Variável. 78

3.5 - Modelo Simplificado para Controle do Torque Médio a
 través do Módulo da Tensão do Estator 80

3.6 - Implementação do Circuito de Controle do Torque Médio
 através do Módulo da Tensão do Estator 85

3.7 - Estudo Experimental do Comportamento Dinâmico do Mo-
 tor, com Controle do Torque Médio através do Módulo
 da Tensão do Estator 88

3.8 - Conclusões 93

CAPÍTULO 4 - ESTUDO DO CONTROLE DE VELOCIDADE

4.1 - Introdução 95

4.2 - Diagrama de Blocos 95

4.3 - Modelagem 99

4.4 - Circuito de Controle de Velocidade 103

4.5 - Estudo Experimental	108
4.6 - Resultados	112
4.7 - Conclusões	114
CONCLUSÕES	115
APÊNDICE A	117
APÊNDICE B	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

I N T R O D U Ç Ã O

Geralmente quando se deseja trabalhar com motor com velocidade variável utiliza-se o motor de corrente contínua, devido a sua facilidade de controle.

Entretanto, alguns inconvenientes tais como, manutenção freqüente, vida útil curta, incapacidade de operar com velocidades, correntes e potências elevadas, inadequação a atmosferas empoeiradas e explosivas fazem com que o emprego do motor de corrente contínua seja limitado.

Nestes casos em que o motor de corrente contínua não é viável, tem-se empregado o motor trifásico de indução alimentado com freqüência variável. É um motor mais robusto que apresenta comportamento análogo ao do motor de corrente contínua, sem os inconvenientes acima citados, principalmente operação sem faiscamento. Porém, exige comandos muito mais complexos a nível de estrutura de conversor estático de potência e circuitos auxiliares.

Quando se trata de pequenas potências o custo dos conversores estáticos torna-se muito mais elevado do que o custo do motor.

Assim, para pequenas potências surge o motor monofásico de indução como outra opção para controle de velocidade, pois este apresenta menor complexidade de comando e menor custo da montagem.

No estudo "Motor Monofásico de Indução Alimentado em Corrente sob Freqüência Variável", desenvolvido no LAMEP (Laboratório de Máquinas Elétricas e Eletrônica de Potência) da UFSC, ve

rificou-se que o comportamento da estrutura associada ao motor teve um ótimo resultado comparando-se os valores experimentais com os obtidos analiticamente.

Porém, no estudo do motor monofásico de indução alimentado em corrente, sob frequência variável nota-se que o sistema apresenta problemas de estabilidade, ocasionando a parada do motor.

Com o intuito de solucionar estes problemas de estabilidade presentes no estudo citado anteriormente, foi proposto pelo LAMEP da UFSC o estudo do controle do torque médio e da velocidade do motor de indução.

Partindo deste princípio, neste trabalho são apresentados inicialmente os problemas que deverão ser solucionados.

Depois é feito, teórica e experimentalmente, o estudo do controle do torque médio através do controle da frequência da corrente do rotor, que é o método clássico para este tipo de controle em motor trifásico de indução.

Posteriormente é feito, teórica e experimentalmente, o estudo do controle do torque médio através do módulo da tensão do estator.

E, finalmente é feito, também teórica e experimentalmente, o estudo do controle de velocidade através da variação da frequência da corrente do rotor.

C A P Í T U L O I

APRESENTAÇÃO

1.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar os problemas de estabilidade existentes na montagem atual [2], sobre os quais está centrado este trabalho.

1.2 - PROBLEMAS

Os problemas existentes, como já foi citado, são relacionados à estabilidade do conjunto motor-inversor. Eles acontecem tanto durante a aceleração do motor, quanto durante um transitório de carga.

Para maior facilidade de entendimento e visualização destes problemas as explicações serão particularizadas.

Os problemas de estabilidade que acontecem no presente caso, podem ser visualizados através das Figuras (1.1).

Primeiramente, será apresentado o que ocorre durante a aceleração, após este será feita a apresentação do que ocorre no transitório de carga.

1.2.1 - ACELERAÇÃO

Quando o aumento de velocidade é efetuado de maneira lenta não acontece nenhum distúrbio, o conjunto funciona nor

malmente, mas quando se deseja aumentar rapidamente a velocidade, aparecem alguns inconvenientes graves que são os seguintes:

- a) Quando se muda bruscamente a frequência de alimentação do motor (F) de, por exemplo, 10 Hz para 60 Hz, o funcionamento do motor tende à passar de curva 1 para a 6 (Figura 1.1);
- b) Como, no presente caso, o transitório elétrico é muito mais rápido que o mecânico, podendo no limite ser considerado instantaneamente, o motor passa de uma curva de operação para a outra instantaneamente, enquanto que, a carga leva um determinado intervalo de tempo para variar sua curva;
- c) Então, o sistema não consegue se ajustar à nova condição imposta, porque, no presente exemplo, enquanto o motor já se encontra operando na curva 6 a carga ainda se encontra no mesmo ponto da curva de carga, o que conduz o ponto de operação do sistema motor carga para a região de instabilidade de curva de funcionamento do motor, o que ocasiona a sua parada.

1.2.1 - TRANSITÓRIO DE CARGA

Quando o transitório de carga é de pequenas dimensões, por exemplo, o conjunto motor-carga se encontra operando nas curvas 6 e TC6 e a carga tem um transitório que a leve para a curva TC5, o conjunto não apresenta distúrbios no funcionamento, mas se o que acontece é um transitório de carga de dimensões consideráveis estarão presentes alguns inconvenientes graves, que são descritos na exposição à seguir.

Se o sistema se encontra operando, como citado no exemplo acima, nas curvas 6 e TC6, e acontece um transitório de

carga que faz, por exemplo, a carga passar a operar na curva de carga TC3, como a frequência de alimentação do motor é imposta manualmente o motor continua operando na curva 6, portanto, o conjunto motor-carga, passa a operar na região de instabilidade da curva de funcionamento do motor, o que ocasiona a sua parada.

1.3 - SOLUÇÕES

O estudo e a apresentação das soluções para estes problemas serão apresentados nos capítulos seguintes.

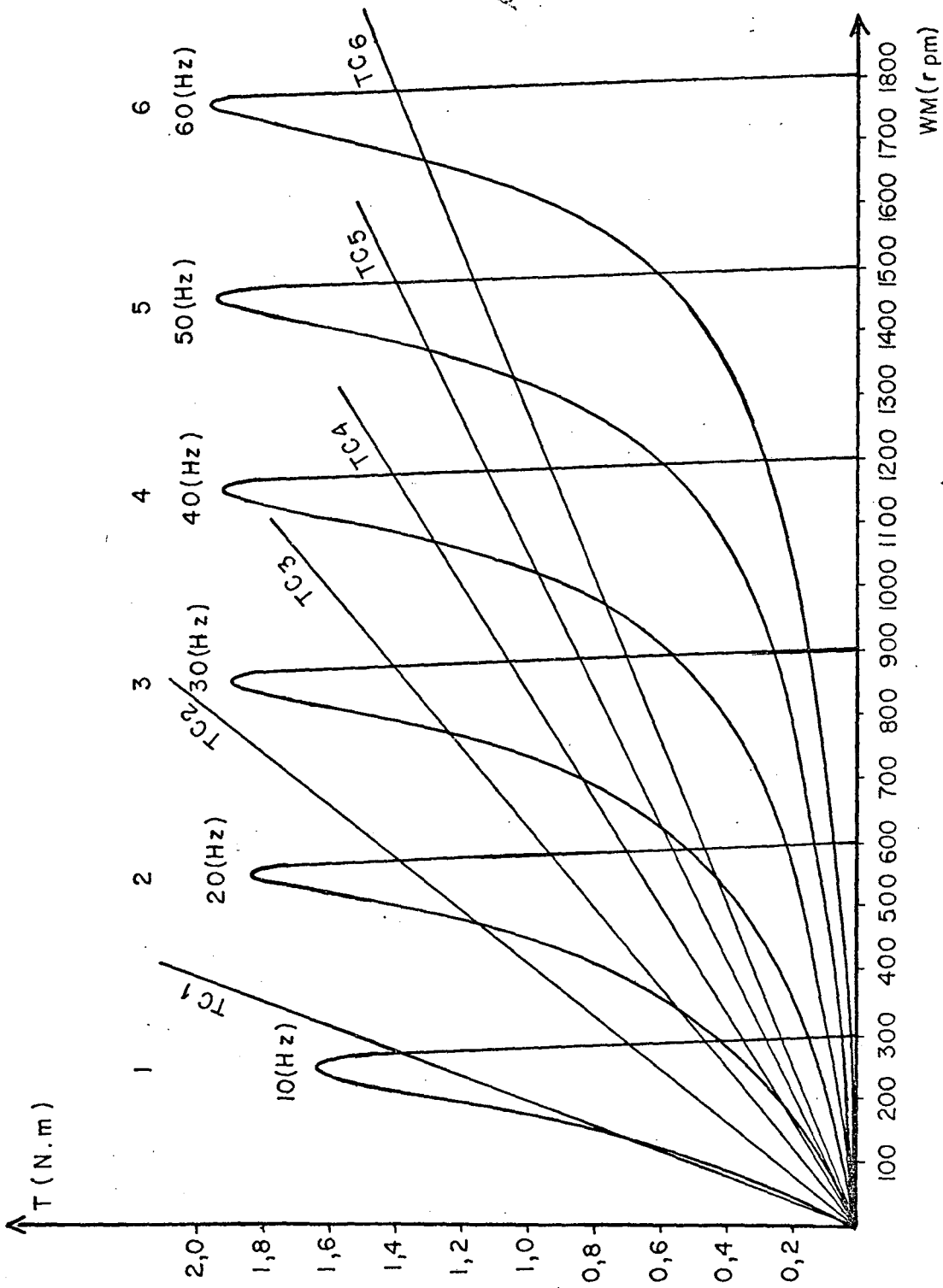


Figura 1.1-a - Curvas $T_{x_{m}}$, para Freqüência de Alimentação (F) variável, para $I_s = 4,5 A$.

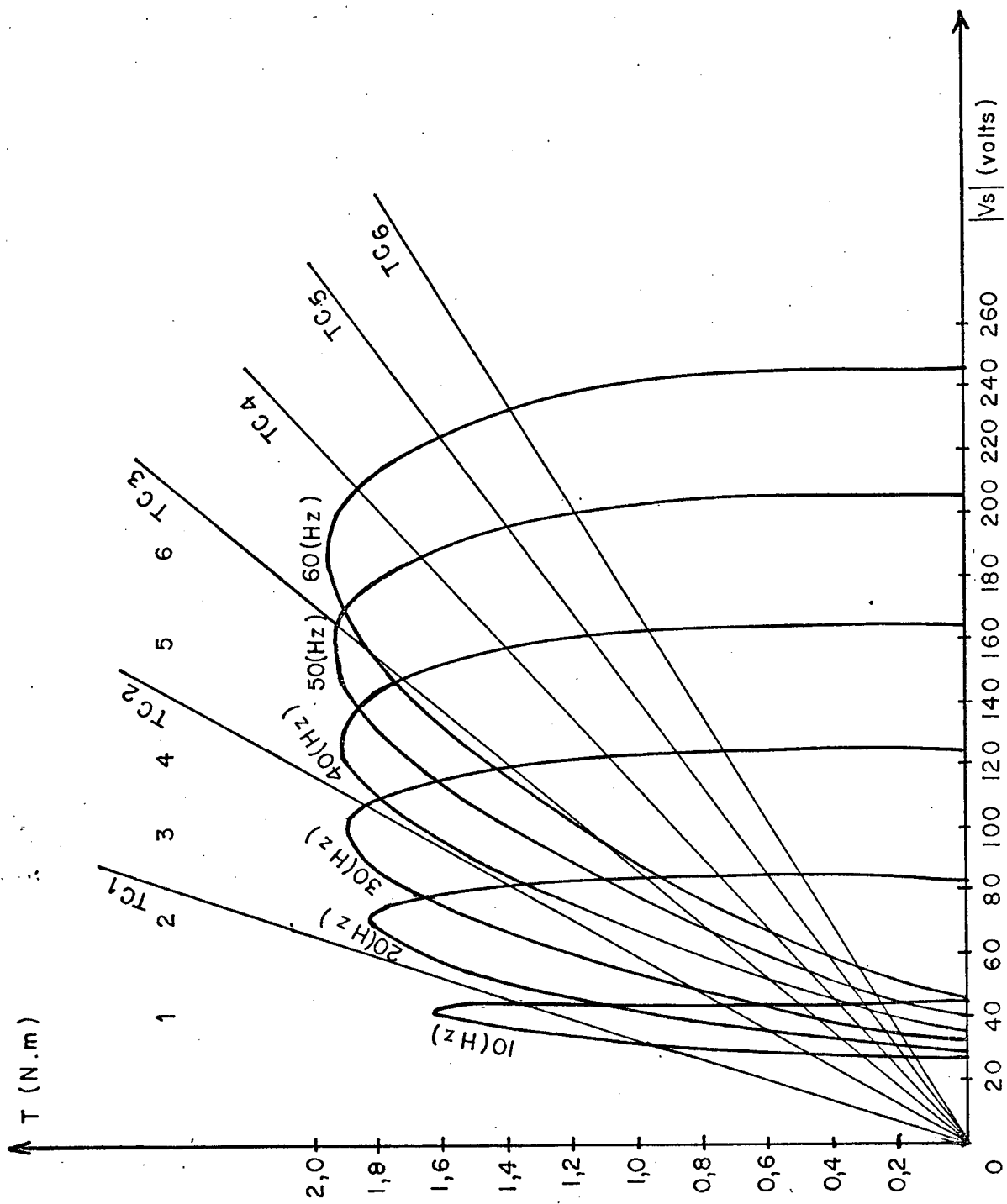


Figura 1.1-b - Curvas $T_x |V_s|$, para Freqüência de Alimentação (F) variável, para $I_s = 4,5$ A.

C A P Í T U L O I I

ESTUDO DO CONTROLE DO TORQUE MÉDIO DO MOTOR ATRAVÉS DO CONTROLE DA FREQUÊNCIA DA CORRENTE DO ROTOR

2.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo obter a partir da equação do torque médio em função da velocidade [2], a equação do torque médio em função da frequência da corrente do rotor.

Obter as características T_{xFr} , do motor utilizado, através desta equação.

Obter a equação do torque médio, em função da frequência da corrente do rotor, de maneira mais simples possível, para que possa ser implementada.

Obter as características T_{xFr} , do motor utilizado, experimentalmente.

Fazer o controle do torque médio, através do controle da frequência da corrente do rotor.

Fazer um estudo teórico e prático do comportamento dinâmico do motor com controle do torque médio através de Fr .

2.2 - EQUAÇÃO DO TORQUE MÉDIO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DA CORRENTE ROTÓRICA (Fr)

De [2] obtém-se a seguinte equação do torque médio:

$$T = - \frac{2 n X_{msr}^2 I_s^2}{3\omega} \left\{ \begin{array}{l} R_r X_r^2 (R_r^2 + X_r^2) n_1^3 + R_r (R_r^4 - X_r^4) n_1 \\ X_r^4 (R_r^2 + X_r^2) n_1^4 + 2 X_r^2 (R_r^4 - X_r^4) n_1^2 + R_r^4 (R_r^2 + 3X_r^2) + X_r^4 (3R_r^2 + X_r^2) \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Onde:

n = número de pares de polos

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

$\omega_s = \frac{120}{\text{número de polos}} \times F$

ω_m = velocidade mecânica

ω_s = velocidade de sincronismo

ω = pulsação da corrente de alimentação

I_s = corrente de alimentação do estator, eixo direto, para regime permanente, alimentação senoidal (valor eficaz)

R_r = resistência do rotor

X_r = reatância cíclica do rotor

X_{msr} = reatância de magnetização

T = torque médio.

Mas, por definição, sabe-se que:

$$X_{msr} = \omega \times m_{sr} \quad (2.2)$$

$$X_r = \omega \times L_r \quad (2.3)$$

Substituindo as equações (2.2) e (2.3) na equação (2.1) obtém-se a equação (2.4).

$$T = -\frac{2}{3} \frac{n \omega^2 m s r^2 I s^2}{\omega} \left\{ \begin{array}{l} Rr \omega^2 Lr^2 (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) n_1^3 + Rr (Rr^4 - \omega^4 Lr^4) n_1 \\ \omega^4 Lr^4 (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) n_1^4 + 2 \omega^2 Lr^2 (Rr^4 - \omega^4 Lr^4) n_1^2 + Rr^4 (Rr^2 + 3 \omega^2 Lr^2) + \omega^4 Lr^4 (3Rr^2 + \omega^2 Lr^2) \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Efetuando as devidas simplificações na equação (2.4) obtem-se a equação (2.5):

$$T = -\frac{2}{3} \frac{n m s r^2 I s^2}{\omega} \left\{ \frac{Rr Lr^2 (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) n_1^3 + \frac{Rr}{\omega^2} (Rr^4 - \omega^4 Lr^4) n_1}{Lr^4 (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) n_1^4 + \frac{2Lr^2}{\omega^2} (Rr^4 - \omega^4 Lr^4) n_1^2 + \left(\frac{Rr}{\omega} \right)^4 (Rr^2 + 3\omega^2 Lr^2) + Lr^4 (3Rr^2 + \omega^2 Lr^2)} \right\}$$

(2.5)

Mas, por definição, tem-se que:

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

$$e \ n\omega_m = n\omega_s - \omega_r$$

$$\omega_m = \omega_s - \frac{\omega_r}{n}$$

Onde:

ω_r = pulsação da corrente no rotor

$$\text{portanto, } n_1 = \frac{\omega_s - \omega_r/n}{\omega_s}$$

$$n_1 = 1 - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \tag{2.6}$$

Substituindo a equação (2.6) na equação (2.5) obtém-se a equação (2.7), que é a primeira equação procurada.

$$T = -\frac{2}{3} \frac{n m s r^2}{\omega} I s^2 \left\{ \begin{array}{l} Rr Lr^2 (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) \\ Lr^4, (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) \end{array} \left[\begin{array}{l} \left(\frac{1 - \omega r}{n \omega s} \right)^3 + \frac{Rr}{\omega^2} (Rr^4 - \omega^4 Lr^4) \left(\frac{1 - \omega r}{n \omega s} \right) \\ \left(\frac{1 - \omega r}{n \omega s} \right)^4 + \frac{2Lr^2 (Rr^4 - \omega^4 Lr^4)}{\omega^2} \left(\frac{1 - \omega r}{n \omega s} \right) \left(\frac{1 - \omega r}{n \omega s} \right)^2 + \left(\frac{Rr}{n \omega s} \right) \left(\frac{\omega}{\omega} \right) \end{array} \right] \right\} (Rr^2 + 3 \omega^2 Lr^2) + Lr^4 (3Rr^2 + \omega^2 Lr^2)$$

(2.7)

A equação (2.7) possui alguns termos que são muito pequenos, devido à grandeza dos parâmetros do motor, portanto, pode-se simplificá-los do seguinte modo:

$$\frac{R_r}{\omega} < 1 \quad \left(\frac{R_r}{\omega} \right)^4 \ll 1, \text{ portanto,}$$

$$\left(\frac{R_r}{\omega} \right)^4 (R_r^2 + 3 \omega^2 L_r^2) \approx 0$$

$$R_r < \omega L_r \quad R_r^4 \ll \omega^4 L_r^4$$

Portanto, a equação (2.7) é transformada na (2.8).

$$T = - \frac{2}{3} \frac{n m s r^2 I_s^2}{\omega} \left\{ \frac{R_r L_r^2 (R_r^2 + \omega^2 L_r^2) \left(1 - \frac{\omega r}{n \omega s} \right)^3 - \frac{R_r}{\omega^2} \omega^4 L_r^4 \left(1 - \frac{\omega r}{n \omega s} \right)}{L_r^4 (R_r^2 + \omega^2 L_r^2) \left(1 - \frac{\omega r}{n \omega s} \right)^4 - \frac{2 L_r^2}{\omega^2} \omega^4 L_r^4 \left(1 - \frac{\omega r}{n \omega s} \right) + L_r^4 (3 R_r^2 + \omega^2 L_r^2)} \right\}$$

(2.8)

$$\text{Mas} \quad \omega = n \omega s$$

$$\begin{aligned}
 T = & - \frac{2}{3} \frac{n \text{msr}^2 \text{Is}^2}{n\omega s} \left\{ \begin{aligned} & \text{Rr Lr}^2 (\text{Rr} + n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2) \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right)^3 - \text{Rr} n^2 \omega s^2 \text{Lr}^4 \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right)^2 \\ & \text{Lr}^4 (\text{Rr}^2 + n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2) \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right)^4 - 2n^2 \omega s^2 \text{Lr}^6 \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right)^2 + \text{Lr}^4 (3\text{Rr}^2 + n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2) \end{aligned} \right\} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T = & - \frac{2}{3} \frac{n \text{msr}^2 \text{Is}^2}{\omega s} \frac{\text{Rr}}{\text{Lr}^2} \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right) \left\{ \begin{aligned} & (\text{Rr}^2 + n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2) \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right)^2 - n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2 \\ & (\text{Rr}^2 + n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2) \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right)^4 - 2n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2 \left(1 - \frac{\omega \text{r}}{n\omega s} \right)^2 + 3\text{Rr}^2 + n^2 \omega s^2 \text{Lr}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

Fazendo

$$A = (Rr^2 + n^2\omega s^2 Lr^2) \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^2 - n^2\omega s^2 Lr^2 \quad (2.11)$$

$$B = (Rr^2 + n^2\omega s^2 Lr^2) \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^4 - 2n^2\omega s^2 Lr^2 \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^2 \quad (2.12)$$

$$C = B + 3Rr^2 + n^2\omega s^2 Lr^2 \quad (2.13)$$

Na equação (2.10), ela se transforma na equação (2.14).

$$T = - \frac{2}{3} \frac{msr^2}{\omega s} \frac{Is^2}{Lr^2} \frac{Rr}{\left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)} \frac{A}{C} \quad (2.14)$$

Desenvolvendo a equação (2.11) obtem-se as seguintes equações:

$$A = (Rr^2 + n^2\omega s^2 Lr^2) \left(1 - \frac{2\omega r}{n\omega s} + \frac{\omega r^2}{n^2\omega s^2}\right) - n^2\omega s^2 Lr^2 \quad (2.15)$$

$$A = Rr^2 \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^2 + \omega r Lr^2 (\omega r - 2n\omega s) \quad (2.16)$$

Desenvolvendo a equação (2.12) obtem-se as seguintes equações:

$$B = \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 \left\{ (Rr^2 + n^2\omega s^2 Lr^2) \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 - 2n^2\omega s^2 Lr^2 \right\} \quad (2.17)$$

$$B = \left(1 - \frac{2\omega r}{n\omega s} + \frac{\omega r^2}{n^2\omega s^2} \right) \left\{ (Rr^2 + n^2\omega s^2 Lr^2) \left(1 - \frac{2\omega r}{n\omega s} + \frac{\omega r^2}{n^2\omega s^2} \right) - 2n^2\omega s^2 Lr^2 \right\} \quad (2.18)$$

$$B = Rr^2 \left(1 - \frac{4\omega r}{n\omega s} + \frac{6\omega r^2}{2\omega^2} \right) + \frac{4\omega r^2 Lr^2 - 4\omega r^3 Lr^2 + \frac{\omega r^4}{n^2\omega s^2} Lr^2 - n^2\omega s^2 Lr^2}{n\omega s} \quad (2.19)$$

Desenvolvendo a equação (2.13) obtem-se as seguintes equações:

$$C = Rr^2 \left(1 - \frac{4\omega r}{n\omega s} + \frac{6\omega r^2}{n^2\omega s^2} \right) + \frac{4\omega r^2 Lr^2 - 4\omega r^3 Lr^2 + \frac{\omega r^4}{n^2\omega s^2} Lr^2 - n^2\omega s^2 Lr^2 + 3Rr^2 + n^2\omega s^2 Lr^2}{n\omega s} \quad (2.20)$$

$$C = Rr^2 \left(2 - \frac{\omega r}{\omega s} \right)^2 + \frac{\omega r^2}{n^2\omega s^2} \left(5Rr^2 + (2n\omega s - \omega r)^2 Lr^2 \right) \quad (2.21)$$

Substituindo as equações (2.21) e (2.16) na equação (2.14) obtem-se a equação (2.22).

$$T = -2 \frac{msr^2}{\omega s} \frac{Ir}{Lr^2} \left(1 - \frac{\omega r}{\omega s} \right) \left[\frac{Rr^2 \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 + \omega r Lr^2 (\omega r - 2n\omega s)}{Rr^2 \left(2 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 + \frac{\omega r^2}{n^2 \omega s^2}} \left(5Rr^2 + (2n\omega s - \omega r)^2 Lr^2 \right) \right] \quad (2.22)$$

A equação (2.22) é válida para toda a curva de funcionamento do motor, no entanto, na região de funcionamento estável (baixo escorregamento), pode-se considerar $\omega_r \approx 0$, e isto conduz às seguintes simplificações:

$$1 - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \approx 1 \quad (2.23)$$

$$2 - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \approx 2 \quad (2.24)$$

Substituindo as equações (2.23) e (2.24) na equação (2.22) tem-se a equação (2.25).

$$T = - \frac{2}{3} \frac{m s r^2 I_s^2}{\omega_s} \frac{R_r}{L_r^2} \left\{ \frac{R_r^2 + \omega_r L_r^2 (\omega_r - 2n\omega_s)}{4R_r^2} \right\} \quad (2.25)$$

Pelo mesmo motivo anterior pode-se simplificar também o seguinte:

$$-2n\omega_s + \omega_r \approx -2n\omega_s \quad (2.26)$$

Substituindo a equação (2.26) na equação (2.25) tem-se a equação (2.27).

$$T = - \frac{2}{3} \frac{m s r^2 I_s^2}{4R_r^2} \frac{R_r}{L_r^2} \left\{ \frac{R_r^2}{\omega_s} - \frac{2n\omega_s \omega_r L_r^2}{\omega_s} \right\} \quad (2.27)$$

Portanto,

$$T = \frac{1}{6} \frac{m s r^2}{R_r L_r^2} I_s^2 \left\{ (2n L_r^2) \omega_r - \frac{R_r^2}{\omega_s} \right\} \quad (2.28)$$

A equação (2.28) relaciona o torque médio com a frequência da corrente do rotor de maneira bastante simples, porém, ainda existe a presença da frequência de alimentação. Mas, como foi dito anteriormente, devido à grandeza dos parâmetros do motor:

$$R_r^2 \ll \omega_s$$

$$\frac{R_r^2}{\omega_s} \approx 0 \quad (2.29)$$

$$\omega_s$$

Portanto, substituindo a equação (2.29) na equação (2.28) tem-se a equação (2.30):

$$T = \frac{1}{3} \frac{n m s r^2}{R_r} I_s^2 \omega_r \quad (2.30)$$

A equação (2.30) é a equação do torque médio em função de frequência da corrente no rotor (F_r), a que se desejava chegar, devido à sua simplicidade para implementação.

2.3 - OBTENÇÃO TEÓRICA DAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR UTILIZADO

As curvas das figuras (2.1), (2.2) e (2.3), foram traçadas utilizando-se as equações (2.7), (2.28) e (2.30), respectivamente; para um motor monofásico de indução com os seguintes dados de placa:

Potência = 0,5 CV

Tensão de Alimentação = 220/110V

Corrente Nominal = 4,5/9A

Frequência de Alimentação = 60Hz

Isolação Classe = A

Velocidade Nominal = 1.725 rpm

Fator de Serviço = 1,25

Categoria = N

Através dos dados de placa o motor apresenta:

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

$\phi_{snom} = 0,5835 \text{ wb}$

Os parâmetros desse motor, já determinados [3], são:

$R_s = 3,448 \ \Omega$

$R_r = 3,564 \ \Omega$

$L_s = L_r = 0,3267 \text{ Henry}$

$M_{sr} = 0,3118 \text{ Henry}$

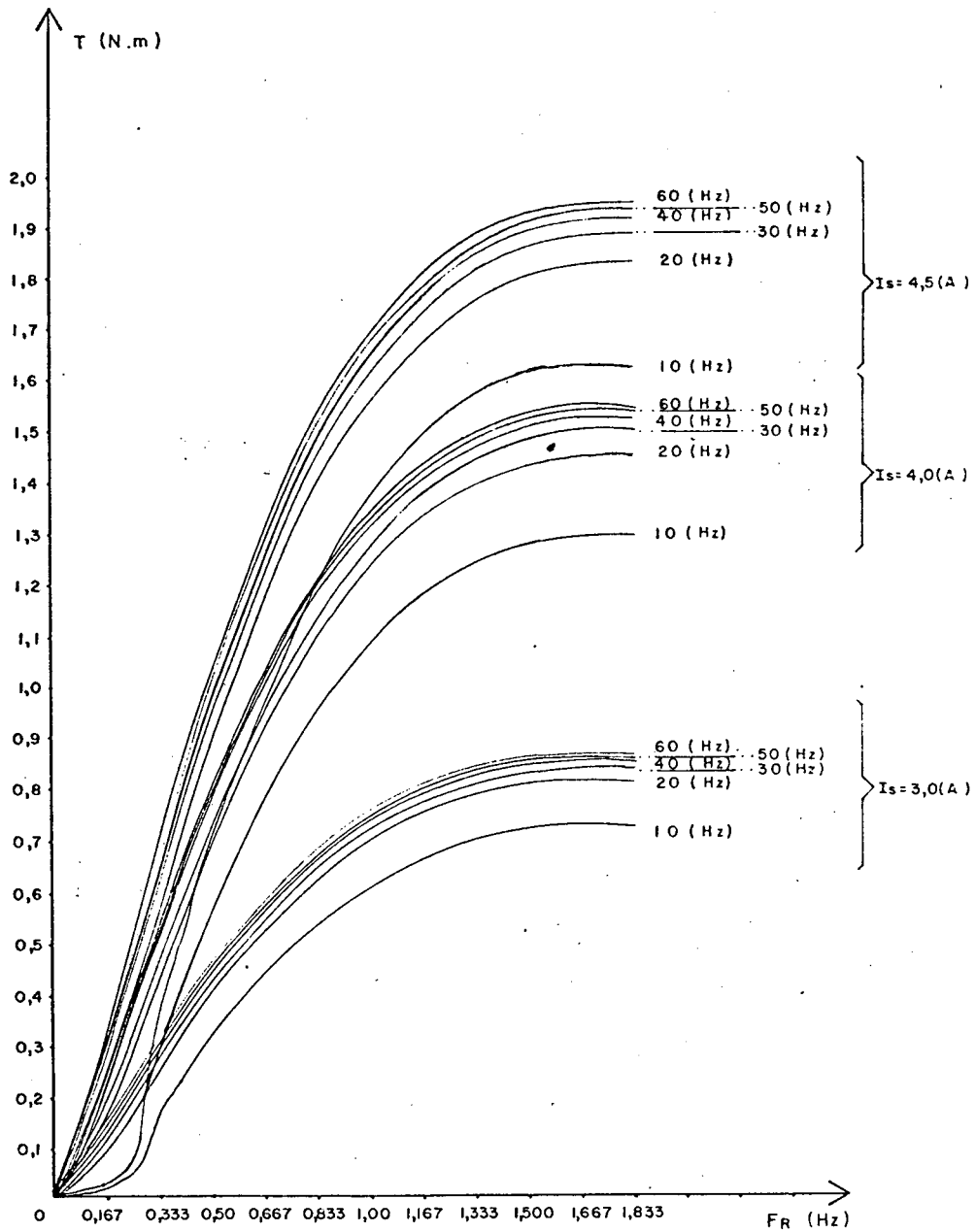


Figura 2.1 - Curvas $T \times F_R$ para Frequência de Alimentação (F) Variável, para $I_s = 3,0 A$, $I_s = 4,0 A$ e $I_s = 4,5 A$. Equação (2.7).

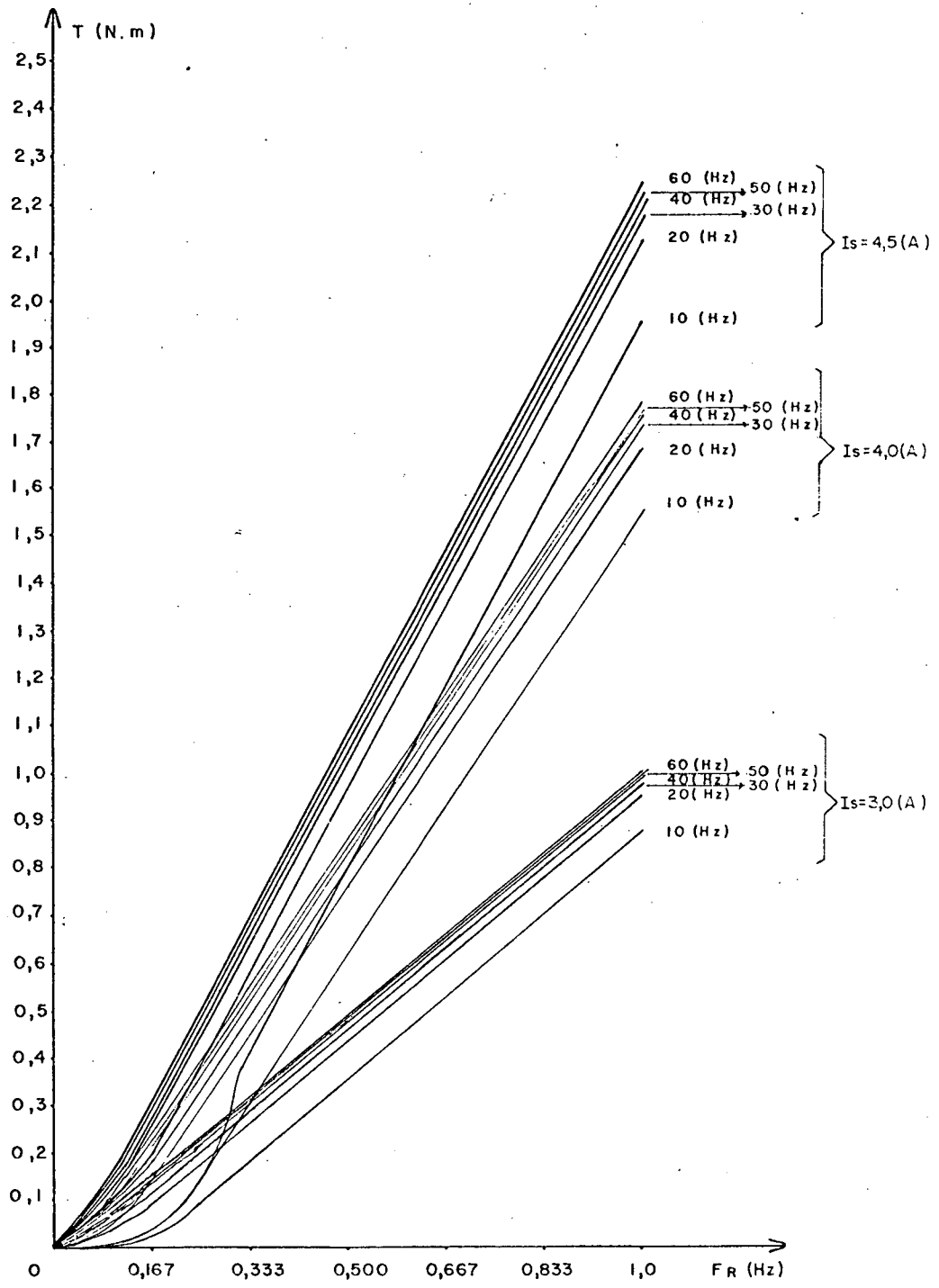


Figura 2.2 - Curvas $T \times F_R$ para Frequência de Alimentação (F) Variável, para $I_s = 3,0 A$, $I_s = 4,0 A$ e $I_s = 4,5 A$. Equação (2.28)

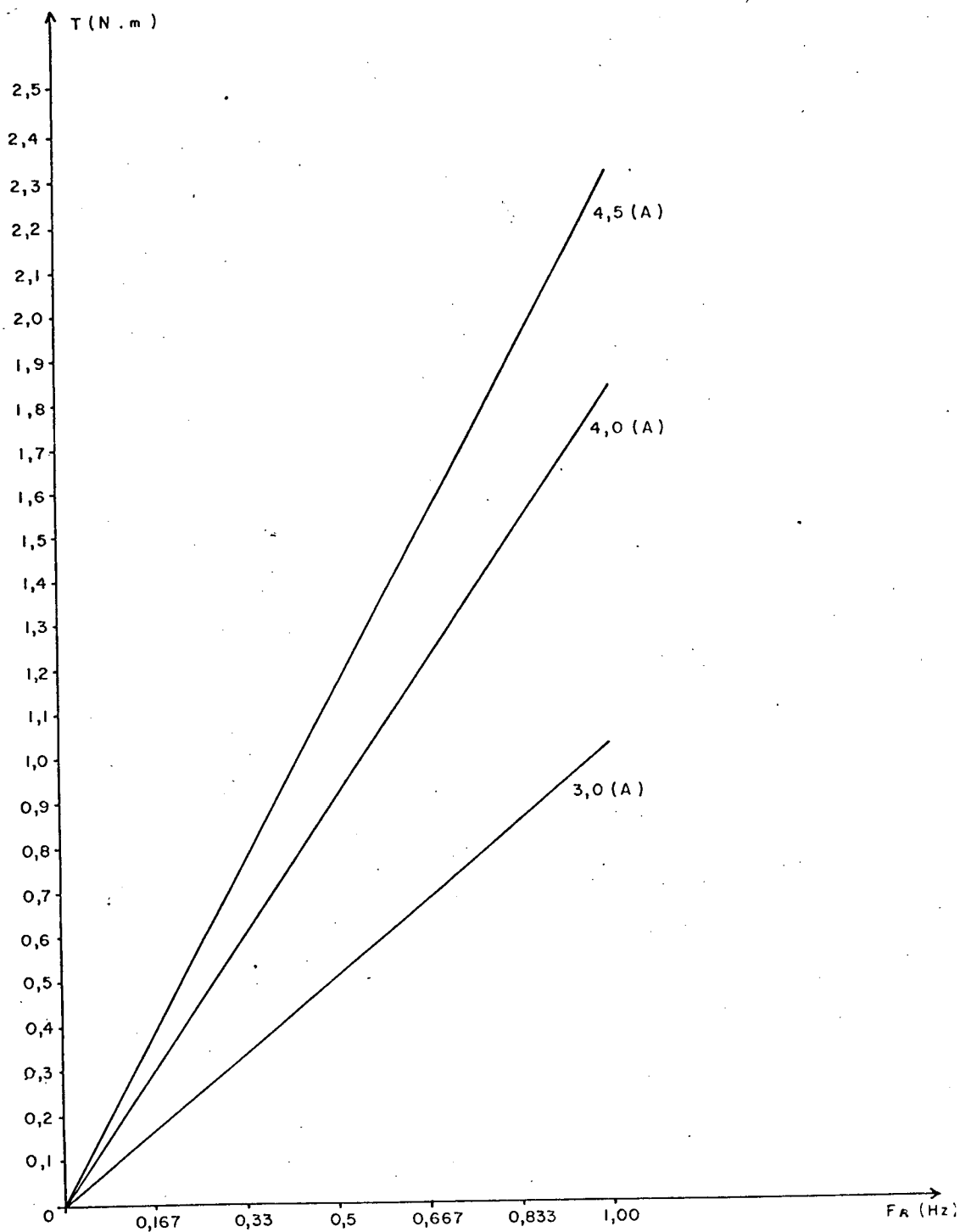


Figura 2.3 - Curvas $T \times F_r$ para $I_s = 3,0$ A, $I_s = 4,0$ A e $I_s = 4,5$ A. Equação (2.30).

Para traçar as figuras (2.1), (2.2) e (2.3) foi utilizado o programa BASTISTA FORTRAN Apêndice (B.1).

2.3.1 - ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS OBTIDAS

Figura 2.1 - O controle do torque médio através do controle de frequência de corrente do rotor (Fr) é possível porque o torque médio tem uma variação muito pequena com a variação da frequência de alimentação. A curva que mais varia é a de 10 Hz, por que nesta frequência os parâmetros do motor já sofrem modificações devido a frequência.

Figuras 2.2 e 2.3 - As características das primeiras, são bem mais próximas da Figura (3.1) que as das últimas. Entretanto, devido a sua simplicidade, a implementação será de curvas semelhantes as da Figura 2.3. Nesta Figura a inclinação da curva de $I_s = 4,5 \text{ A}$ é a seguinte:

$$K_t = 0,368$$

Após os ajustes efetuados na implementação, esta inclinação adquiriu o seguinte:

$$K_t = 1,46$$

2.4 - OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS $T_x Fr$ DO MOTOR UTILIZADO

É sabido que:

$$T_{tot} = T_a + T_e$$

Onde:

T_a = Torque de atrito;

T_e = Torque no eixo;

T_{tot} = Torque total do motor.

Em [2], encontra-se todo o método para medição do torque de atrito empregado neste caso. O torque de atrito é obtido pela equação (2.32).

$$T_a = \frac{V_a I_a}{\omega_s} - \frac{R_a I_a^2}{\omega_s} \quad (2.32)$$

Onde:

V_a = Tensão da armadura;

I_a = Corrente de armadura;

R_a = Resistência da armadura.

Também de [2] tem-se que, o torque no eixo do motor é obtido pela equação (2.33).

$$T_e = \frac{V_c I_c}{\omega_m} \quad (2.33)$$

Onde:

V_c = Tensão na carga do gerador cc;

I_c = Corrente na carga do gerador cc.

Para obtenção das variáveis da equação (2.33) é utilizada a montagem da Figura (2.4).

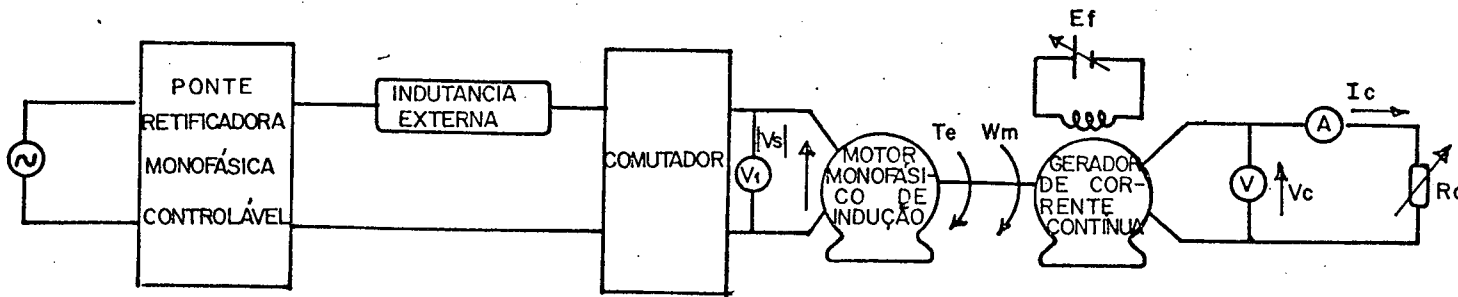


Figura 2.4 - Esquema para obtenção de T_e .

O valor da resistência da armadura medida é dada pela expressão (2.34) -

$$R_a = 5,6 \quad (2.34)$$

2.4.1 - DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

a) Primeiramente mede-se o torque de atrito para, as velocidades síncronas desejadas (600, 900, 1200 e 1500 [rpm]);

b) Depois, usando a montagem com frequência de alimentação (F) imposta, a frequência é fixada em cada um dos valores correspondentes às velocidades do item "a" (20, 30, 40 e 50 [Hz]), e a resistência R_c é variada de tal maneira a se obter os valores de V_c , I_c e ω_m que satisfaçam o valor de torque procurado, quando isto ocorre, obtém-se o módulo da tensão do estator do motor monofásico ($|V_s|$) no voltímetro V_1 , desta maneira encontra-se as curvas $T_x F_r$, para frequência de alimentação variável, apresentadas à seguir, e as curvas $|V_s| \times F$ para torque variável, apresentadas no ca

pítulo 3.

2.4.2 - CURVAS OBTIDAS E INTERPRETAÇÃO

Utilizando o procedimento descrito no ítem anterior obtem-se as curvas das Figuras (2.5), para $I_s = 4,0$ A e $I_s = 4,5$ A.

Estas curvas, obtidas experimentalmente, confirmam que o torque médio sofre uma variação muito pequena com a variação da frequência de alimentação, confirmando assim a possibilidade de um controle de torque médio através do controle da frequência da corrente do rotor bastante simples.

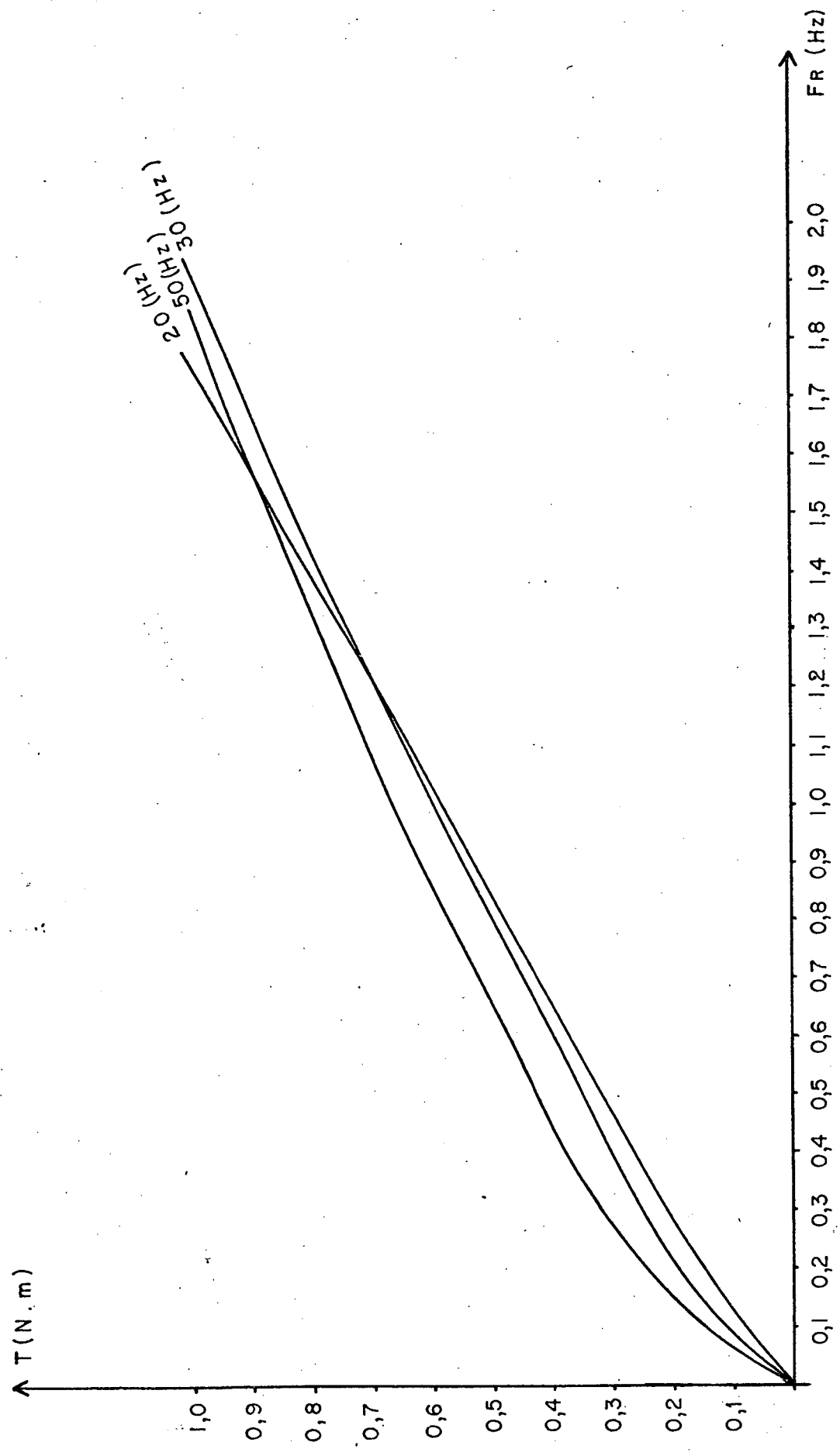


Figura 2.5-a - Curvas TxFr para Freqüência de Alimentação (F) variável, obtidas experimentalmente, para $I_s = 4,0$ A.

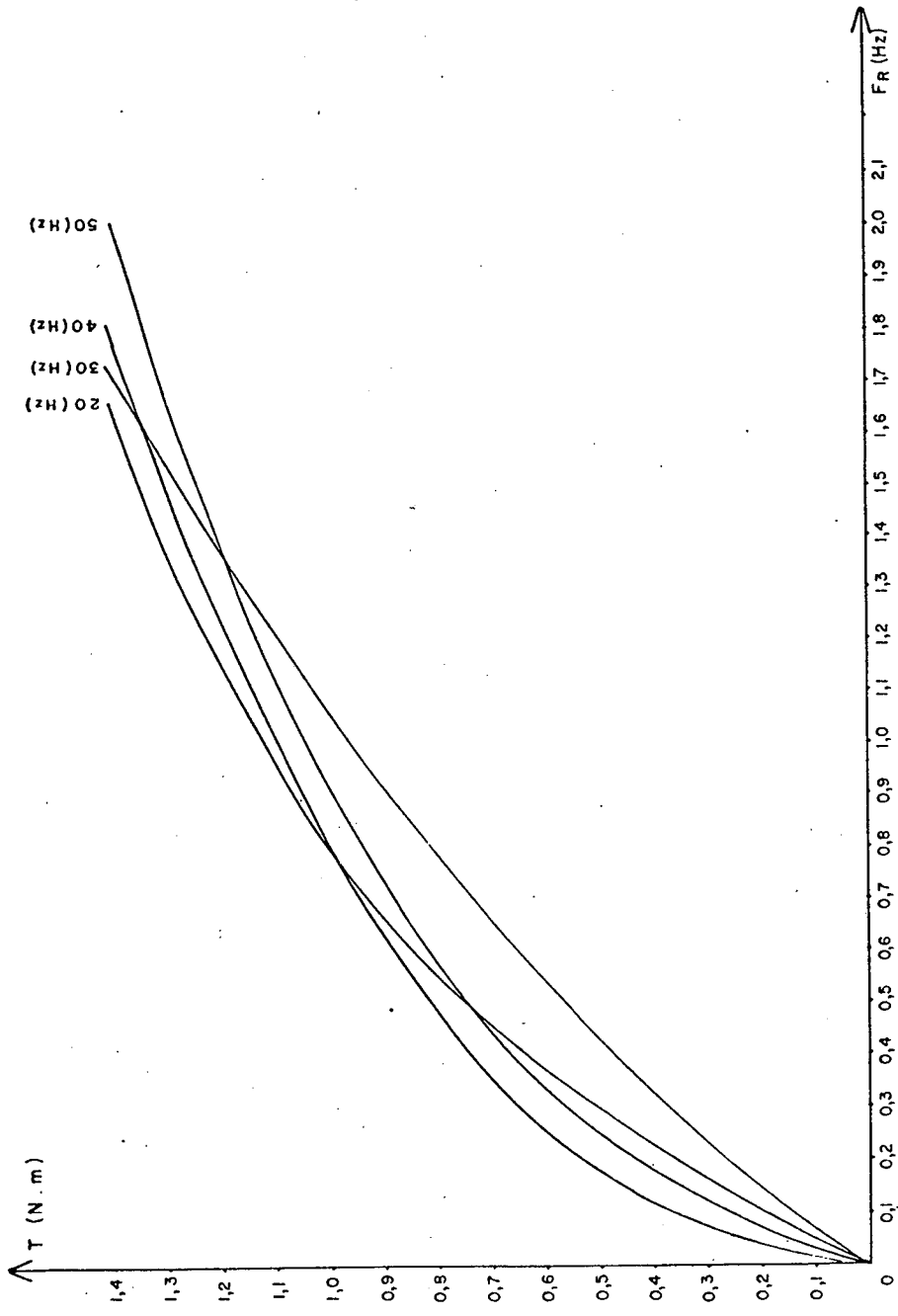


Figura 2.5-b - Curvas TxFr para frequência de Alimentação (F) Variável, obtidas experimentalmente, para $I_s = 4,5$ A.

2.5 - CONTROLE DO TORQUE ATRAVÉS DO CONTROLE DA FREQUÊNCIA DA CORRENTE DO ROTOR (I_r)

Para este tipo de controle, o diagrama de blocos da Figura (2.6) deve ser transformado no que está apresentado na Figura (2.7).

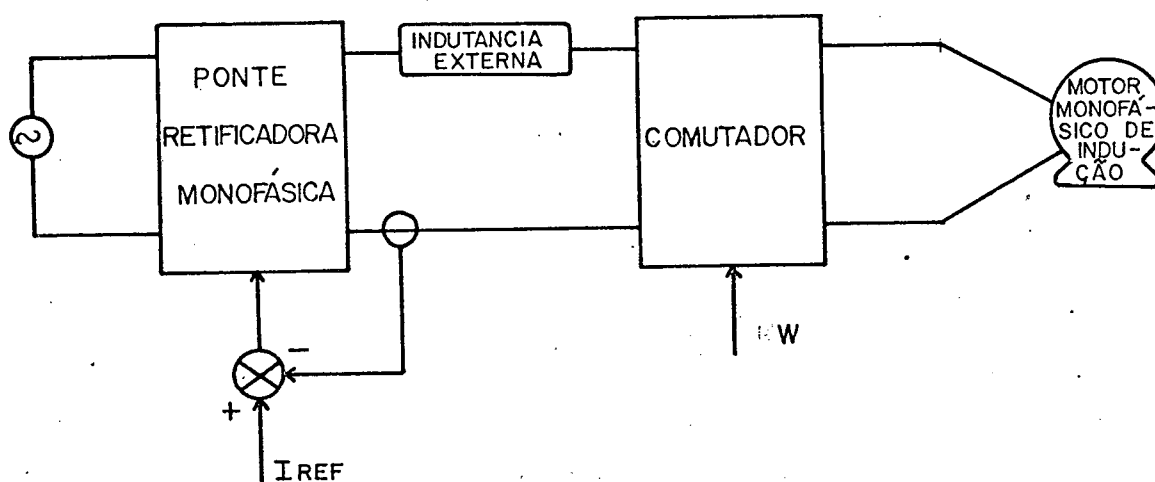


Figura 2.6 - Esquema para Frequência imposta.

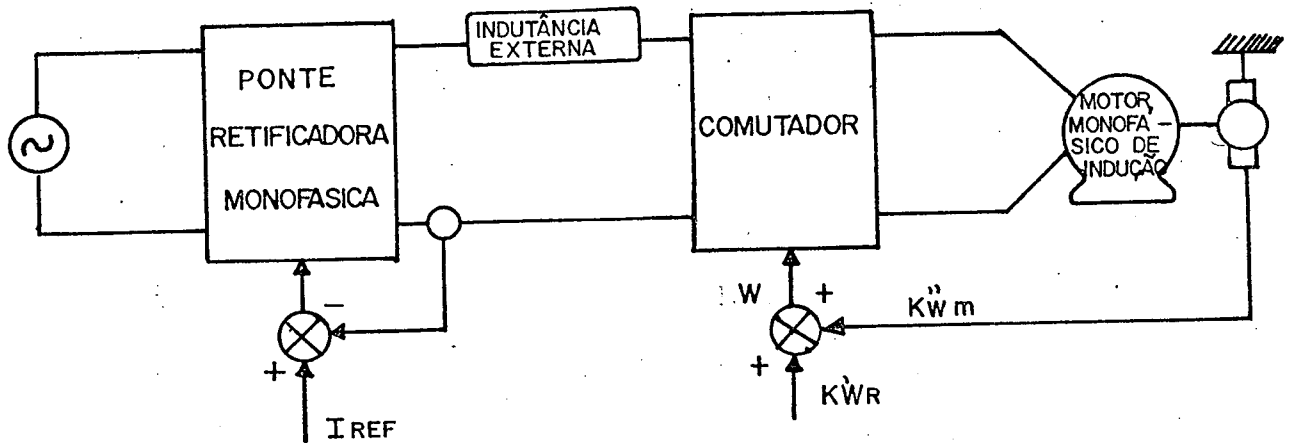


Figura 2.7 - Esquema para controle do torque através de Fr.

Como foi citado anteriormente, para que este controle fosse mais preciso a equação (2.28) deveria ser implementada, porém esta implementação é muito complexa e cara devido a inclusão da frequência de alimentação no controle.

Por isto, é preferível fazer a implementação da equação (2.30), porém fazendo ajustes no laboratório de maneira que o controle se aproxime mais da realidade que as curvas da Figura (2.3), e este procedimento é o usado no presente trabalho.

Para realizar esta implementação, alguns passos básicos devem ser seguidos, os quais são os seguintes:

- 1 - Medir a velocidade do eixo do motor;
- 2 - Converter este valor em um valor de tensão contínua;
- 3 - Somar esta tensão proporcional à velocidade do eixo do motor, à uma outra tensão contínua, proporcional à frequência da corrente do rotor (Fr) desejada;

- 4 - Entregar esta soma (ω) ao conversor tensão-fre_
quência, para que ele possa transformá-la na fre_
quência de alimentação (F) desejada.

Estes passos estão apresentados no diagrama de blo_
cos da Figura (2.8).

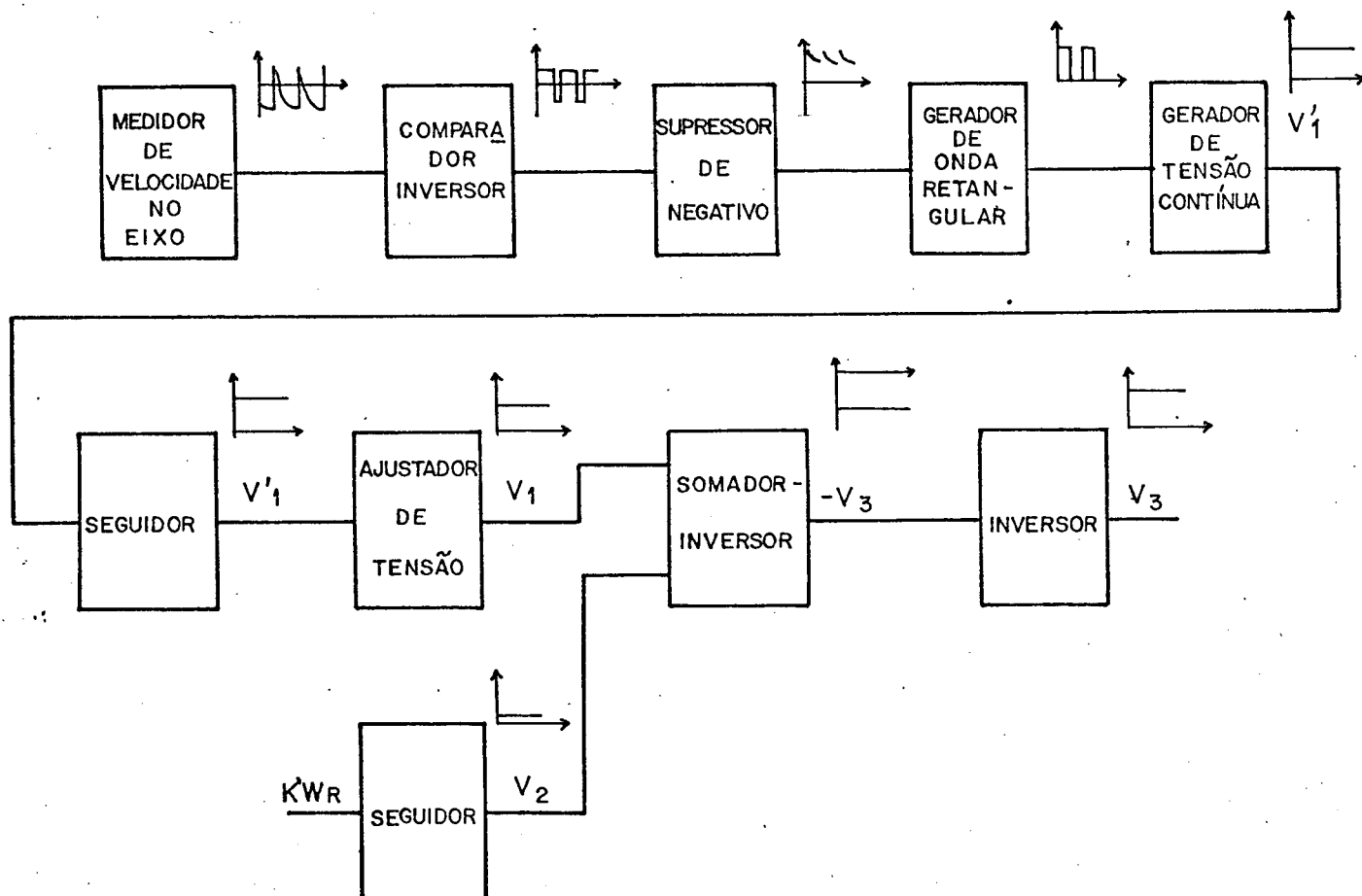


Figura 2.8 - Diagrama de blocos do controle do torque médio através de F_r .

O diagrama de blocos é implementado pelo circuito da Figura (2.9).

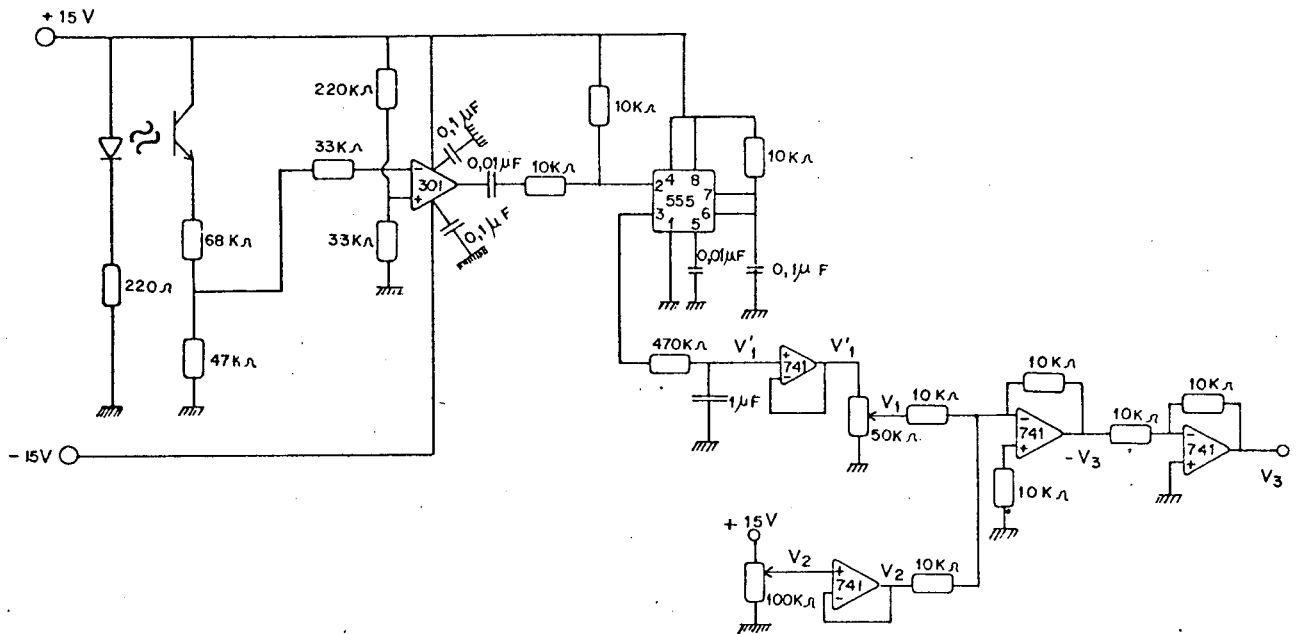


Figura 2.9 - Circuito implementado para o controle do torque através de Fr.

Cada bloco do diagrama da Figura (2.8) tem a seguinte função:

- a) Medidor de Velocidade no Eixo - retratar a velocidade do eixo do motor através de pulsos;
- b) Comparador-inversor - transformar os pulsos que saem do medidor de velocidade em uma onda retangular, de freqüência variável, porém, de valor médio constante;
- c) Supressor de Negativo - deixar passar apenas a parte positiva da onda retangular, transformando-a em pulsos;
- d) Gerador de Onda Retangular - transformar os pulsos em uma onda retangular onde o semi-período de valor de tensão V é constante, porém o período é variável, variando portanto, o valor médio da onda;
- e) Gerador de Tensão Contínua - transformar a onda retangular em um valor contínuo;
- f) Seguidor - criar um caminho de alta impedância para circulação de corrente no restante do circuito;
- g) Ajustador de Tensão - levar o valor da tensão para um valor adequado ao bom funcionamento do circuito;

- h) Somador-Inversor - adicionar e inverter os dois valores de tensão;
- i) Inversor - Tornar o sinal positivo, para que possa entrar no conversor tensão-freqüência.

2.6 - COMPORTAMENTO DINÂMICO NA REGIÃO DE BAIXO ESCORREGAMENTO COM F_r IMPOSTA

2.6.1 - ESTUDO ANALÍTICO

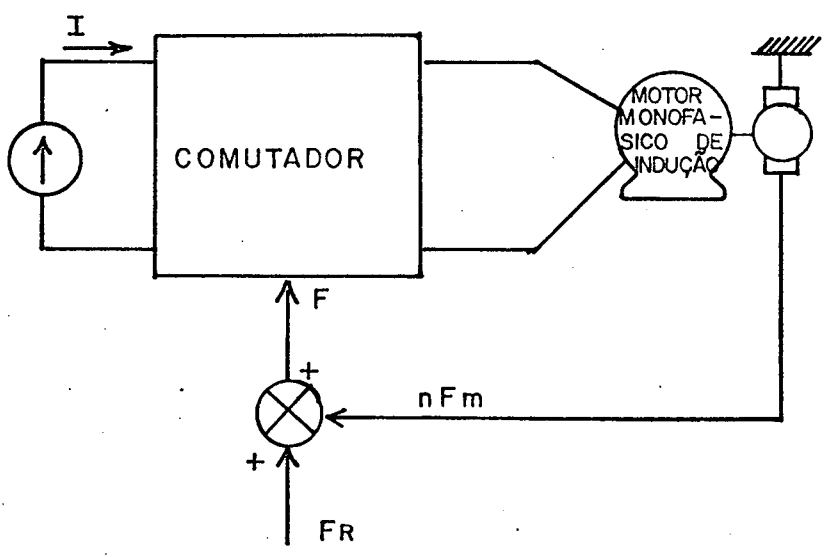


Figura 2.10 - Circuito Analisado.

Da equação (2.30) tem-se o valor do torque médio em função de ω_r :

$$T_m = \frac{1}{3} \frac{n m s r^2 I_s^2}{R_r} \omega_r \quad (2.30)$$

Para um dado I_s .

$T_m = K_t \omega_r$

(2.35)

De [1] tem-se a equação do transitório mecânico.

$$T_m = T_l + T_a + T_j \quad (2.36)$$

Onde:

T_m = Torque do motor;

T_j = Torque inercial;

T_l = Torque de carga.

$$T_a = D \omega_m \quad (2.37)$$

$$T_j = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.38)$$

Onde:

J = Momento de inércia;

D = Constante de atrito.

Substituindo as equações (2.35), (2.37) e (2.28), na equação (2.36) obtém-se a equação (2.39).

$$K_t \omega r = T_l + D \omega m + J \frac{d\omega m}{dt} \quad (2.39)$$

Quando o motor está à vazio e em regime permanente tem-se $T_l = 0$ e $\omega m = \text{cte}$, isto acarreta que:

$$K_t \omega r = D \omega m \quad (2.40)$$

$$\omega m = \frac{K_t}{D} \omega r \quad (2.41)$$

Que é a velocidade inicial, então a equação (2.41) toma a forma da equação (2.42).

$$\omega m_0 = \frac{K_t}{D} \omega r \quad (2.42)$$

A carga é um gerador de corrente contínua com excitação constante, onde a armadura é carregada bruscamente através da colocação de uma resistência em seu circuito, pelo fechamento de uma chave.

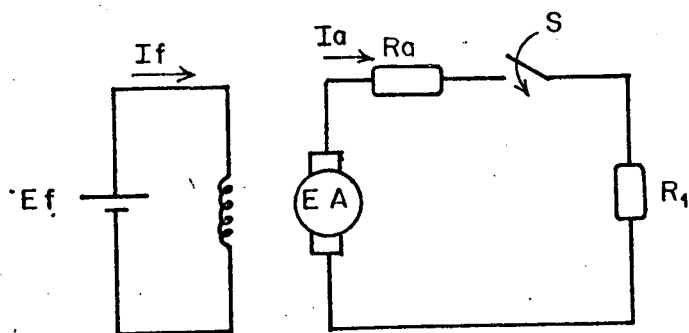


Figura 2.11 - Gerador CC com excitação constante.

No instante t_0 a chave S é fechada e o torque de carga passa a ter a forma da equação (2.43).

$$T_l = K_2 I_a \quad (2.43)$$

Onde:

K_2 = Constante do torque de carga com relação à corrente da armadura.

Do gerador de corrente contínua, tem-se:

$$E_a = (R_a + R_l) I_a + L \frac{dI_a}{dt} \quad (2.44)$$

Onde:

R_l = resistência de carga;

L = indutância da máquina cc.

Fazendo

$$R_t = R_a + R_l \quad (2.45)$$

Substituindo a equação (2.45) na equação (2.44) obtem-se a equação (2.46).

$$E_a = R_t I_a + L \frac{dI_a}{dt} \quad (2.46)$$

Aplicando transformada de Laplace nas equações (2.46) e (2.43).

$$E_a (s) = (R_t + sL) I_a (s) \quad (2.47)$$

$$I_a (s) = \frac{E_a (s)}{R_t + sL} \quad (2.48)$$

$$T_l (s) = K_2 I_a (s) \quad (2.49)$$

Substituindo a equação (2.48) na equação (2.49) tem-se a equação (2.50).

$$T_l (s) = \frac{K_2 E_a (s)}{R_t + sL} \quad (2.50)$$

Mas, do gerador de corrente contínua tem-se que:

$$E_a = K_3 \omega_m \quad (2.51)$$

Onde:

K_3 = constante da tensão da armadura em relação a ve
locidade do motor.

Aplicando transformada de Laplace na equação (2.51).

$$E_a(s) = K_3 \omega_m(s) \quad (2.52)$$

Substituindo a equação (2.52) na equação (2.50) tem-se a equação (2.53)

$$T_l(s) = \frac{K_2 K_3 \omega_m(s)}{R_t + sL} \quad (2.53)$$

Como a constante de tempo mecânica é muito maior que a constante de tempo elétrica, a influência de L pode ser desprezada, portanto, a equação (2.53) toma a forma da equação (2.54).

$$T_l(s) = \frac{K_2 K_3 \omega_m(s)}{R_t} \quad (2.54)$$

Fazendo, na equação (2.54).

$$K_1 = K_2 K_3 \quad (2.55)$$

Encontra-se a equação (2.56)

$$T_l(s) = \frac{K_1 \omega_m(s)}{R_t} \quad (2.56)$$

Aplicando a transformada inversa na equação (2.56).

$$\boxed{T\ell(t) = \frac{K_1}{Rt} \omega_m(t)} \quad (2.57)$$

Substituindo a equação (2.57) na equação (2.39) tem-se a equação (2.58).

$$K_t \omega_r = \frac{K_1}{Rt} \omega_m + D \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.58)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação (2.58).

$$\frac{K_t \omega_r}{s} = \frac{K_1}{Rt} \omega_m(s) + D \omega_m(s) + SJ \omega_m(s) - J\omega_m(0) \quad (2.59)$$

Substituindo a equação (2.42) na equação (2.59) tem-se a equação (2.60).

$$\frac{K_t \omega_r}{s} = \left(\frac{K_1}{Rt} + D + SJ \right) \omega_m(s) - \frac{JK_t}{D} \omega_r \quad (2.60)$$

$$\left(\frac{K_1 + DRt + SJRt}{Rt} \right) \omega_m(s) = \left(\frac{K_t}{s} + \frac{JK_t}{D} \right) \omega_r \quad (2.61)$$

$$\omega_m(s) = \frac{K_t D R_t + S J K_t R_t}{s D (K_1 + D R_t + S J R_t)} \omega_r \quad (2.62)$$

$$\omega_m(s) = \frac{K_t}{D} \frac{D/J + S}{s((K_1 + D R_t)/J R_t + s)} \omega_r \quad (2.63)$$

Separando o segundo membro da equação (2.63) em frações parciais:

$$\omega_m(s) = \frac{K_t}{D} \frac{D/J + s}{s((K_1 + D R_t)/J R_t + s)} \omega_r = \frac{A}{s} + \frac{B}{K_1 + D R_t + s} \quad (2.64)$$

J R t

$$A = \frac{K_t R_t \omega_r}{K_1 + D R_t} \quad (2.65)$$

$$B = \frac{K_t K_1 \omega_r}{D (K_1 + D R_t)} \quad (2.66)$$

Substituindo as equações (2.65) e (2.66) na equação (2.64) tem-se a equação (2.67).

$$\omega_m(s) = \frac{K_t R_t \omega_r}{K_1 + D R_t} \frac{1}{s} + \frac{K_t K_1 \omega_r}{D (K_1 + D R_t)} \frac{1}{K_1 + D R_t + s} \quad (2.67)$$

J R t

Aplicando a transformada Inversa na equação (2.67).

$$\omega_m(t) = \frac{K_1 t R t \omega_r}{K_1 + D R t} \left(1 + \frac{K_1}{D R t} e^{- (K_1 + D R t) t / J R t} \right) \quad (2.68)$$

Como

$$\omega(t) = n \omega_m(t) + \omega_r \quad (2.69)$$

$$\omega_m(t) = \frac{\omega(t) - \omega_r}{n} \quad (2.70)$$

Substituindo a equação (2.70) na equação (2.68) tem-se a equação (2.71).

$$\omega(t) = \omega_r + \frac{n K_1 t R t \omega_r}{K_1 + D R t} \left(1 + \frac{K_1}{D R t} e^{- (K_1 + D R t) t / J R t} \right) \quad (2.71)$$

Com as equações (2.57), (2.68) e (2.71) foram traçadas as curvas das Figuras 2.12. (Casos 1 e 2 vide página 49).

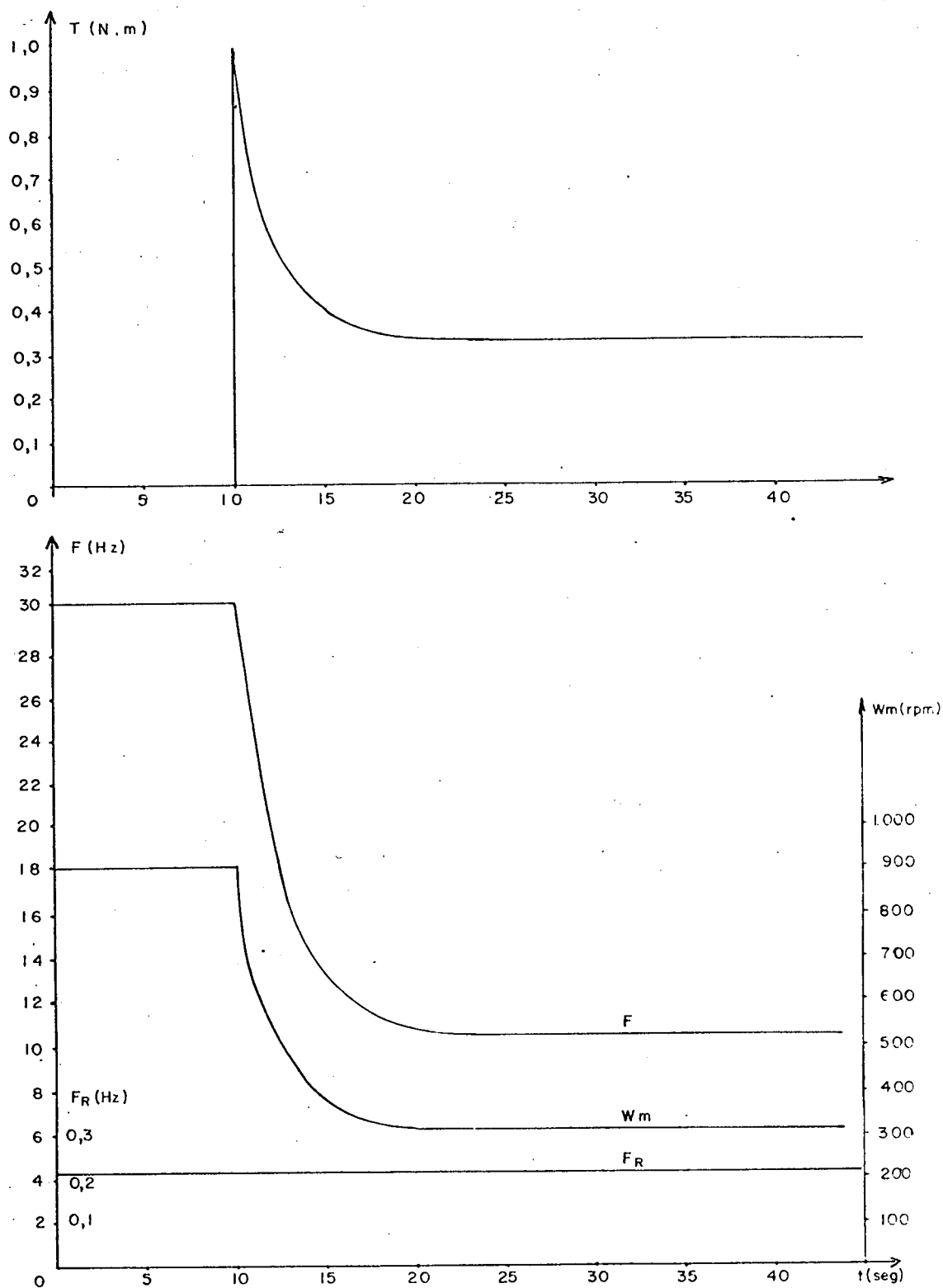


Figura 2.12-a - Comportamento do motor com controle do torque através de F_R , 1º Caso.

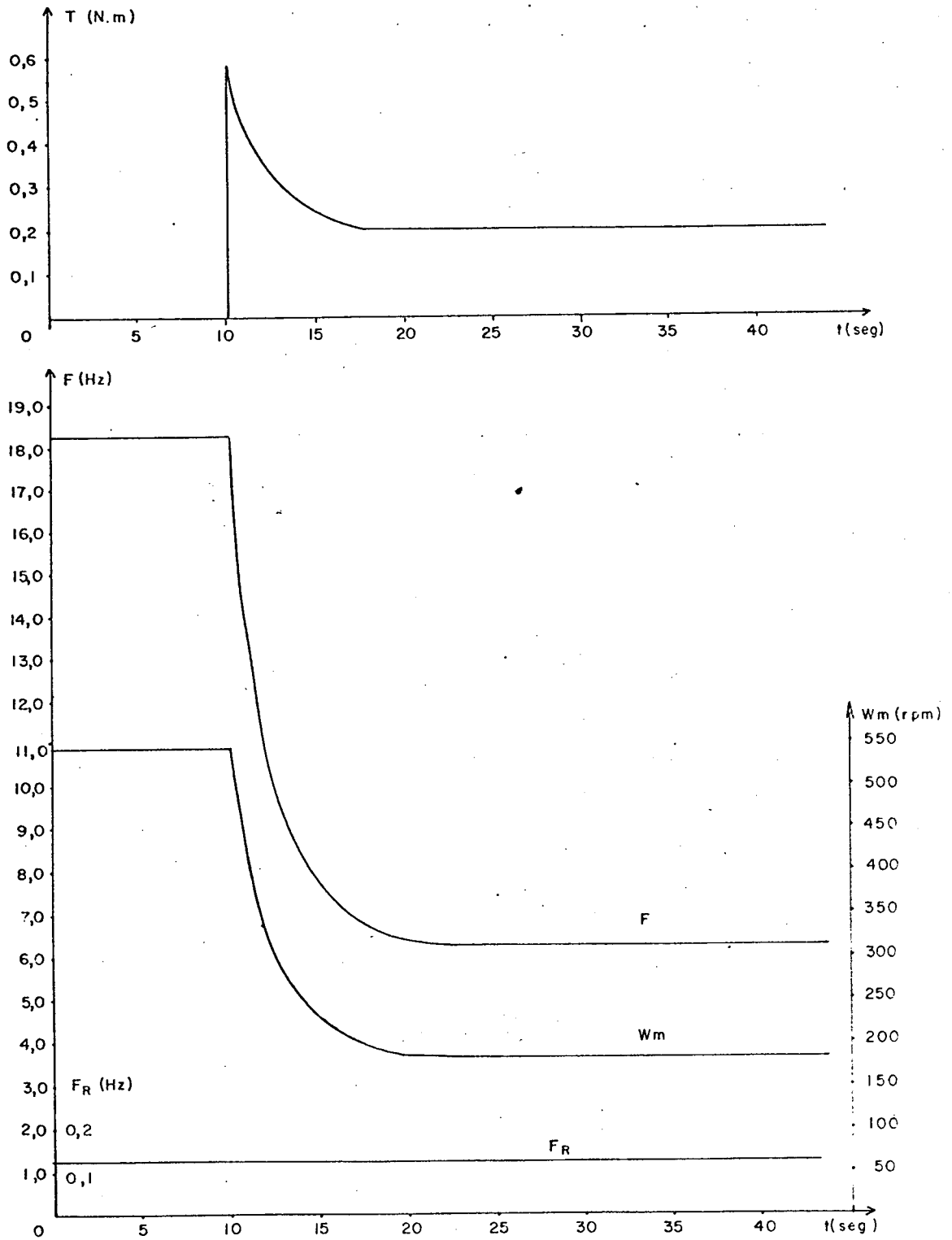


Figura 2.12-b - Comportamento do motor com controle do torque através de F_R , 2º Caso.

Para traçar as Figuras (2.12-a) e (2.12-b) foi utilizado o programa VIEIRA FORTRAN Apêndice (B-2).

2.6.2 - ESTUDO EXPERIMENTAL

O material utilizado para a realização deste estudo foi o seguinte:

Um Shunt $0,5 \Omega$

Uma máquina de corrente contínua

CV 1,5 V 240 A 5,6

RPM 1,150/2.000 Tipo de Enr. Independente

Campo:

Cor. $0,37/0,17$ A Res. 25°C $465,4\Omega$

Um motor monofásico de Indução, já descrito no item

2.3.

Uma carga resistiva.

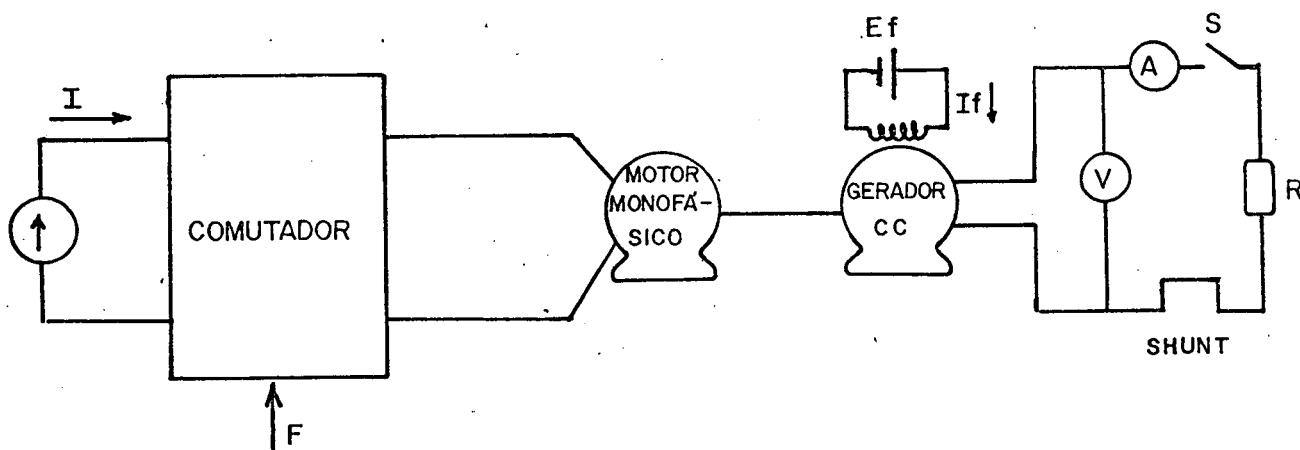


Figura 2.13 - Montagem para frequência da rede imposta.

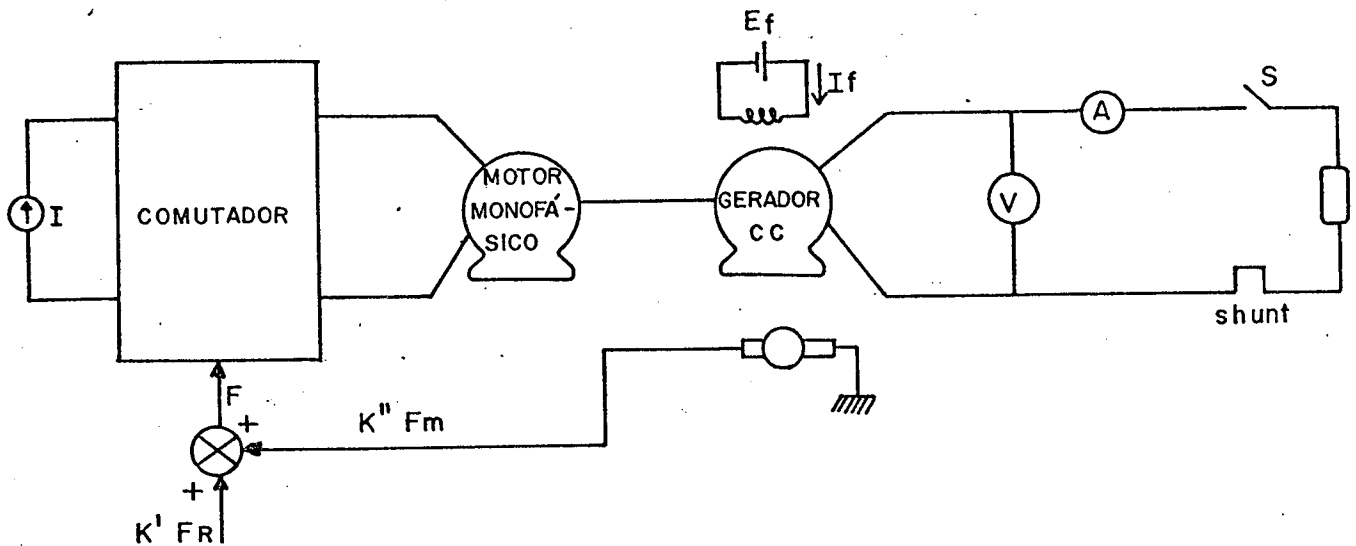


Figura 2.14 - Montagem com controle de torque através de freqüência da corrente do rotor (Fr).

Foram realizados dois ensaios para cada montagem:

1º CASO - Usando a freqüência de alimentação do motor (F) em um valor próximo de 50 Hz à vazio, e em seguida aplicando o torque de carga através da ligação da chave s, registrando o comportamento das variáveis de maior interesse.

2º CASO - Procedimento semelhante ao anterior, somente que, para um valor de freqüência de alimentação (F) em torno de 30 Hz.

A montagem da Figura (2.13) foi utilizada na obtenção das curvas das Figuras (2.15). E a montagem da Figura (2.14) para obtenção das curvas das Figuras (2.16).

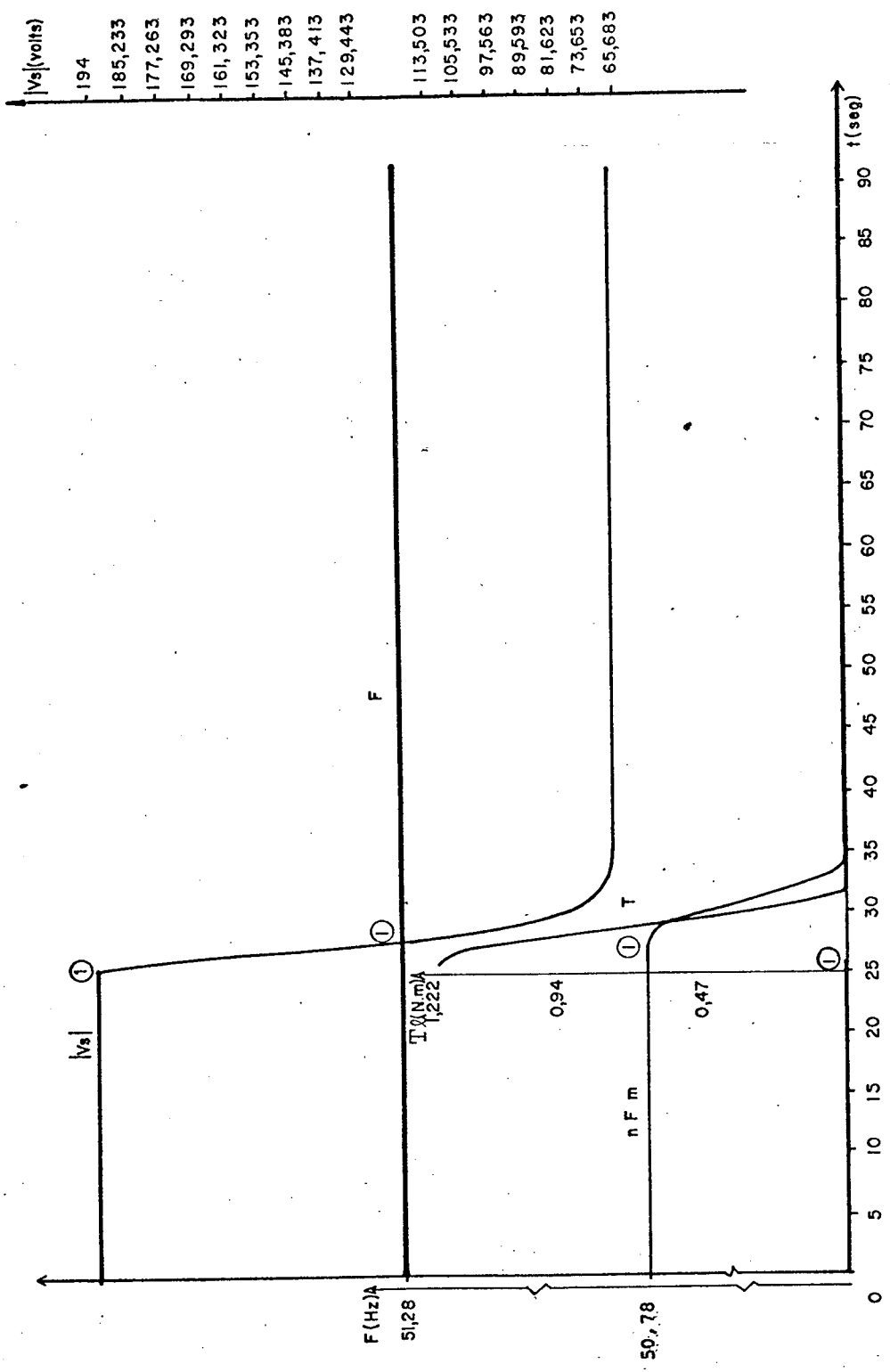


Figura 2.15-a - Impondo a Freqüência, Malha Aberta, 1º Caso

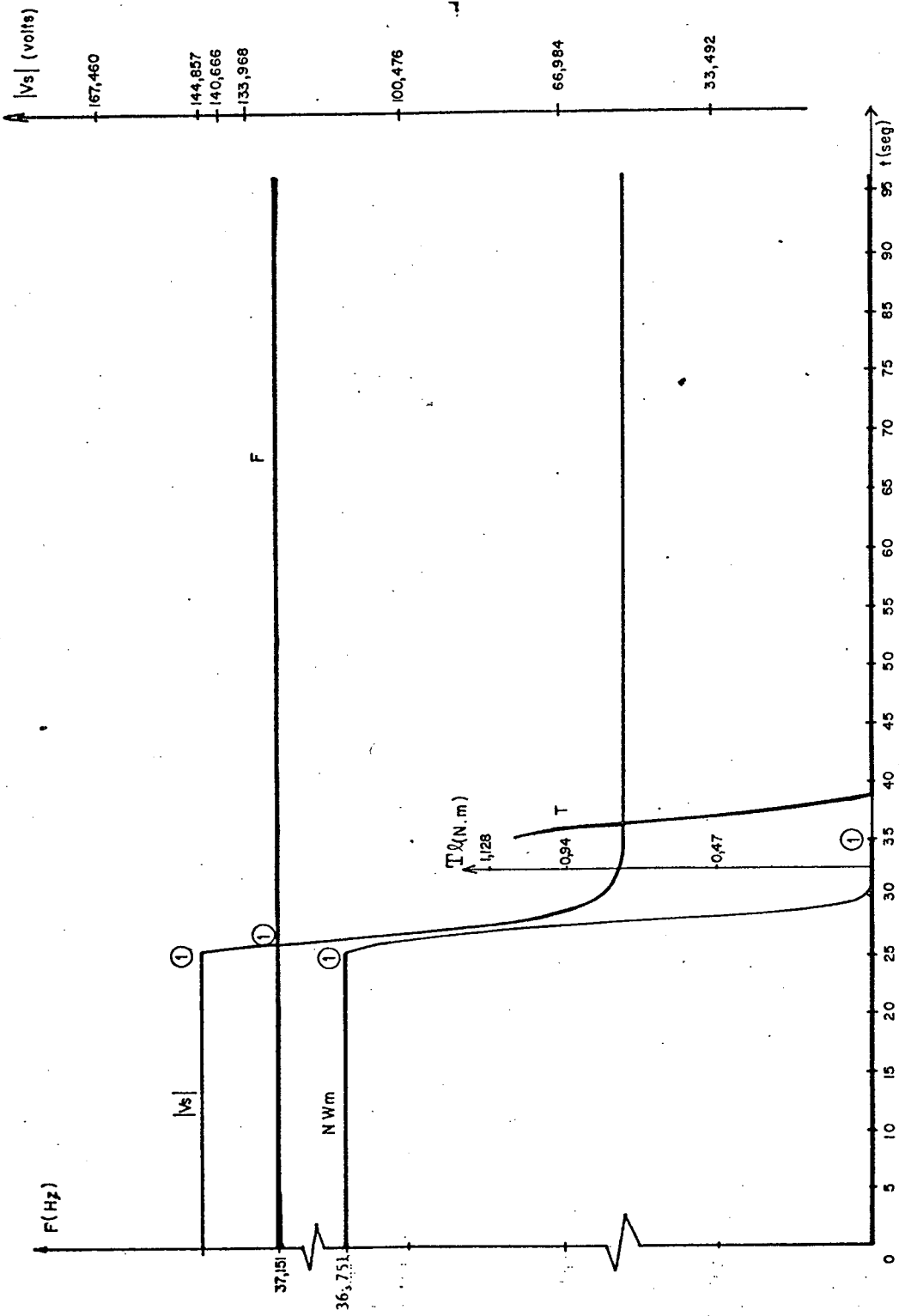


Figura 2.15-b - Impondo a Frequência, Malha Aberta, 2º Caso

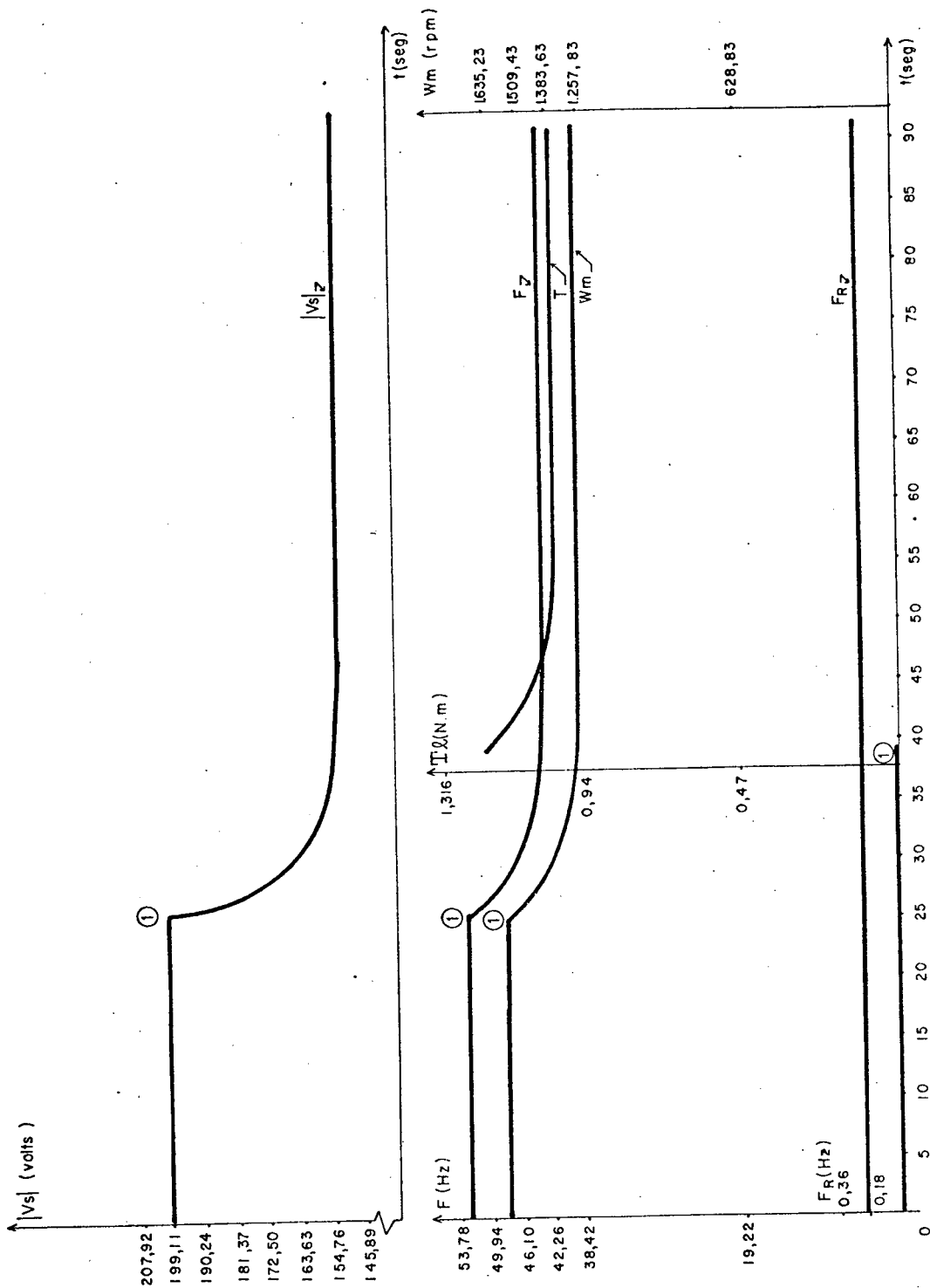


Figura 2.16-a - Controle do torque através de Fr , 1º Caso.

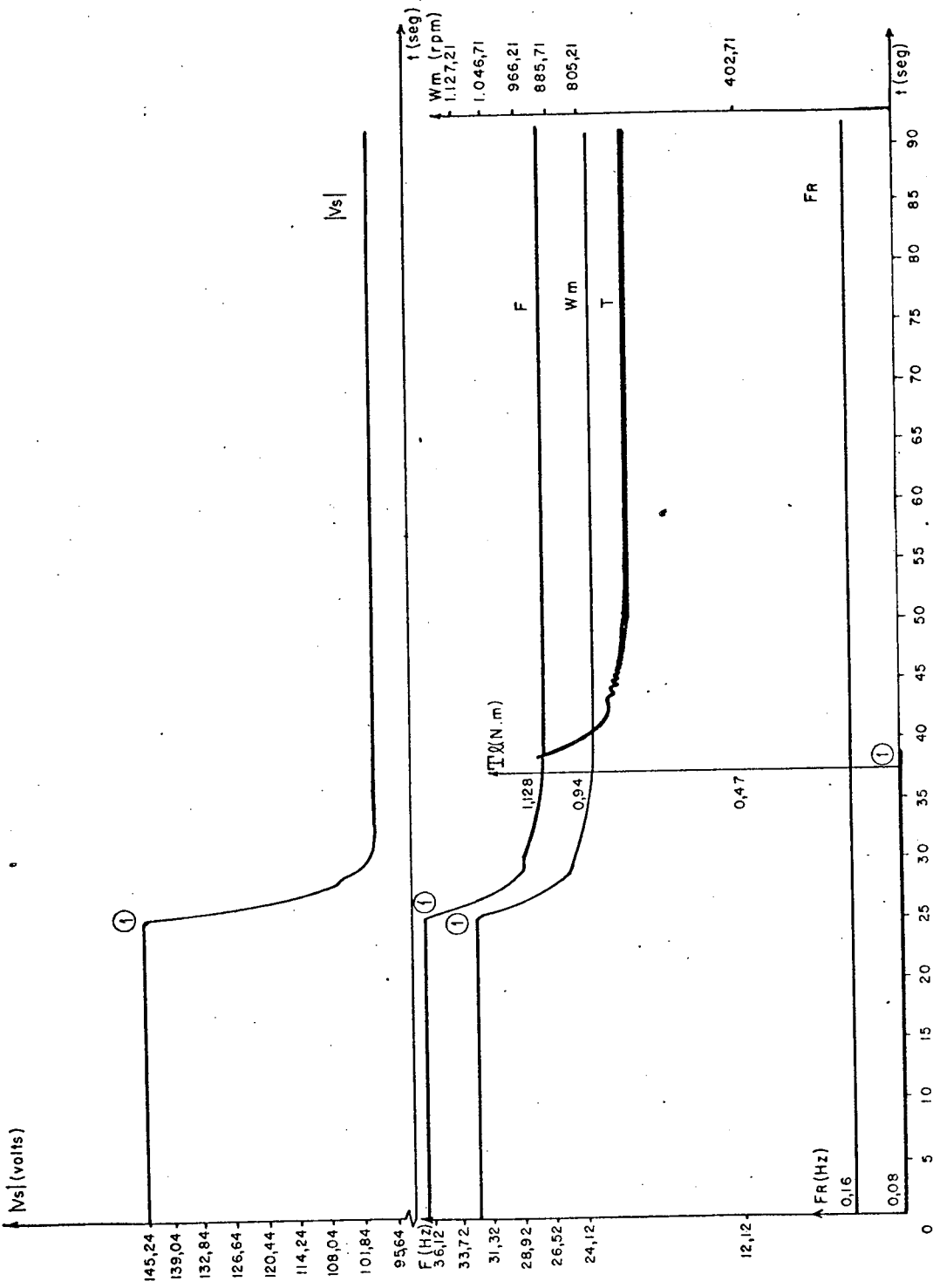


Figura 2.16-b - Controle do torque através de FR , 2º Caso.

OBSERVAÇÃO: Nas Figuras (2.15) e (2.16), os pontos assinalados, são os pontos onde o torque de carga é aplicado.

2.6.3 - ANÁLISE DAS CURVAS OBTIDAS

Figuras 2.15 - Nestas Figuras fica patente o problema de estabilidade existente na montagem, quando a frequência de alimentação é imposta com malha aberta. O comportamento do motor neste caso, é insatisfatório.

Figuras 2.16 - Nestas Figuras pode ser observado como o controle do torque médio através de f_r (frequência da corrente do rotor) é efetivo. Ele soluciona o problema de estabilidade da montagem, apenas adequando o ponto de funcionamento do conjunto motor-carga à nova solicitação. O comportamento do motor neste caso é totalmente satisfatório.

2.7 - CONCLUSÕES

À partir dos estudos teóricos e experimentais realizados, que foram descritos neste capítulo, podemos estabelecer as seguintes conclusões:

- a) O controle do torque médio do motor, através do controle da frequência da corrente do rotor assegurará o funcionamento estável.
- b) A representação linear, expressa pela equação (2.30) é de fácil implementação, tanto que, serviu de base

se para o circuito implementado.

- c). Na região de baixos valores de Fr , o torque médio praticamente não depende da frequência de alimentação do motor.
- d) A abordagem feita, do ponto de vista analítico é simples e fornece bons resultados qualitativos, como ficou evidenciado pelos estudos experimentais.
- e) O circuito implementado para controlar o torque é simples e robusto, sendo adequado para emprego industrial.
- f) O método estudo, pelo seu desempenho e simplicidade, pode ser empregado para a alimentação e o controle do motor monofásico de indução, na atividade industrial.

C A P Í T U L O I I I

ESTUDO DO CONTROLE DO TORQUE MÉDIO DO MOTOR ATRAVÉS DO CONTROLE DO MÓDULO DA TENSÃO DO ESTATOR

3.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo, à partir da equação do torque médio em função da frequência da corrente do rotor (2.7), e da equação da tensão do estator em função da velocidade [2], obter as características do torque médio e da frequência da corrente do rotor em função da tensão do estator:

Estabelecer a variação da tensão do estator com a frequência de alimentação.

Obter uma equação que represente estas características e possa ser implementada.

Obter experimentalmente, as características tensão do estator em função da frequência de alimentação do motor para torque fixado.

Fazer o controle do torque médio, através do controle da tensão do estator.

Fazer o estudo do comportamento dinâmico do motor, com controle do torque médio através do controle da tensão de estator.

3.2 - ESTUDO DO TORQUE MÉDIO EM FUNÇÃO DO MÓDULO DA TENSÃO DO ESTATOR

De [2] é obtida a seguinte equação da tensão do estator.

$$|V_s| = \left\{ \frac{(R_s [R_r^2 + (n_1^2 - 1) X_r^2] - 2R_r X_r X_s + R_r X_s r^2)^2 + [X_s [R_r^2 + (n_1^2 - 1) X_r^2] + 2R_r R_s X_r + (1 - n_1^2) X_r X_s r^2]^2}{[R_r^2 + (n_1^2 - 1) X_r^2]^2 + (2R_r X_r)^2} \right\}^{1/2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_s$$

(3.1)

Onde:

$|V_s|$ = módulo da tensão do estator.

$$X_r = n\omega SL_r \quad (3.2)$$

$$X_s = n\omega SL_s \quad (3.3)$$

$$X_{msr} = n\omega S M_{sr} \quad (3.4)$$

Substituindo as equações (3.2), (3.3) e (3.4) na equação (3.1) é obtida a equação (3.5).

$$|V_s| = \left\{ \frac{R_s [Rr^2 + (n_1^2 - 1)n^2 \omega s^2 Lr^2] - 2Rr m^2 \omega s^2 Lr Ls + Rm^2 \omega s^2 Msr^2}{[Rr^2 + (n_1^2 - 1)n^2 \omega s^2 Lr^2]^2 + [n \omega s Ls [Rr^2 + (n_1^2 - 1)n^2 \omega s^2 Lr^2] + 2Rr Rsn \omega s Lr + (1 - n^2)n^3 \omega s^3 Lr Msr^2]} \right\}^{1/2} \sqrt{2} \sqrt{3}$$

(3.5)

Mas, por definição

$$n_1 = \frac{\omega_m}{\omega_s} \quad \text{e} \quad \omega_m = \omega_s - \frac{\omega_r}{n}$$

Então

$$n = 1 - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \tag{3.6}$$

Substituindo a equação (3.6) na equação (3.5) é obtida a equação (3.7).

$$|V_s| = \left\{ \frac{\left(R_s \left[R_r^2 + \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 - 1 \right] n^2 \omega s^2 L r^2 \right)^2 - 2 R_r n^2 \omega s^2 L r L_s + R_r n^2 \omega s^2 M s r^2 \right)^2 + \left(n\omega s L_s \left[R_r^2 + \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 - 1 \right] n^2 \omega s^2 L r^2 \right)^2 + [2 R_r n\omega s L r]^2}{\left[R_r^2 + \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 - 1 \right] n^2 \omega s^2 L r^2 + [2 R_r n\omega s L r]^2} \right\}^{1/2} \frac{\sqrt{2} I_s}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{2 R_r R_s n\omega s L r + \left[1 - \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s} \right)^2 \right] n^3 \omega s^3 L r M s r^2}{\sqrt{2} \sqrt{3}} \right\}^{1/2} I_s$$

(3.7)

A equação (3.7) é a primeira equação procurada.

Do capítulo 2 é obtida a equação (2.5), que fornece o torque médio em função da frequência da corrente do rotor.

$$T = \frac{-2}{3} \frac{n}{\omega} \frac{Msr^2 Is^2}{\omega} \left[\frac{RrLr^2 (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^3 + \frac{Rr}{\omega^2} (Rr^4 - \omega^4 Lr^4) \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^4}{Lr^4 (Rr^2 + \omega^2 Lr^2) \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^4 + \frac{2Lr^2}{\omega^2} (Rr^4 - \omega^4 Lr^4) \left(1 - \frac{\omega r}{n\omega s}\right)^2 + \left(\frac{Rr}{\omega}\right)^4} \right] (Rr^2 + 3\omega^2 Lr^2) + Lr^4 (3Rr^2 + \omega^2 Lr^2) \quad (3.8)$$

Mas, por definição

$$\omega = n\omega_S \quad (3.9)$$

Substituindo a equação (3.9) na equação (3.8) é obtida a equação (3.10), que é a segunda equação procurada.

$$T = -\frac{2}{3} \frac{Msr^2}{\omega s} \left\{ \begin{array}{l} Rr \text{ } \left(\frac{1 - \omega r}{n\omega s} \right)^3 + \frac{Rr}{n^2 \omega s^2} (Rr^4 - n^4 \omega s^4 Ir^4) \left(\frac{1 - \omega r}{n\omega s} \right) \\ \left(\frac{1 - \omega r}{n\omega s} \right)^2 (Rr^2 + n^2 \omega s^2 Ir^2) \left(\frac{1 - \omega r}{n\omega s} \right)^3 + \frac{Rr}{n^2 \omega s^2} (Rr^4 - n^4 \omega s^4 Ir^4) \left(\frac{1 - \omega r}{n\omega s} \right) \\ \left(\frac{1 - \omega r}{n\omega s} \right)^4 + \frac{2Ir^2}{n^2 \omega s^2} (Rr^4 - n^4 \omega s^4 Ir^4) \left(\frac{1 - \omega r}{n\omega s} \right)^2 + \left(\frac{Rr}{n\omega s} \right)^4 (Rr^2 + 3n^2 \omega s^2 Ir^2) + Ir^4 (3Rr^2 + n^2 \omega s^2 Ir^2) \end{array} \right\}$$

(3.10)

Resolvendo as equações (3.7) e (3.10) para os mesmos valores de ωr obtem-se para cada ponto um valor do torque médio e um do módulo da tensão do estator, sendo possível assim obter a variação do torque médio em função do módulo de tensão do estator para frequência de alimentação estabelecida.

3.3 - OBTENÇÃO TEÓRICA DAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR UTILIZADO

Estas características foram obtidas utilizando os parâmetros do motor monofásico de indução, que foram apresentadas no capítulo 2, item 2.3.

3.3.1 - VARIAÇÃO DO TORQUE MÉDIO EM FUNÇÃO DO MÓDULO DA TENSÃO DO ESTATOR

As curvas das Figuras (3.1) são obtidas utilizando-se as equações (3.7) e (3.10) da maneira explicada no item 3.2.

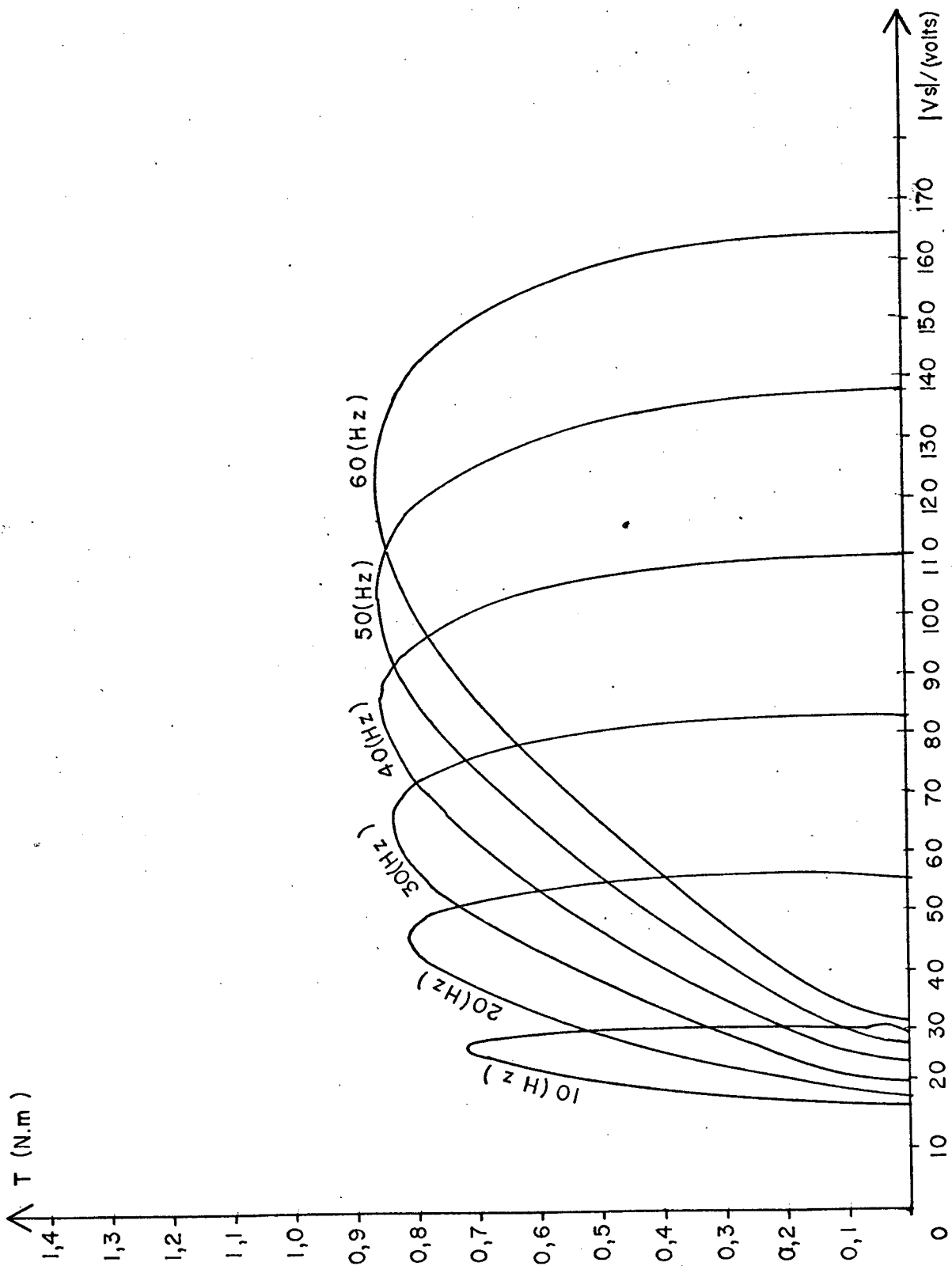


Figura 3.1-a - Curvas Tx $|V_s|$ para Freqüência de Alimentação (F) Variável, para

$I_s = 3,0$ A.

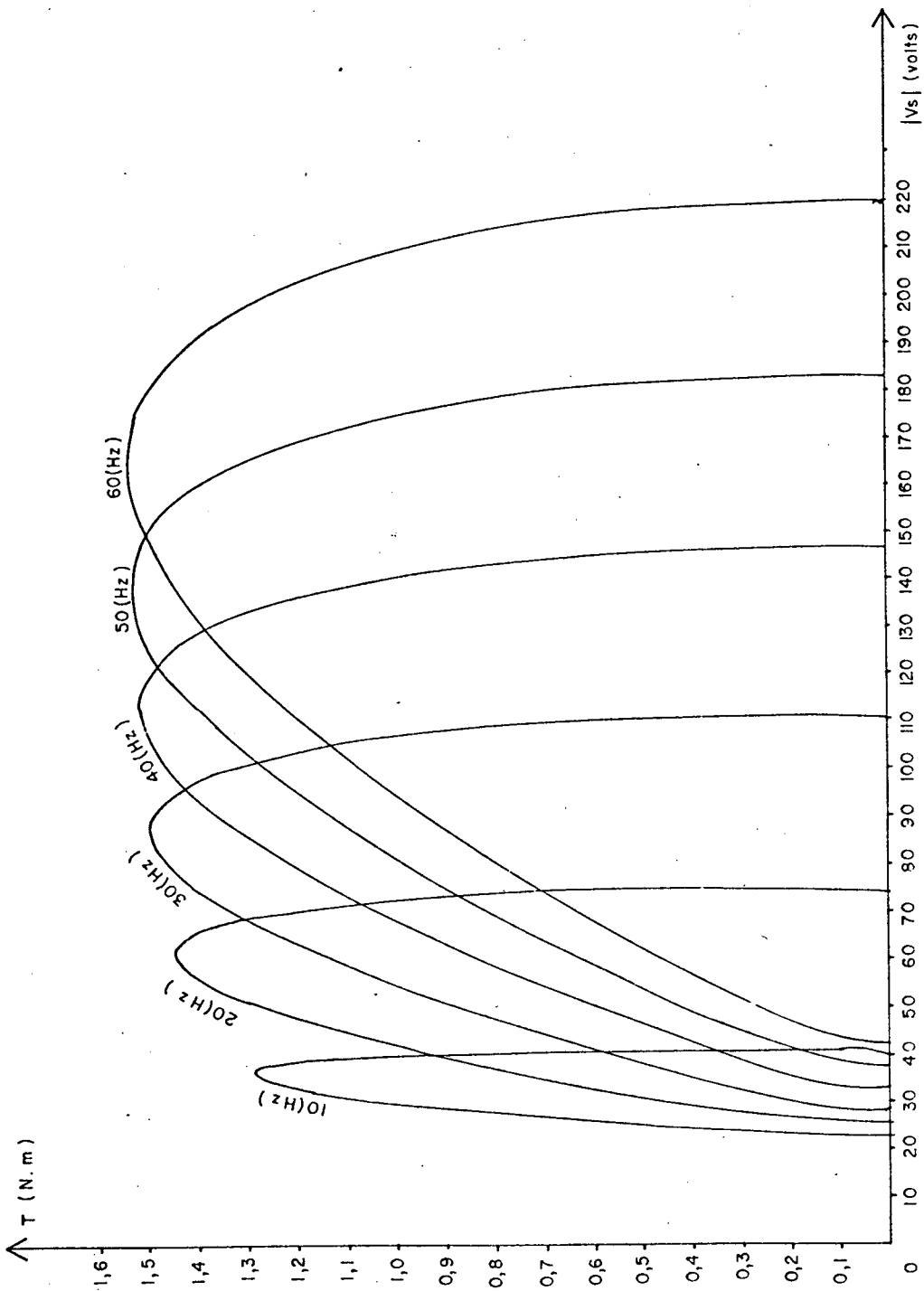


Figura 3.1-b - Curvas $T_x |V_s|$ para Freqüência de Alimentação (F) Variável, para $I_s = 4,0$ A.

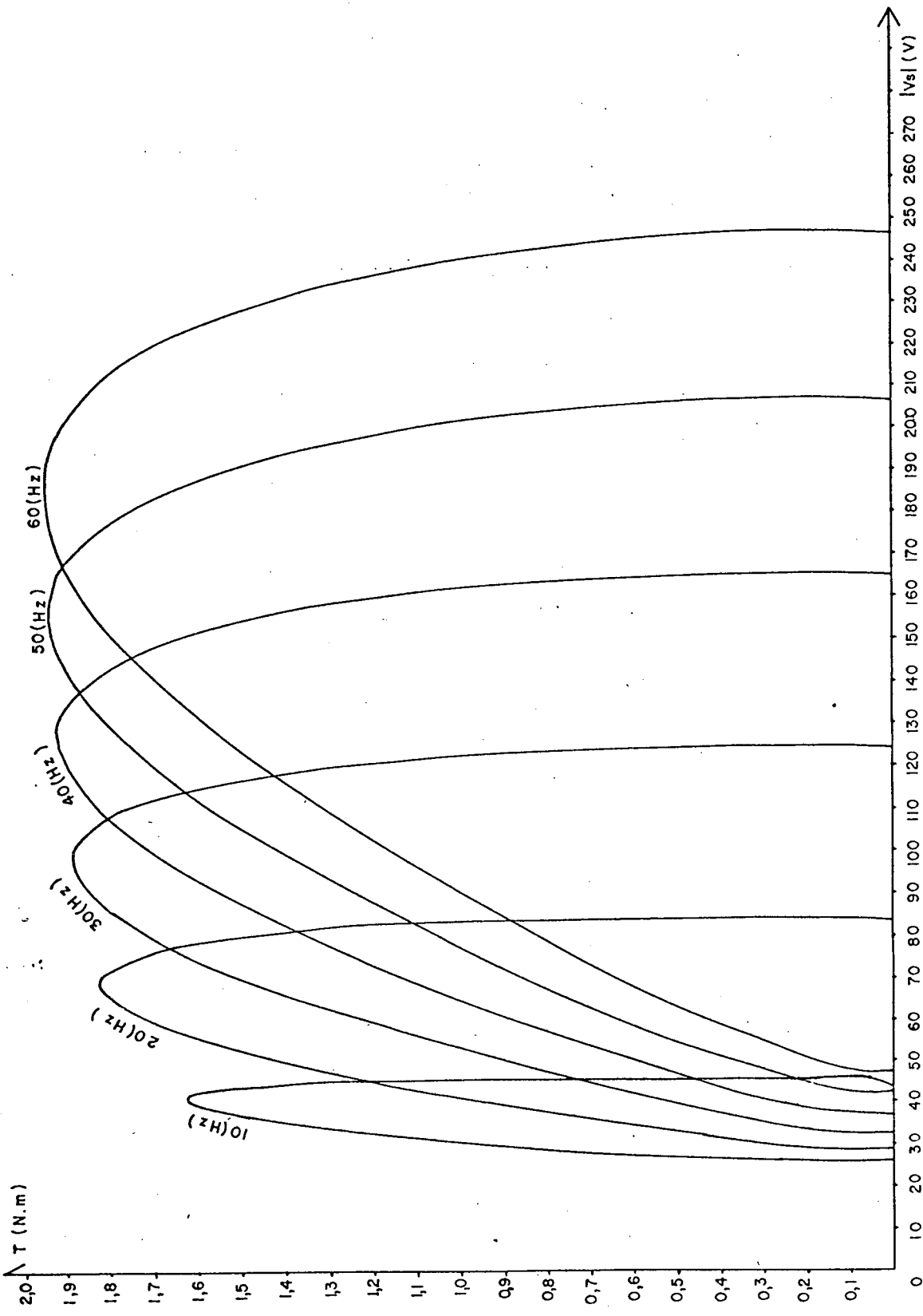


Figura 3.1-c - Curvas $T_x |V_s|$ para Frequência de Alimentação (F) Variável, para $I_s = 4,5$ A.

3.3.2 - CURVAS $|V_s| \times F$ E $|V_s| / F \times F$, PARA FREQUÊNCIA NO ROTOR (F_r)
VARIÁVEL

As curvas da figura (3.2) são obtidas utilizando a equação (3.7). Esta equação é resolvida para valores de corrente e de frequência da corrente no rotor (F_r) pré-fixados e variando-se o valor da frequência de alimentação (F) do motor monofásico de indução.

As curvas das Figuras (3.3) são obtidas tomando-se os valores encontrados no procedimento acima descrito, e dividindo-se cada valor do módulo da tensão do estator pelo valor de frequência de alimentação correspondente.

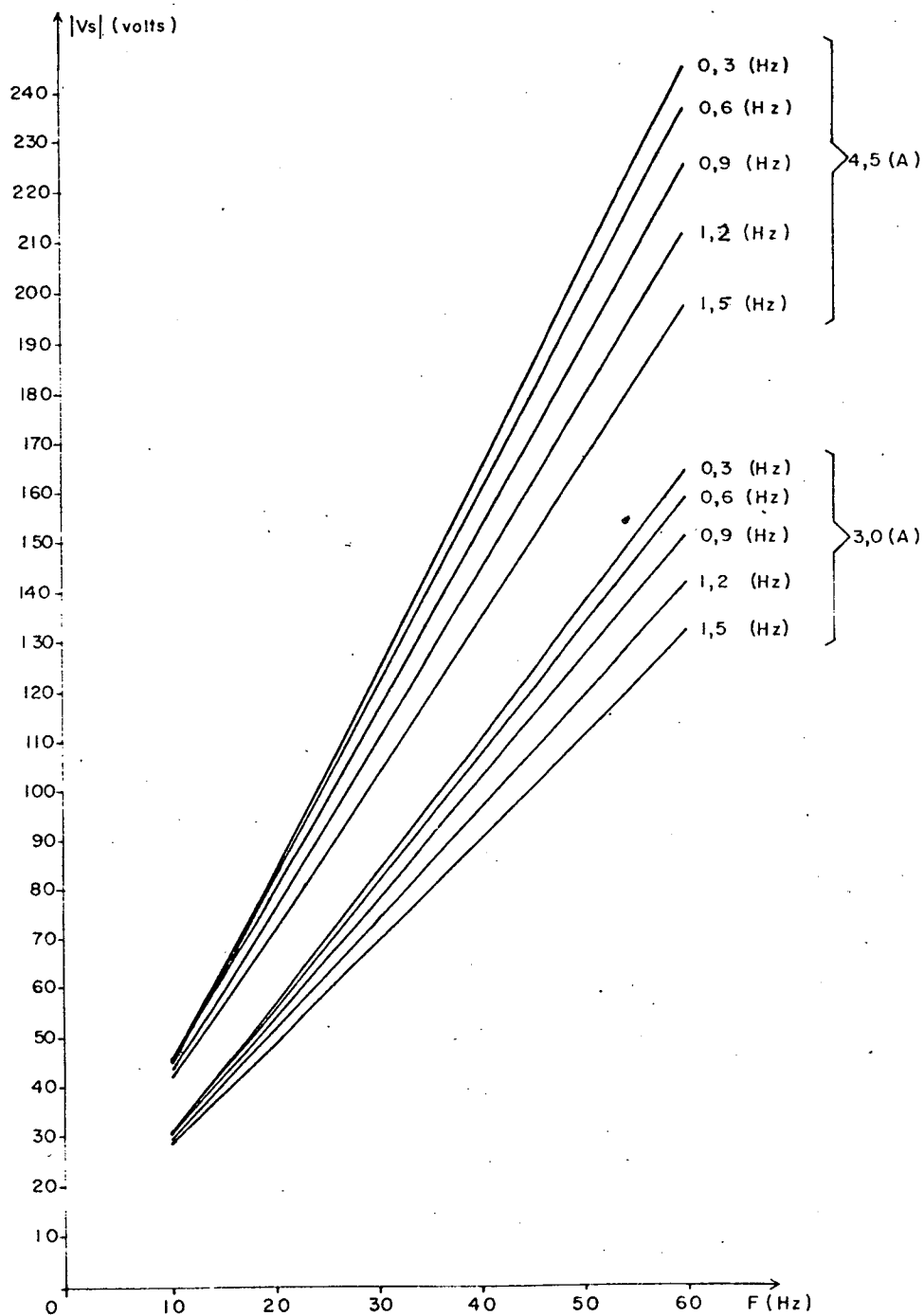


Figura 3.2 - Curvas $|V_s| \times F$ para Freqüência do Rotor (F_r) Variável,
para $I_s = 3,0$ A e $I_s = 4,5$ A.

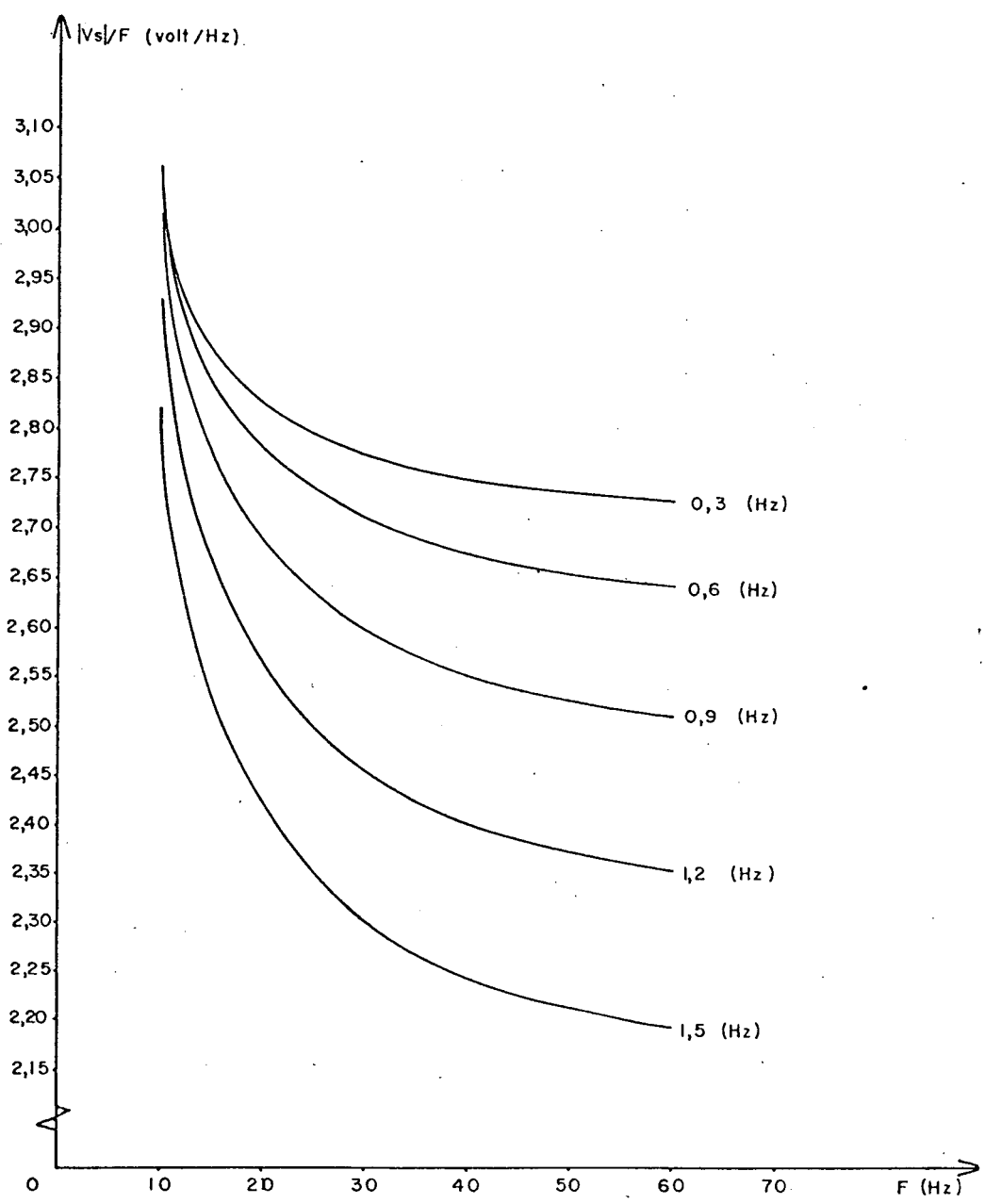


Figura 3.3-a - Curvas $|V_s|/F \times F$ para Frequência do Rotor (F_r) Variável, para $I_s = 3,0$ A.

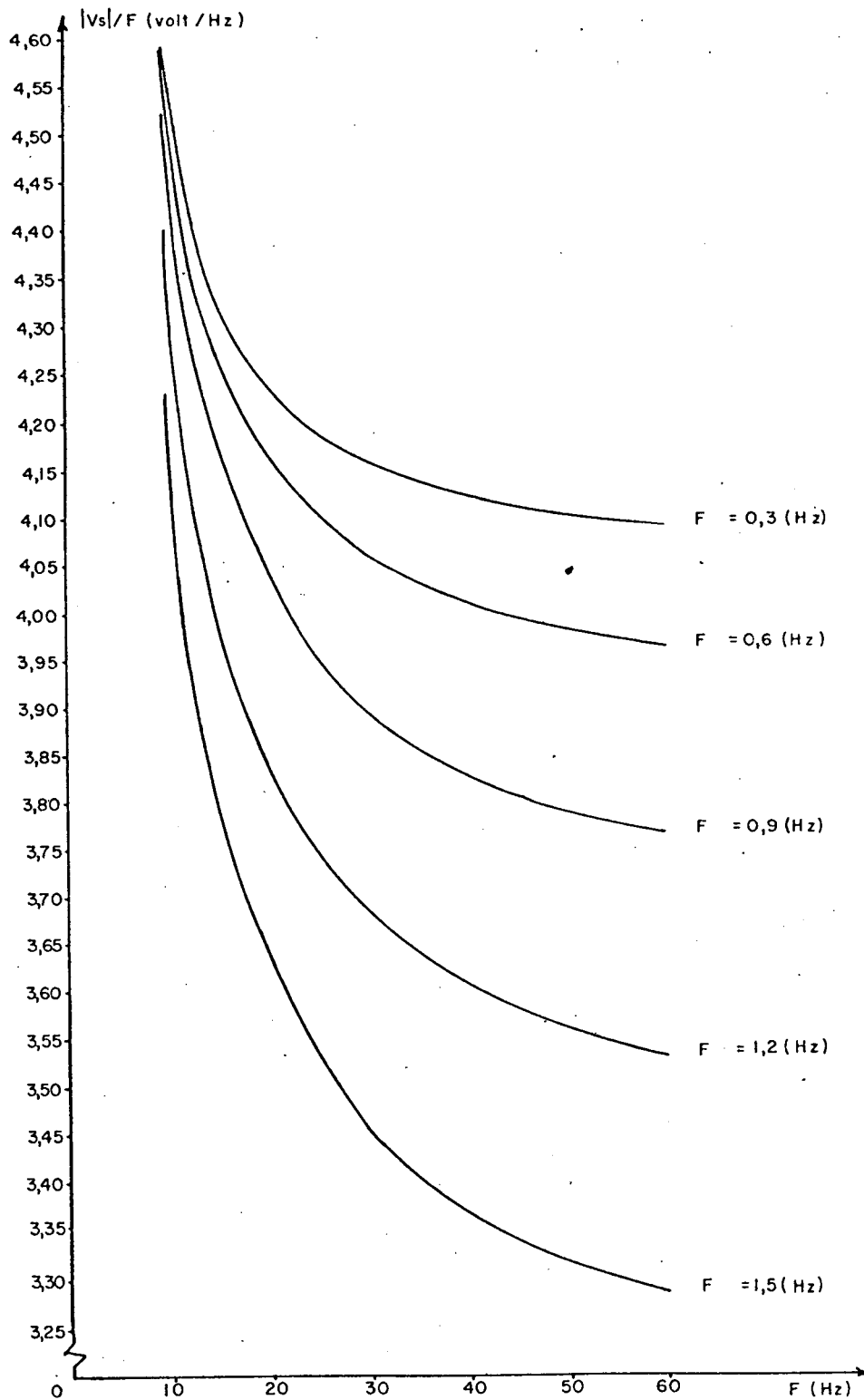


Figura 3.3-b - Curvas $|V_s|/F \times F$ para Frequência do Rotor (F_r) Variável, para $I_s = 4,5$ A.

Para traçar as Figuras (3.1) e (3.2) foi utilizado o programa BATISTA FORTRAN Apêndice B.1.

3.3.3 - CURVAS $|V_s| \times F$, PARA TORQUE MÉDIO VARIÁVEL

Através das Figuras (3.1) é obtida a variação do módulo da tensão do estator em função da frequência de alimentação do motor, para cada valor de torque médio desejado. Desta maneira são obtidas as curvas da Figura (3.4).

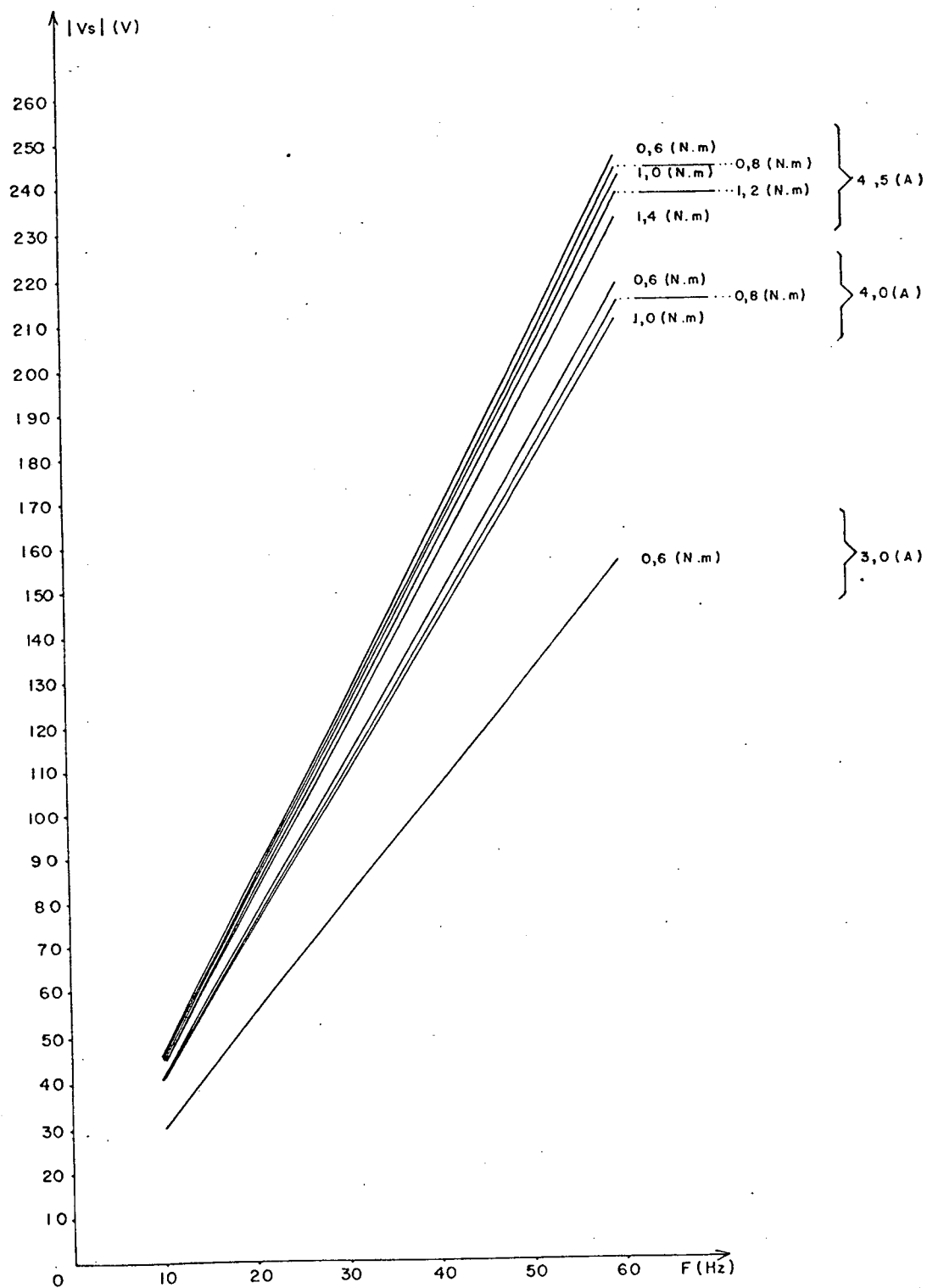


Figura 3.4 - Curvas $|V_s| \times F$ para torque variável, para $I_s = 3,0$ A,
 $I_s = 4,0$ A e $I_s = 4,5$ A.

3.3.4 - ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS OBTIDAS

Figuras 3.1 - Estas curvas são semelhantes às curvas do torque médio em função da velocidade do motor [2], e mostram que o torque médio na região de funcionamento do motor possui uma variação, aproximadamente linear, com o módulo da tensão do estator.

Figura 3.2 - Nesta Figura fica claro que, o módulo da tensão do estator é ligado à frequência de alimentação do motor, por uma lei aproximadamente linear e que, para cada frequência da corrente no rotor (F_r) existe uma inclinação distinta.

Figuras 3.3 - Nestas Figuras fica claro que a linearidade observada na Figura 3.2 é mais efetiva para valores da frequência de alimentação do motor (F) acima de 30 Hz, para valores inferiores há uma não linearidade sensível.

Figura 3.4 - Esta Figura é apenas a confirmação da Figura 3.2, tendo em conta que o torque médio é diretamente proporcional ao valor da frequência da corrente do rotor, como visto no capítulo 2.

3.4 - ESTUDO EXPERIMENTAL DE $|V_s| \times F$, PARA TORQUE VARIÁVEL

O ensaio realizado é o mesmo descrito no item 2.4 do capítulo 2.

As curvas obtidas neste ensaio estão apresentadas na Figura (3.5).

3.4.1 - ANÁLISE

As curvas da Figura (3.5) confirmam as observações feitas na análise das Figuras obtidas teoricamente, confirmando assim, que o módulo da tensão do estator e a frequência de alimentação do motor são ligadas por uma lei, que é aproximadamente linear. O que torna possível a implementação de um circuito de controle do torque médio, através do módulo de tensão do estator, muito simples.

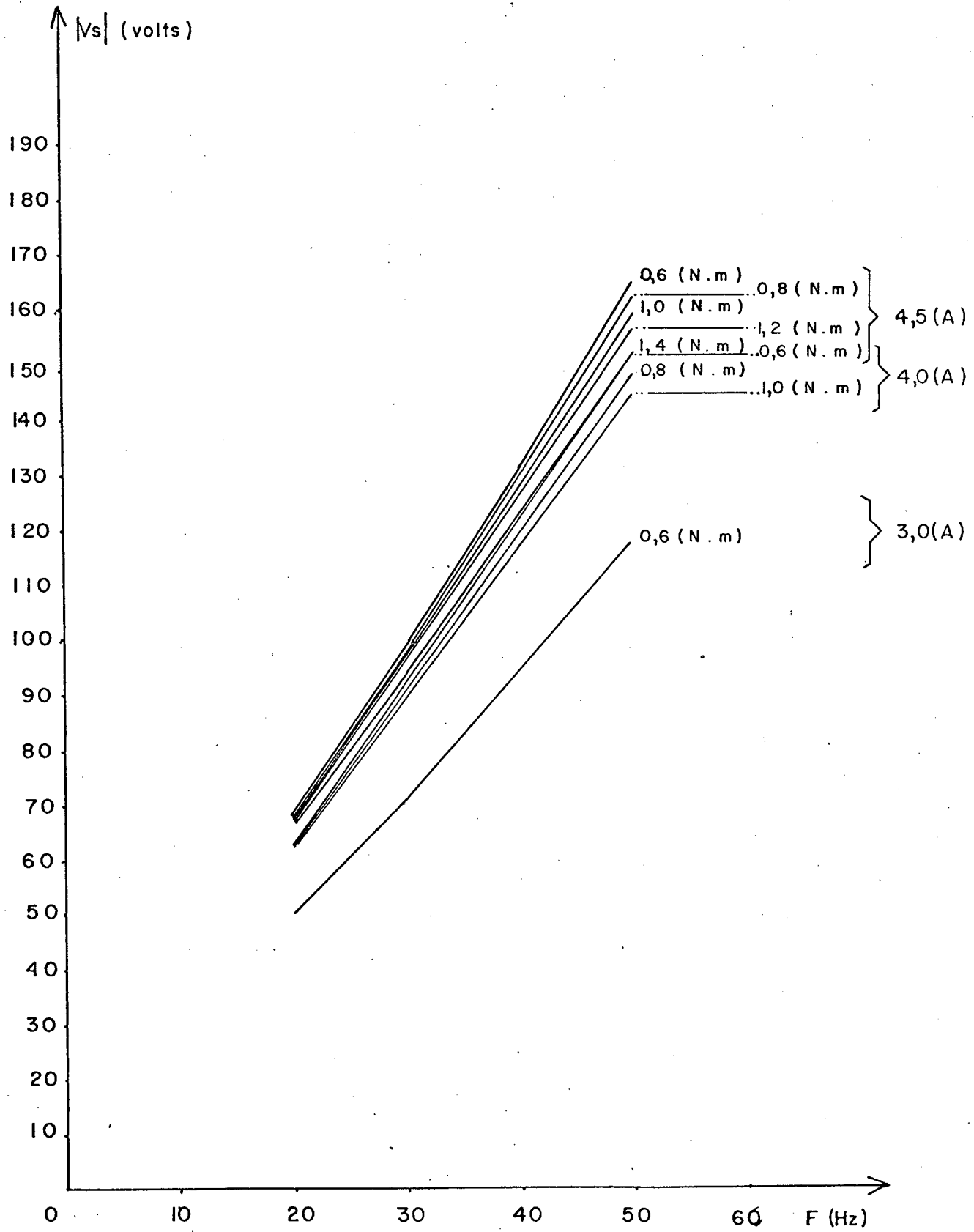


Figura 3.5 - Curvas $|V_s| \times F$ para torque variável, obtidas experimentalmente, para $I_s = 3,0$ A, $I_s = 4,0$ A e $I_s = 4,5$ A.

3.5 - MODELO SIMPLIFICADO PARA CONTROLE DO TORQUE MÉDIO ATRAVÉS DO MÓDULO DA TENSÃO DO ESTATOR

Da Figura (3.3) é obtida a equação que representa as suas curvas, esta equação é a (3.11).

$$|V_s| = \alpha (F - 7) + 30 \quad (3.11)$$

Onde:

F = Frequência de alimentação

α = Inclinação das curvas $|V_s| \times F$

Para

$$7 \text{ Hz} \leq F \leq 67 \text{ Hz}$$

$$F = \frac{|V_s| - 30}{\alpha} + 7 \quad (3.12)$$

Fazendo $\beta = \frac{1}{\alpha}$

$$F = \beta (|V_s| - 30) + 7 \quad (3.13)$$

O modelo do laboratório após a implementação da equação (3.13), está apresentado na Figura 3.7.

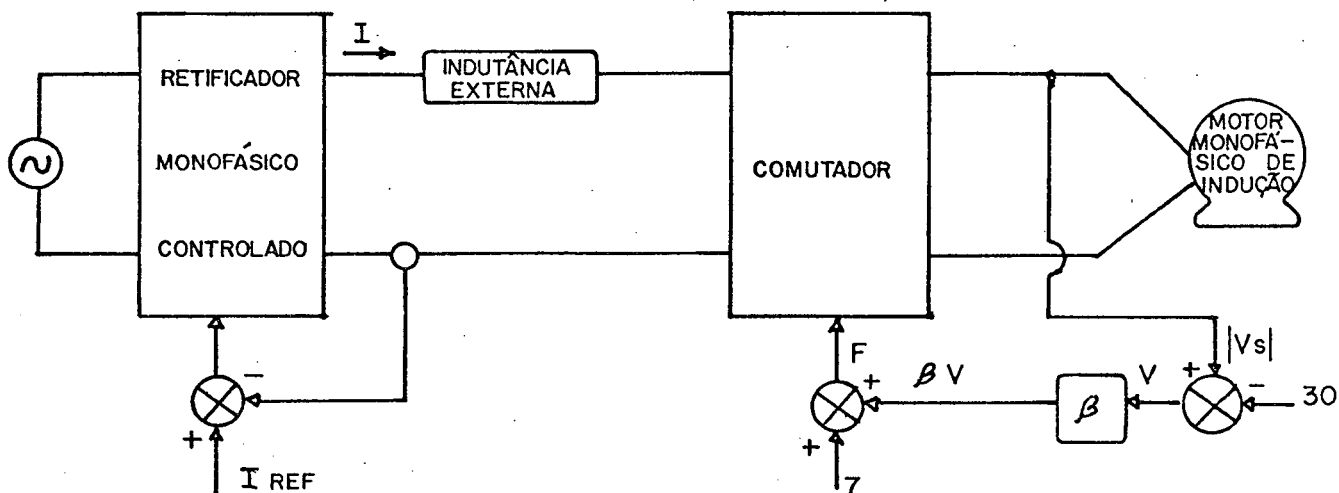


Figura 3.6 - Esquema para controle do torque através de $|V_s|$

Os valores de α e β são encontradas através de regressão linear e estão representados nas Figuras (3.7).

Nestas Figuras fica claro que, para cada valor de α existe apenas um valor de torque médio correspondente, confirmando assim, mais uma vez a viabilidade do controle proposto.

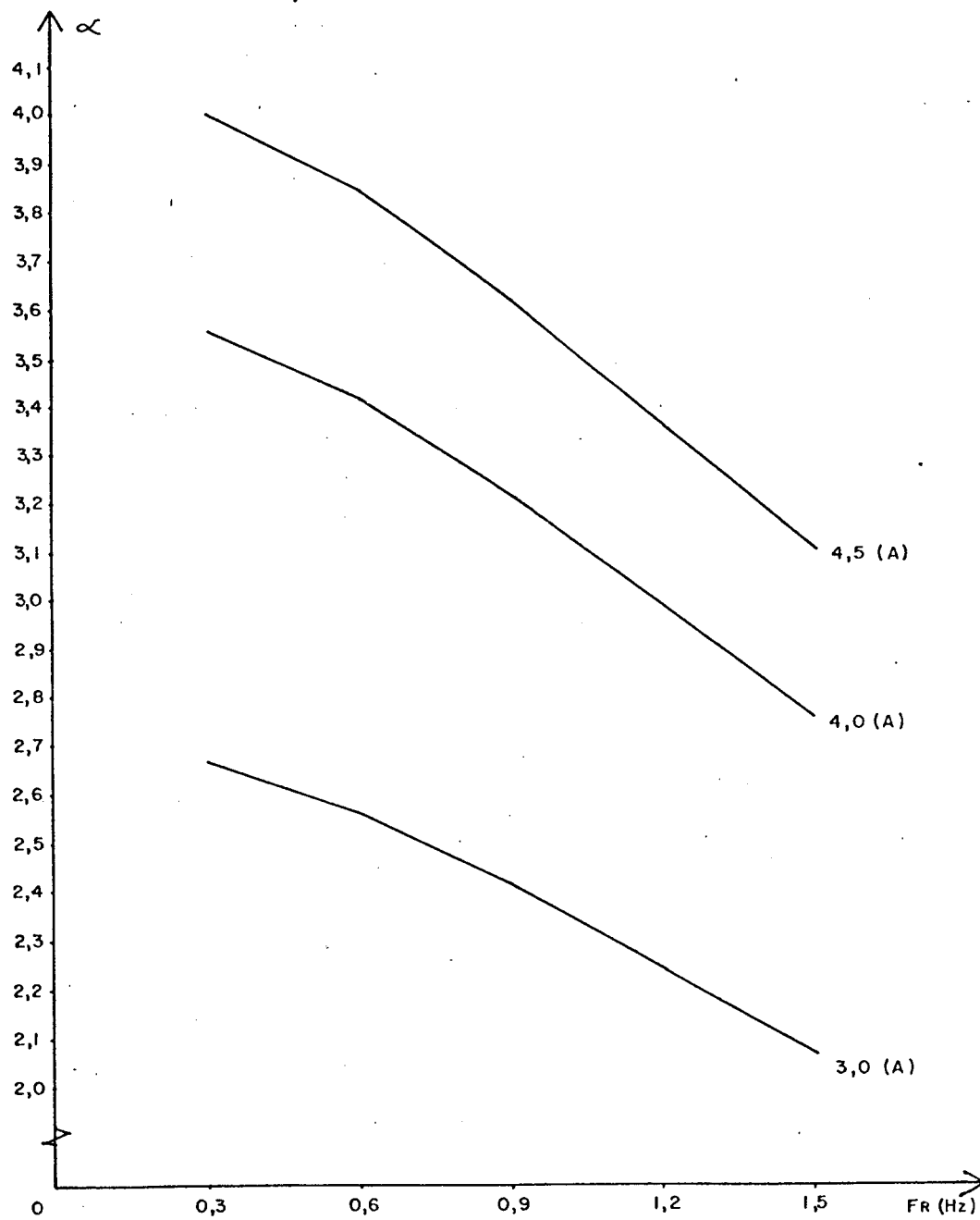


Figura 3.7-a - Curvas αFR para Is Variável.

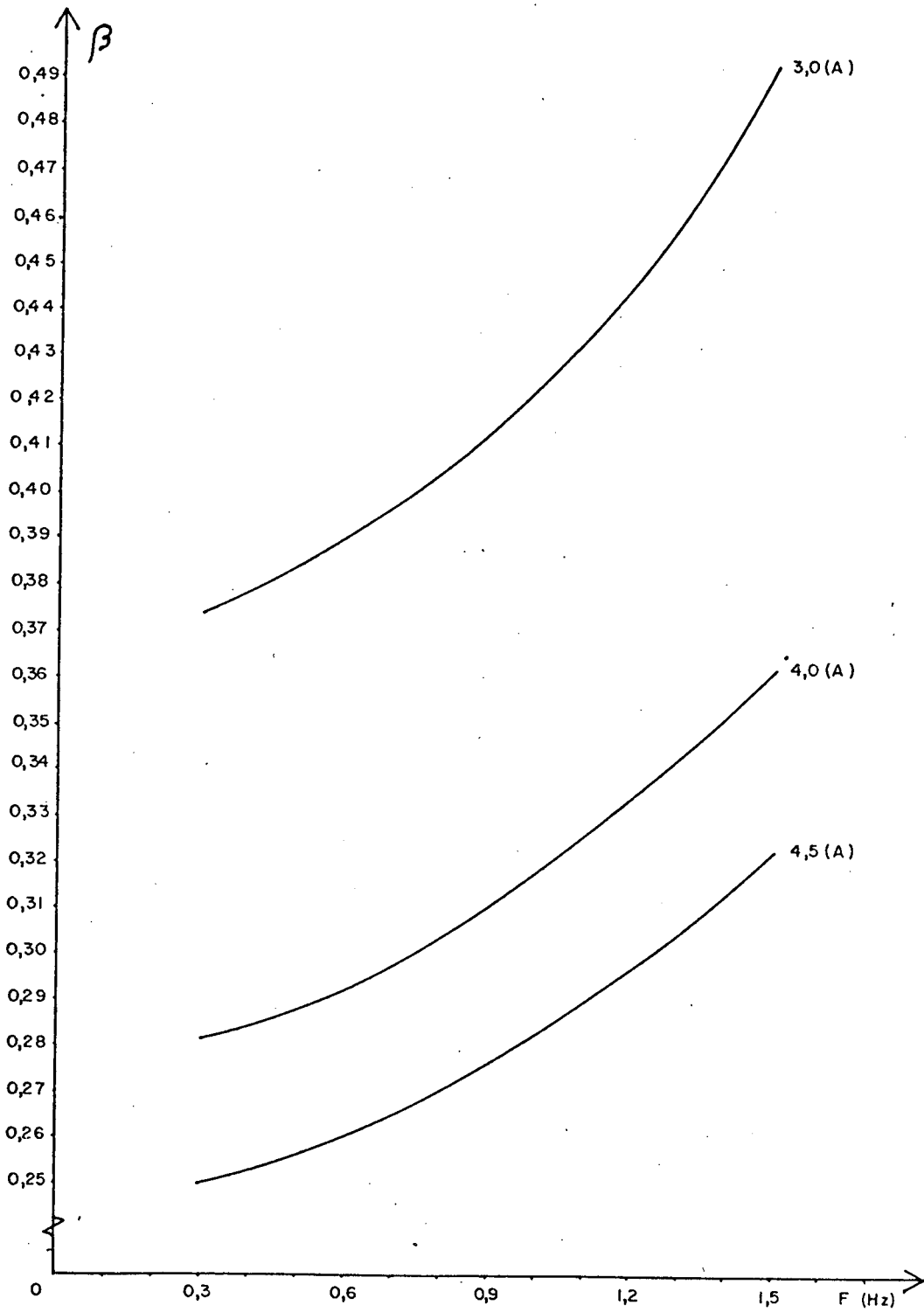


Figura 3.7-b - Curvas $\beta \times F$ para I_s Variável.

O comportamento do circuito com a equação (3.13) implementada não foi plenamente satisfatório, porque, apesar de satisfazer sob o aspecto de estabilidade ele varia muito o valor do torque médio quando é aplicada a carga. Isto ocorreu pelo que havia sido dito durante a análise das Figuras (3.4). Então, para que o controle se tornasse plenamente satisfatório foram feitos alguns ajustes em laboratório, observando o comportamento do conjunto, quando este comportamento foi considerado bom, a equação implementada ficou representada pela equação (3.14)

$$F = \beta |V_s| + 10$$

(3.14)

O modelo, após a implementação estar devidamente ajustada, está apresentado na Figura (3.8)

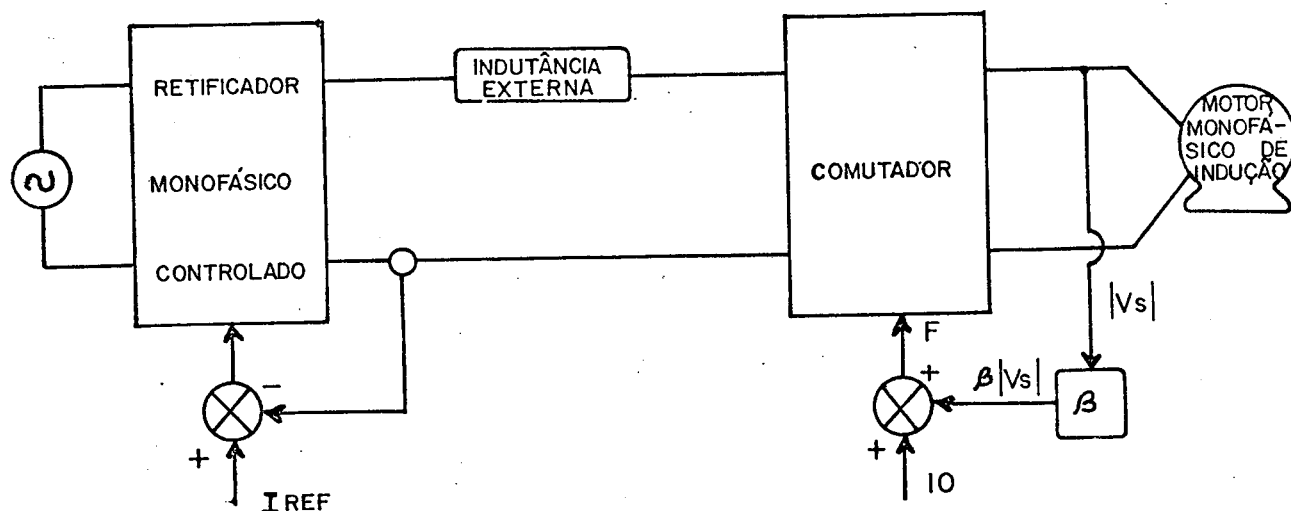


Figura 3.8 - Esquema para controle do torque através de $|V_s|$.

3.6 - IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO DE CONTROLE DO TORQUE MÉDIO ATRAVÉS DO MÓDULO DA TENSÃO DO ESTATOR

Esta implementação está apresentada em diagrama de blocos na Figura (3.9)

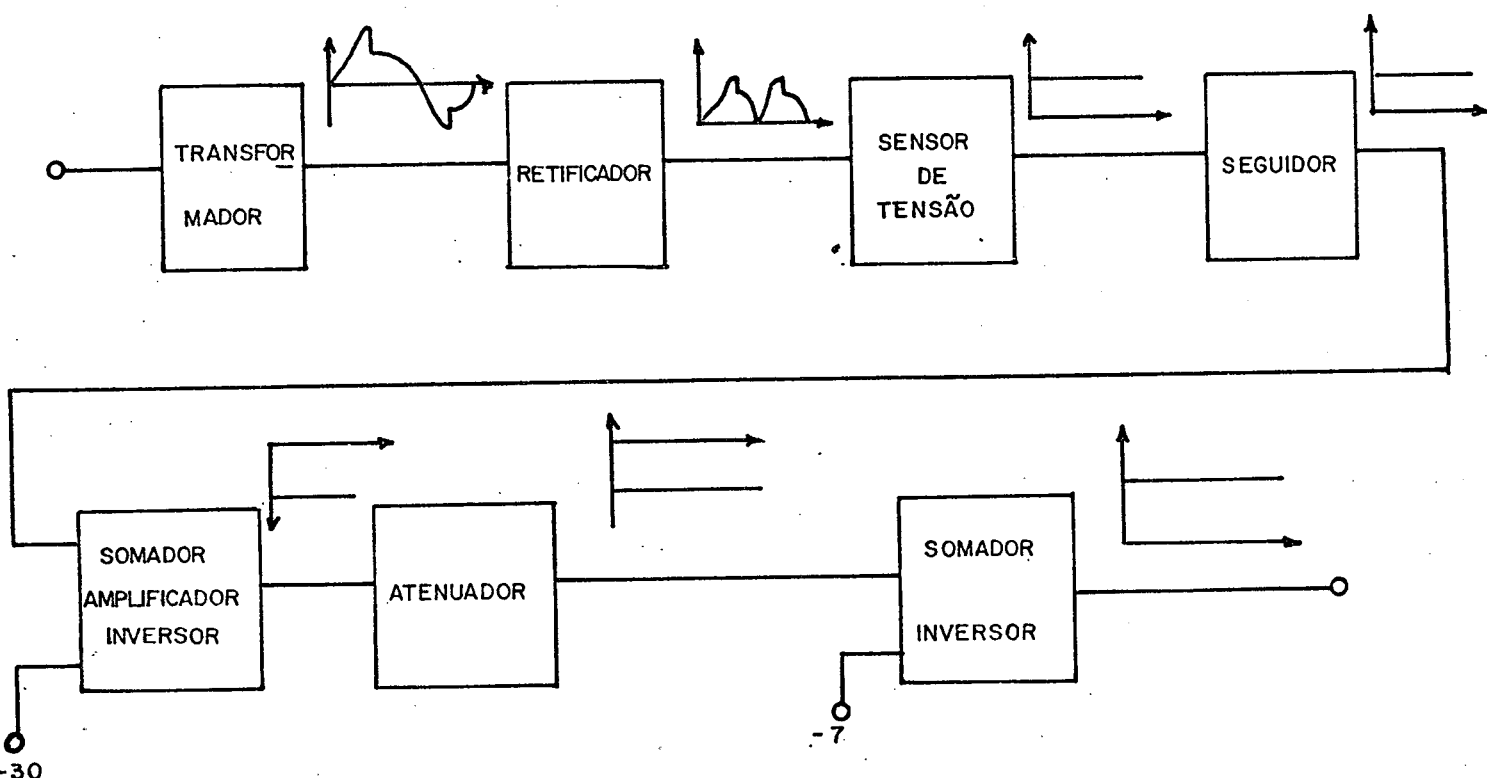


Figura 3.9 - Diagrama de blocos do regulador de torque através de $|V_s|$.

O diagrama de blocos é implementado pelo circuito apresentado na Figura (3.10).

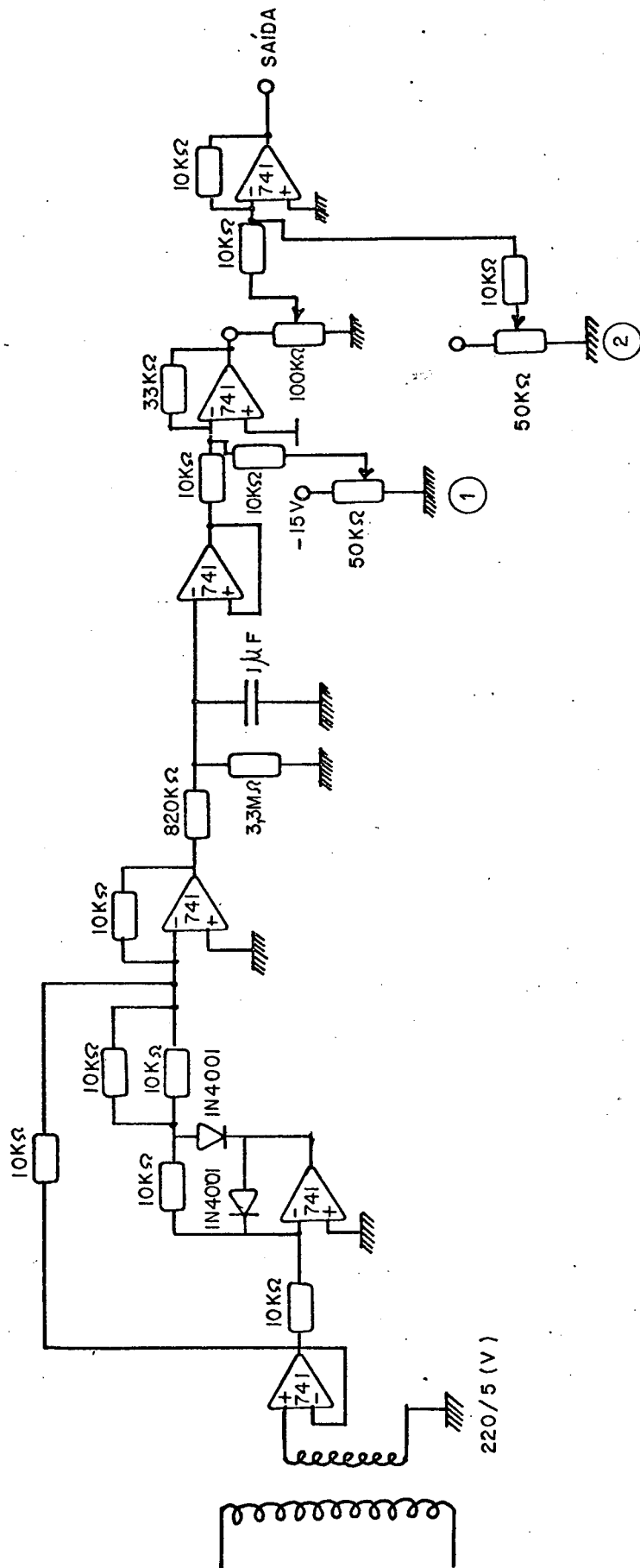


Figura 3.10 - Circuito implementado para controle de torque através de $|V_s|$.

Cada bloco do diagrama da Figura (3.9) tem a seguinte função:

1 - Transformador - Retratar a imagem da tensão que está sobre o estator do motor.

2 - Retificador - transformar a tensão alternada em uma tensão unidirecional.

3 - Sensor de Tensão - transformar esta tensão unidirecional em uma tensão contínua, imagem da tensão no circuito de potência.

4 - Seguidor - criar um caminho de alta impedância para circulação de corrente no restante do circuito.

5 - Somador-Amplificador-Inversor - adicionar a tensão que vem do seguidor, com uma tensão constante de sinal oposto, e tornar o valor desta soma compatível com o restante do circuito.

6 - Atenuador - compatibilizar o valor da tensão com o ponto de funcionamento desejado.

7 - Somador-Inversor - adicionar a tensão variável com uma tensão fixa e tornar o sinal da tensão resultante desta soma, adequado à entrada do conversor tensão-freqüência.

3.7 - ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO MOTOR, COM CONTROLE DO TORQUE MÉDIO ATRAVÉS DO MÓDULO DA TENSÃO DO ESTATOR

O material utilizado para a realização deste estudo é o mesmo que se encontra descrito no item 2.6.2, capítulo 2. Os ensaios realizados, também se encontram descritos no item já citado.

A montagem utilizada para obtenção das curvas das Figuras (3.12) e (3.13), é apresentada na Figura (3.11)

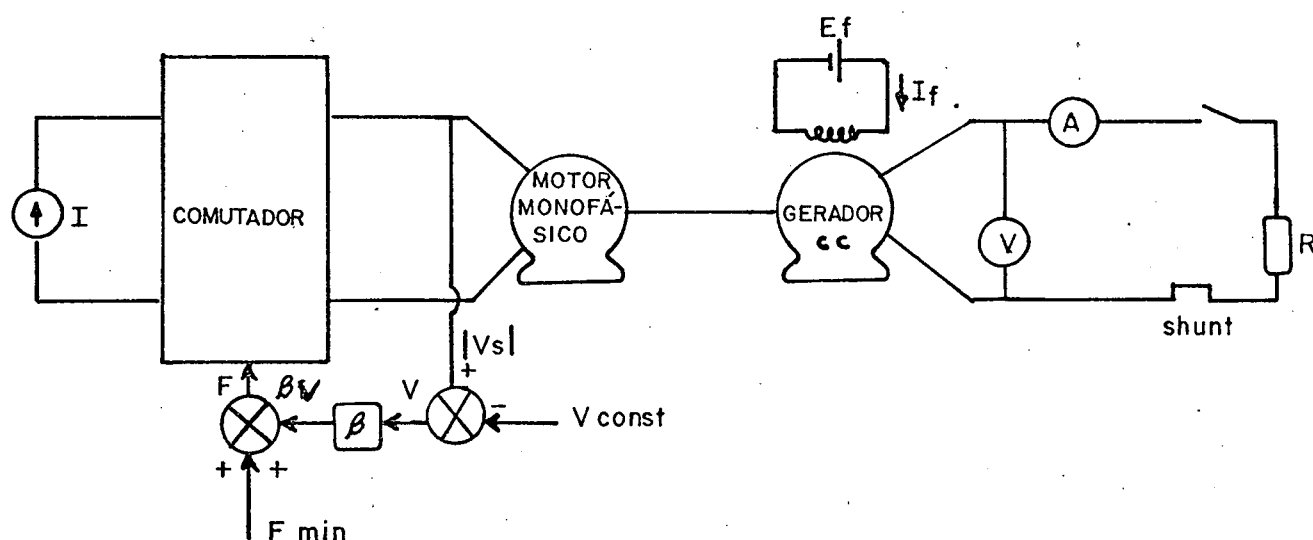


Figura 3.11 - Montagem com controle de torque através do módulo da tensão do estator.

OBSERVAÇÃO: Nas Figuras (3.12) e (3.13) os pontos assinalados, são os pontos onde o torque de carga (T_L) é aplicado.

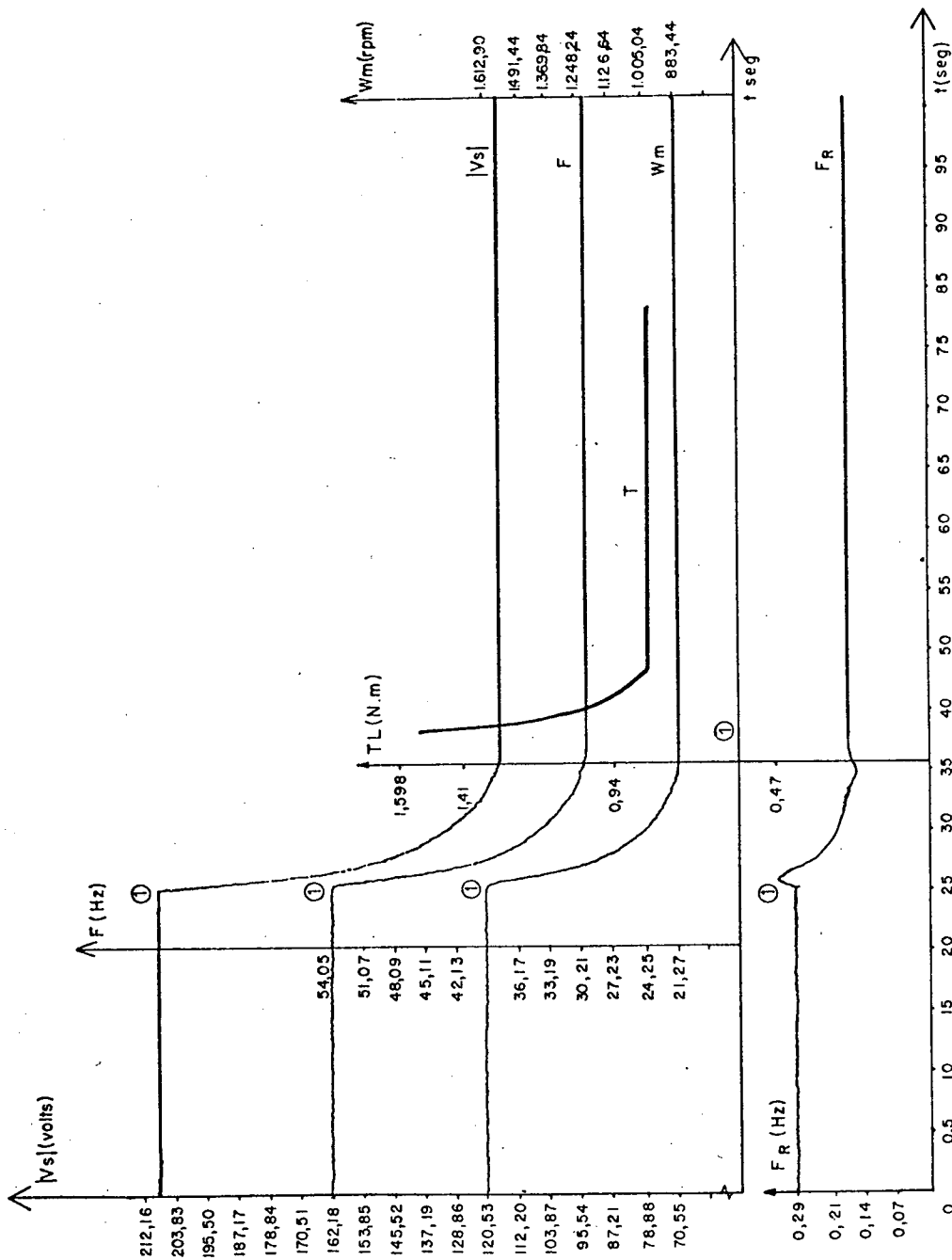


Figura 3.12-a - Controle através do Módulo da Tensão do Estator, 1º Caso.

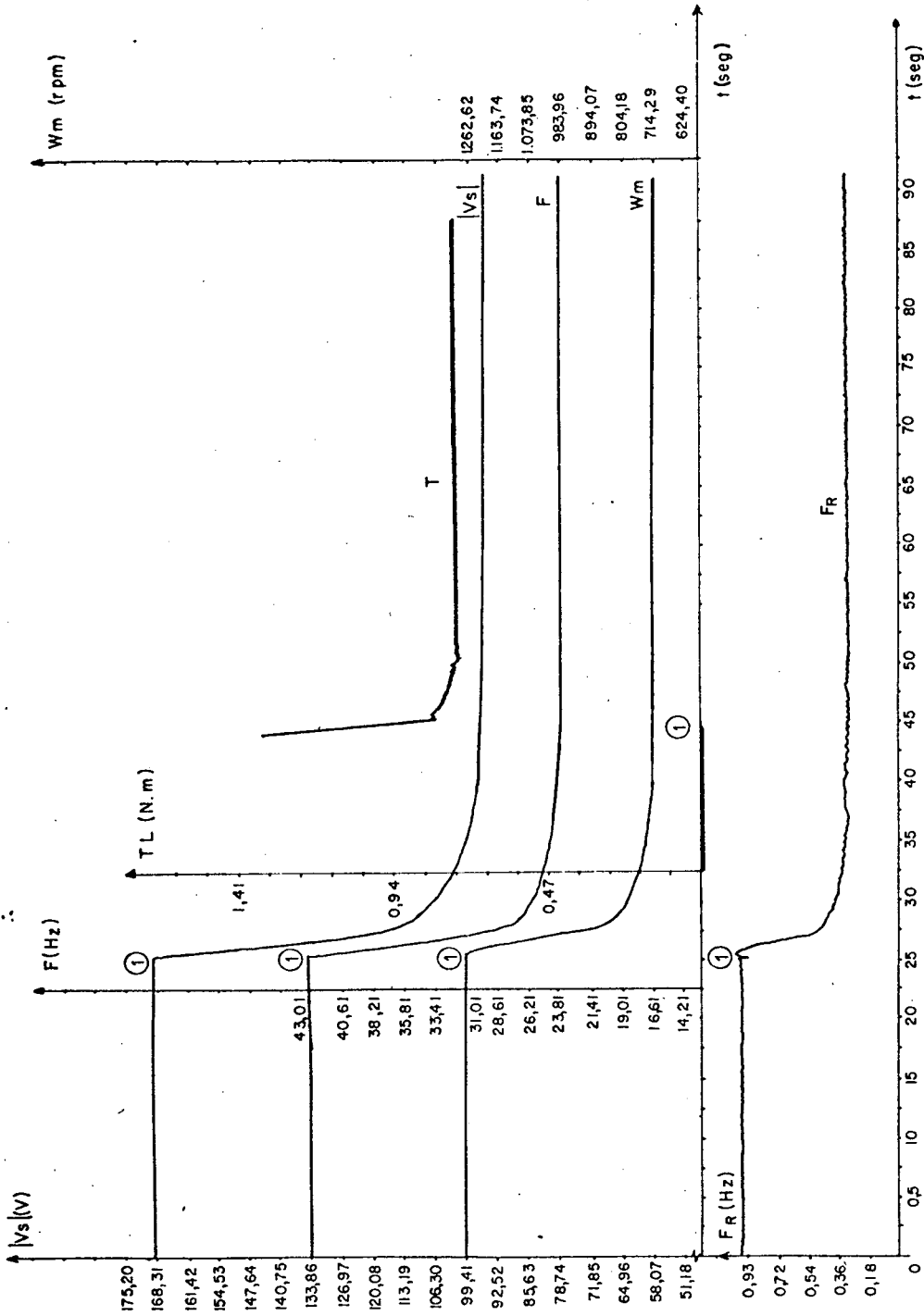


Figura 3.12-b - Controle através do Módulo da Tensão do Estator, 2º Caso.

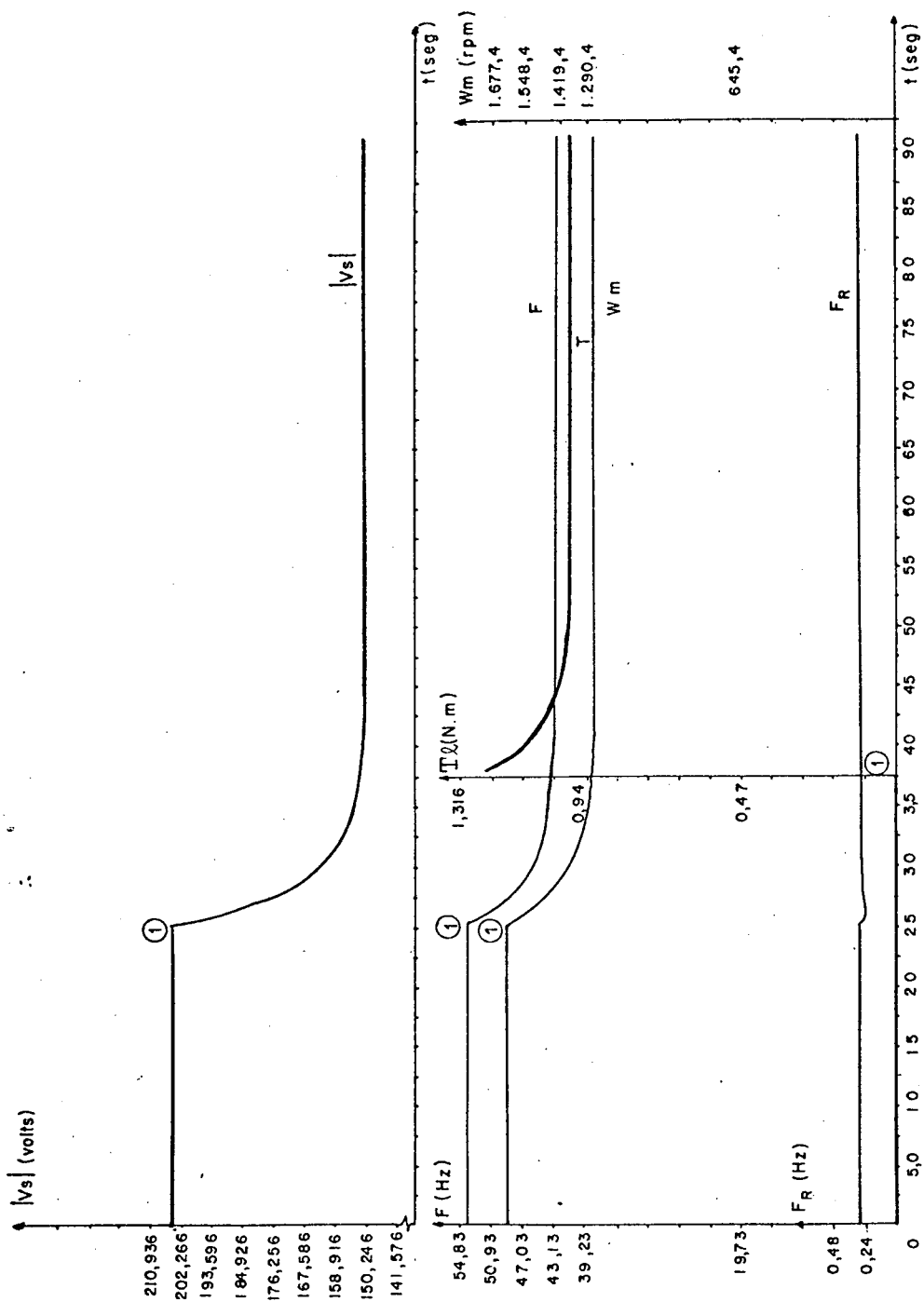


Figura 3.13-a - Controle através de $|V_s|$, 1º Caso.

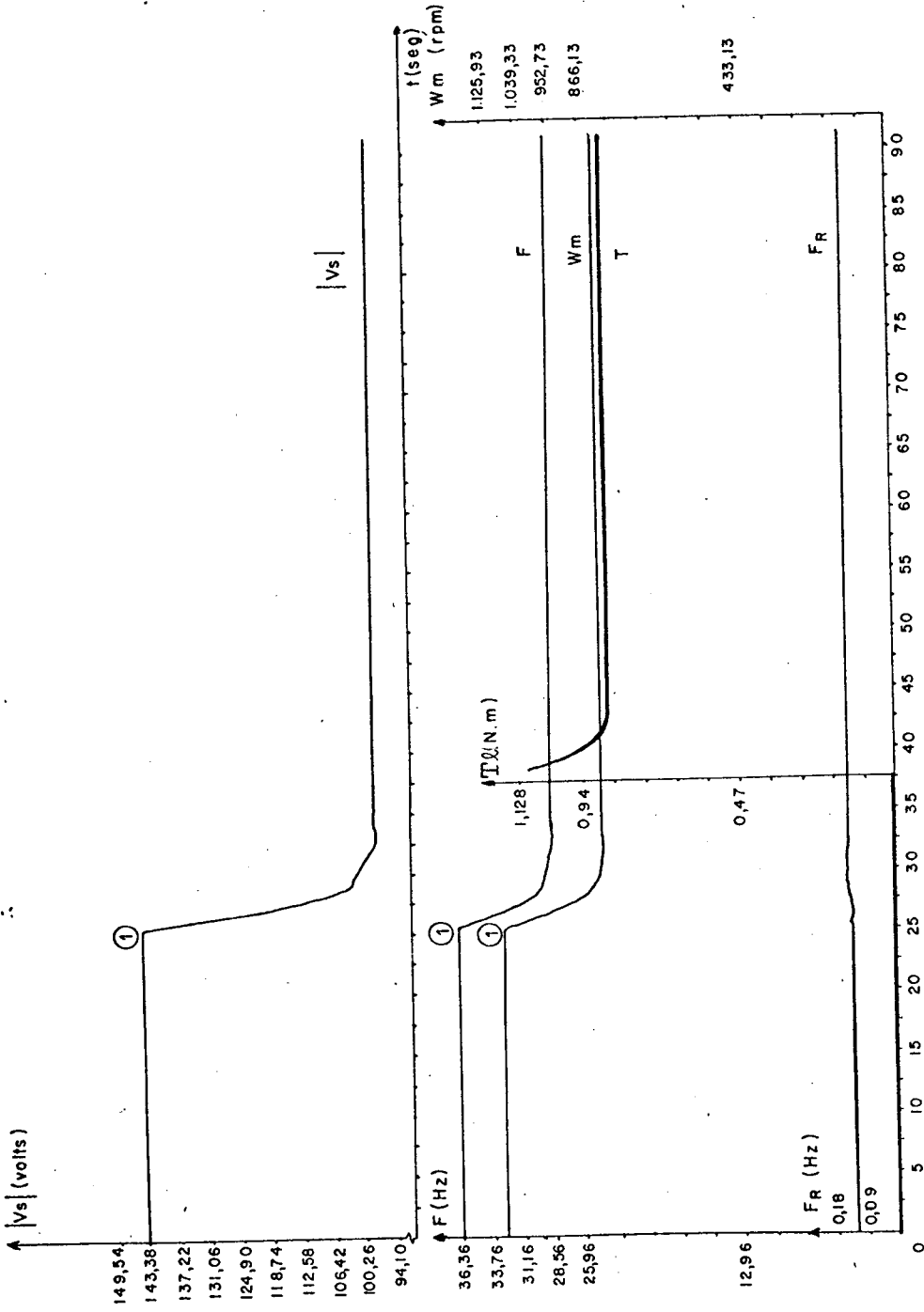


Figura 3.13-b - Controle através de $|V_s|$, 2º Caso.

3.7.1 - ANÁLISE DAS CURVAS OBTIDAS

Figuras 3.12 - Nestas Figuras fica claro que o comportamento do motor, quando da implementação da equação (3.13), não é plenamente satisfatório, embora os resultados sejam coerentes com o esperado. O torque não é mantido constante quando há uma variação da carga.

Figuras 3.13 - Estas Figuras representam a implementação da equação (3.14), e nelas fica claro que as modificações introduzidas no comando tornam o comportamento do motor plenamente satisfatório, isto é, esta implementação resolve os problemas de estabilidade existentes. Neste caso há uma variação muito pequena do torque que o motor produz, quando a carga é aplicada.

3.8 - CONCLUSÕES

À partir dos estudos teóricos e experimentais realizados, que foram descritos neste capítulo, podemos estabelecer as seguintes conclusões:

- a) O controle do torque médio do motor, através do controle do módulo da tensão do estator do motor assegura o funcionamento estável.
- b) A representação das curvas da Figura (3.2), pela equação (3.14), apesar de fugir um pouco à realidade na região de baixas frequências, é plenamente

satisfatória para a faixa total de funcionamento do motor.

c) O circuito implementado para controlar o torque é simples e robusto, sendo adequado para emprego industrial.

d) O método estudado, pelo seu desempenho e simplicidade, pode ser empregado para a alimentação e o controle do motor monofásico de indução, na atividade industrial.

C A P Í T U L O I V

ESTUDO DO CONTROLE DE VELOCIDADE

4.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é encontrar um modelo simplificado para o conjunto comutador-motor, para controle de velocidade.

De posse deste modelo fazer a implementação do controle.

Obter experimentalmente as características do conjunto e comparar com os valores teóricos.

4.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS

O diagrama de blocos para o controle de velocidade esta apresentado na Figura (4.1).

A parte de controle apresentada no diagrama de blocos da Figura (4.1) é dividida em duas partes distintas, que estão apresentadas nas figuras (4.2) e (4.3).

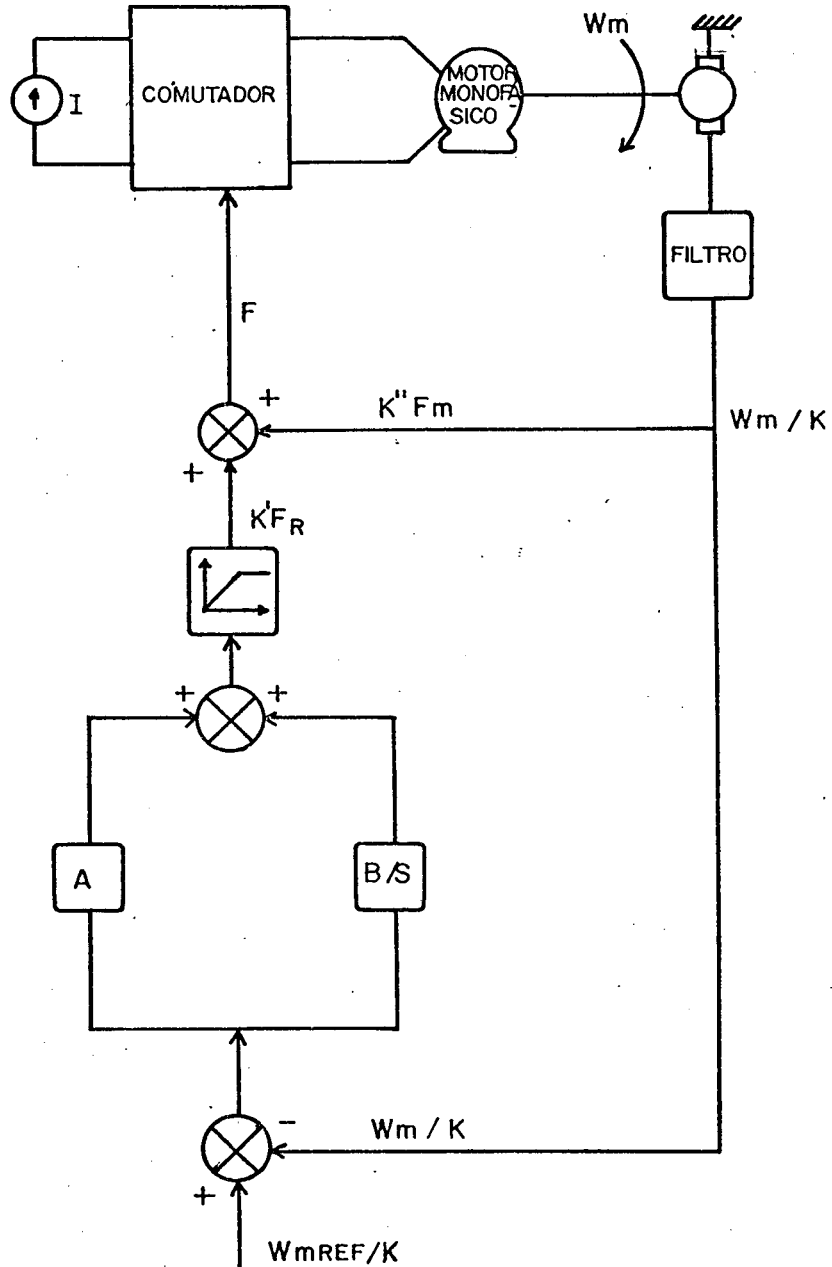


Figura 4.1 - Motor Monofásico de Indução com controle de velocidade.

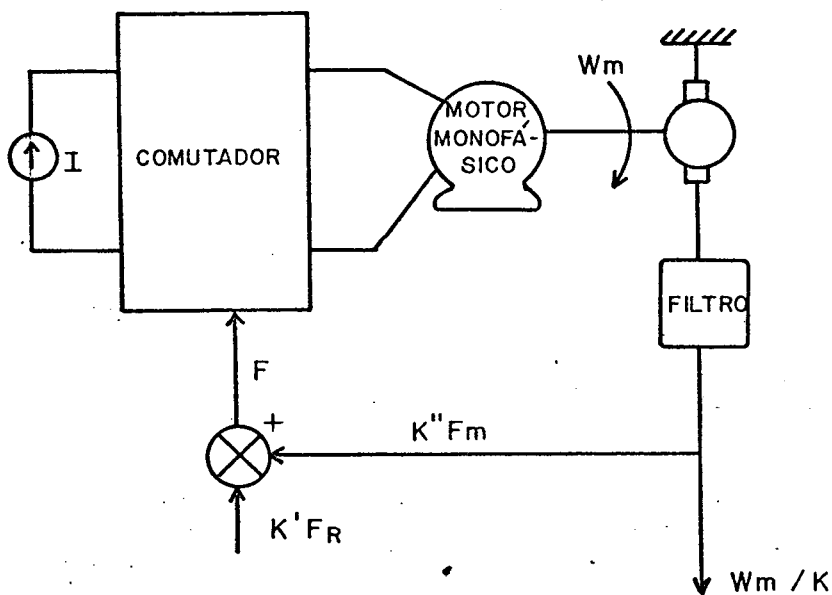


Figura 4.2 - Diagrama de blocos da parte do circuito de controle de velocidade que faz o controle do torque médio, através do controle da frequência da corrente rotórica.

A primeira parte do circuito, de controle de velocidade, apresentada na Figura (4.2), é destinada ao controle do torque médio através do controle da frequência da corrente rotórica. Esta parte foi desenvolvida e explicada no capítulo 2.

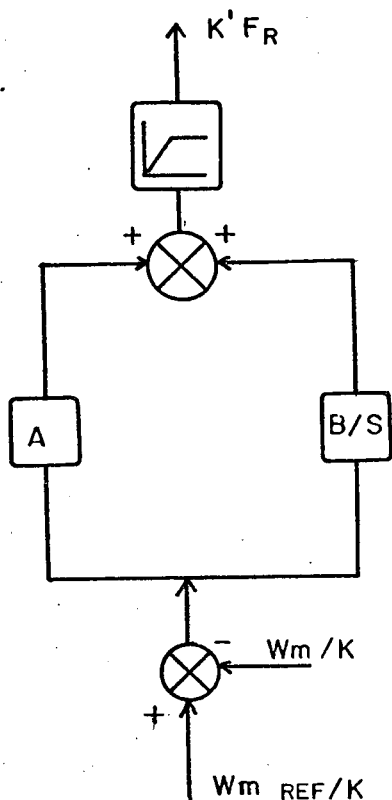


Figura 4.3 - Diagrama de blocos da parte do circuito de controle de velocidade, destinada a comparar a velocidade medida com a desejada.

A segunda parte do circuito de controle de velocidade, apresentada na Figura 4.3, é destinada a comparar a velocidade no eixo do motor com a velocidade de referência, fazendo com esta diferença o controle da velocidade do motor. Esta comparação é feita do seguinte modo:

- a) A tensão proporcional à velocidade no eixo do

motor é subtraída da tensão proporcional à velocidade de referência, determinando o erro existente.

- b) Este erro é introduzido no proporcional-integral, que é representado por dois ganhos (A = ganho do proporcional e B = ganho do integral) e um somador, que procura reduzi-lo a zero.
- c) Depois do proporcional-integral existe um limitador de saturação, o qual limita o valor da saída deste conjunto, de maneira que se o erro é muito grande, este valor não assume valores acima do máximo permitido para que não ocorra problemas de estabilidade.
- d) O valor do erro é que determinará o valor do torque médio necessário para manter o motor na velocidade desejada.

4.3 - MODELAGEM

Da Figura (4.1) é tirada a equação (4.1).

$$K'Fr(s) = (A + B/s) \epsilon(s) \quad (4.1)$$

Passando para o domínio do tempo:

$$K'Fr = A\epsilon + B\int\epsilon dt \quad (4.1-a)$$

Novamente da Figura (4.1) é tirada a equação (4.2).

$$\epsilon = \frac{\omega_{mref}}{K} - \frac{\omega_m}{K} \quad (4.2)$$

Em [1] é encontrada a equação (4.3)

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + D \omega_m + T_l = T_m \quad (4.3)$$

No capítulo 2 a equação (2.30) fornece o valor do torque médio do motor, que é a equação (4.4).

$$T_m = K_4 Fr \quad (4.4)$$

Onde:

$$K_4 = \frac{1}{3} \frac{n m s r^2 I_s^2 2\pi}{R_r}$$

No capítulo 2 a equação (2.57) fornece o valor do torque de carga, que é a equação (4.5)

$$T_l = K_l \omega_m \quad (4.5)$$

Substituindo as equações (4.4) e (4.5) na equação (4.3) é encontrada a equação (4.6).

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + (D + K_l) \omega_m = K_4 Fr \quad (4.6)$$

Derivando a equação (4.6) em relação ao tempo é en contrada a equação (4.7).

$$J \frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + (D + K\ell) \frac{d\omega_m}{dt} = K_4 \frac{dFr}{dt} \quad (4.7)$$

Substituindo a equação (4.1-a) na equação (4.7) é en contrada a equação (4.8).

$$J \frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + (D + K\ell) \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_4 A}{K'} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{K_4 B}{K'} \varepsilon \quad (4.8)$$

Substituindo a equação (4.2) na equação (4.8) é en contrada a equação (4.9).

$$J \frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + (D+K\ell) \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_4 A}{KK'} \frac{d\omega_{mref}}{dt} - \frac{K_4 A}{KK'} \frac{d\omega_m}{dt} + K_4 B \frac{\omega_{mref}}{KK'} - \frac{K_4 B}{KK'} \omega_m \quad (4.9)$$

$$\frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + \left(\frac{D+K\ell}{J} + \frac{K_4 A}{J K K'} \right) \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{K_4 B}{J K K'} \omega_m = \frac{K_4 A}{J K K'} \frac{d\omega_{mref}}{dt} + \frac{K_4 B}{J K K'} \omega_{mref} \quad (4.10)$$

A equação (4.10) é a equação diferencial que represen ta o sistema que deve ser implementado. Trata-se de uma equação diferencial de 2ª ordem. Para o projeto é normalizada na forma da equação (4.11).

$$\frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + 2m\omega_0 \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_0^2 \omega_m = 0 \quad (4.11)$$

Colocando a equação (4.10) na forma da (4.11) é obtida a equação (4.12).

$$\frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + \left(\frac{D+K\ell}{J} + \frac{K_4 A}{J K K'} \right) \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{K_4 B}{J K K'} \omega_m = 0 \quad (4.12)$$

Comparando a equação (4.12) com a (4.11) são encontradas as equações (4.13) e (4.14).

$$2 m \omega_0 = \frac{D + K\ell}{J} + \frac{K_4 A}{J K K'} \quad (4.13)$$

$$\omega_0^2 = \frac{K_4 B}{J K K'} \quad (4.14)$$

Onde:

ω_0 = pulsação natural;

m = constante relativa de amortecimento;

$A = \frac{R_2}{R_1}$ = ganho do proporcional;

R_1

$B = \frac{1}{R_1 C}$ = ganho do integral.

$R_1 C$

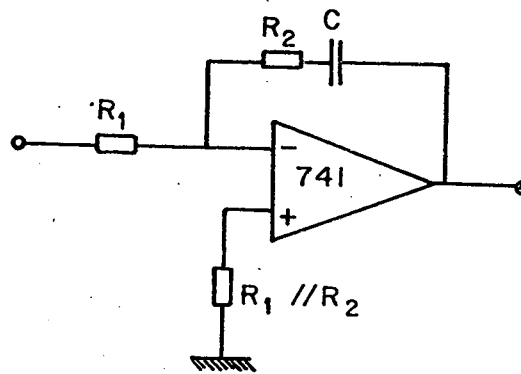


Figura 4.4 - Regulador Proporcional-Integral.

Mas, a implementação do controle foi feita experimentalmente, observando o melhor compromisso tempo de estabilização/oscilação.

4.4 - CIRCUITO DE CONTROLE DE VELOCIDADE

O circuito de controle de velocidade do motor monofásico de indução é o da Figura (4.5).

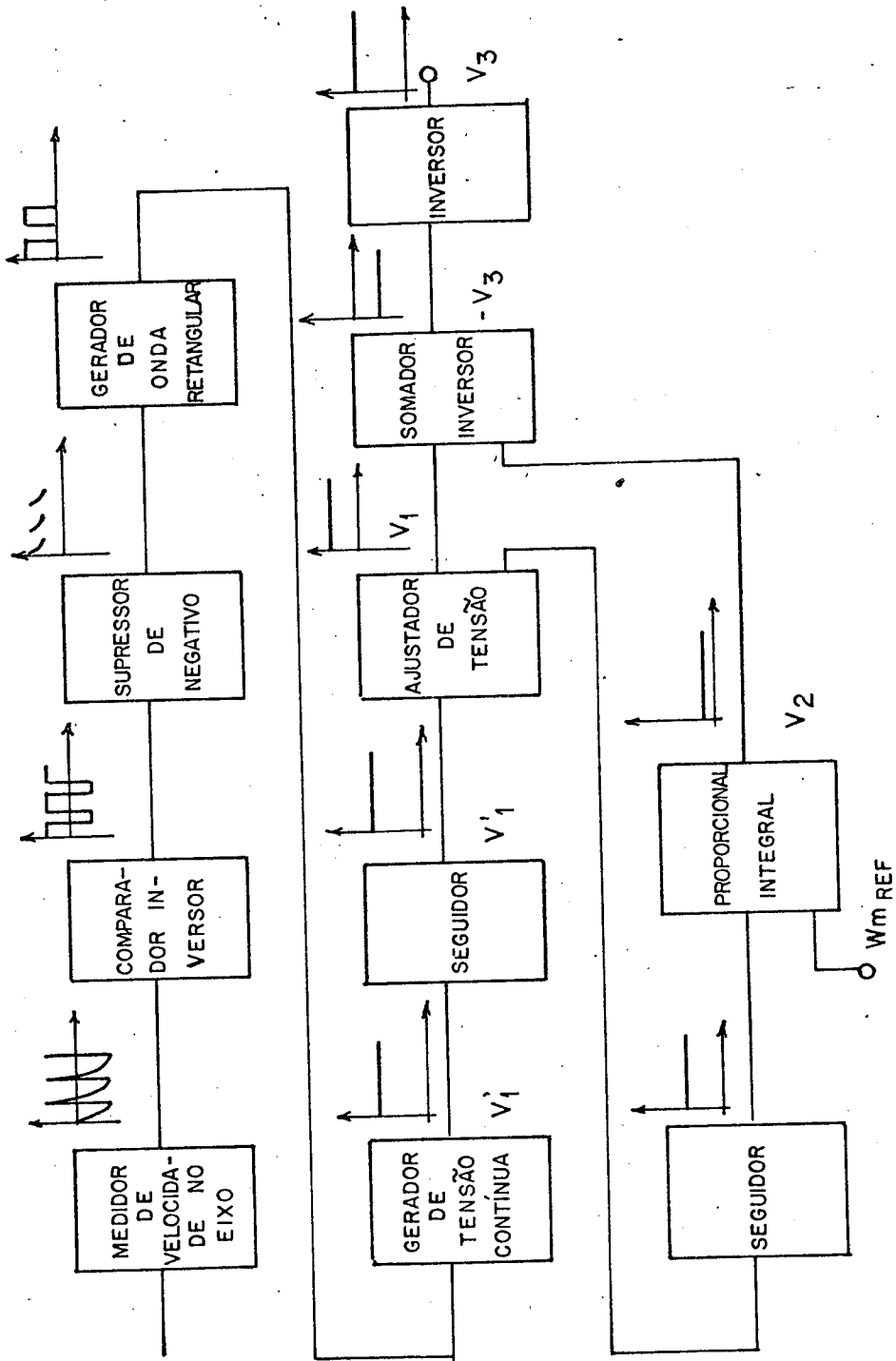


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do controle de velocidade através da frequência no rotor (Fr).

O diagrama de blocos é implementado pelo circuito da Figura (4.6).

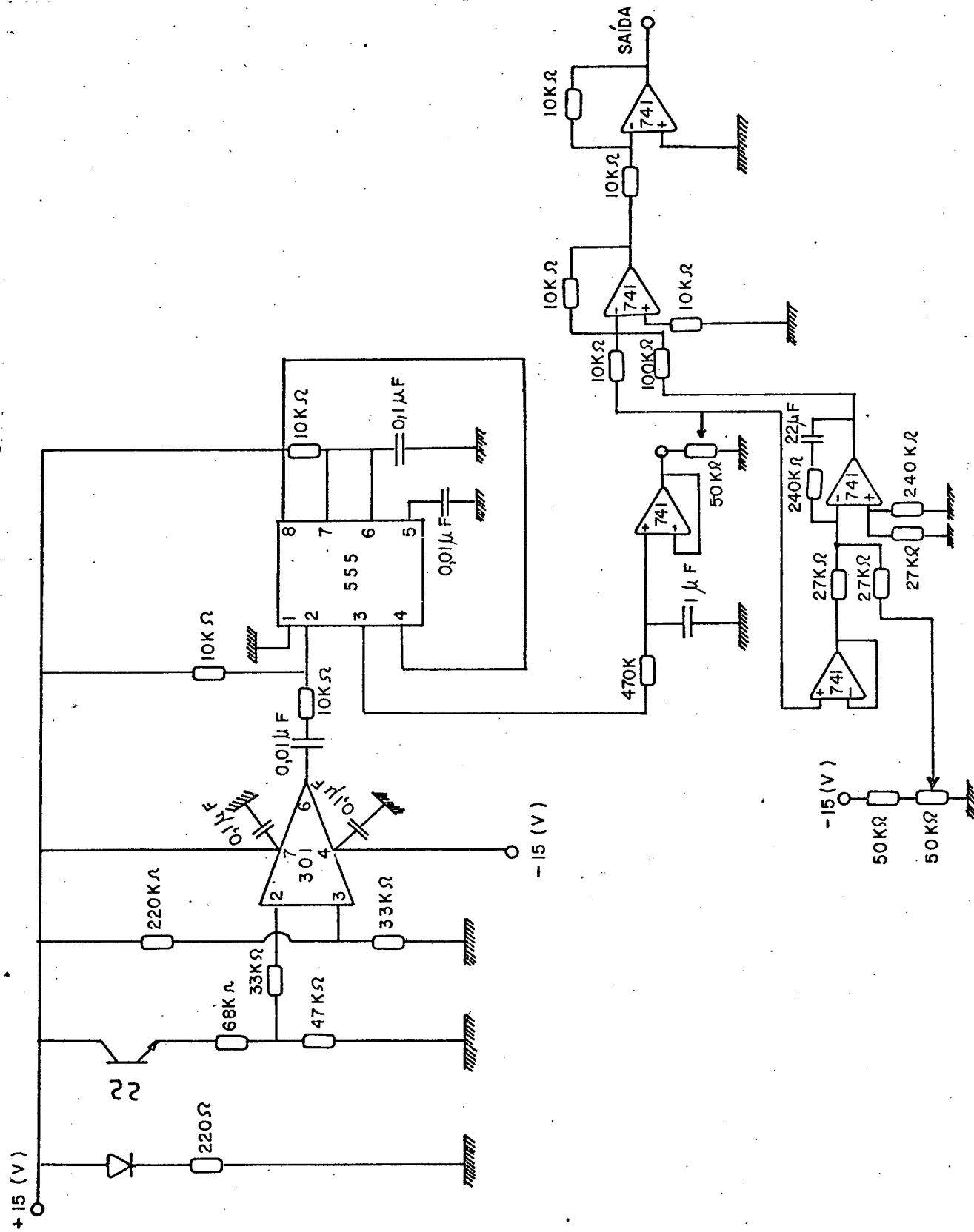


Figura 4.6 - Circuito implementado para o controle de velocidade através de Fr.

Cada bloco do diagrama de blocos da Figura (4.5), tem o seguinte significado:

- a) Medidor de Velocidade no Eixo - retratar a velocidade do eixo do motor através de pulsos.
- b) Comparador-inversor - transformar os pulsos, que saem do medidor de velocidade, em uma onda retangular de frequência variável porém de valor médio constante.
- c) Supressor de Negativo - deixar passar apenas a parte positiva da onda retangular, transformando-a em pulsos.
- d) Gerador de Onda Retangular - transformar os pulsos em uma onda retangular onde o semi-período de valor de tensão V é constante, porém o período é variável, variando portanto o valor médio da onda.
- e) Gerador de Tensão Contínua - transformar a onda retangular em um valor contínuo.
- f) Seguidor - criar um caminho de alta impedância para circulação de corrente no restante do circuito.

- g) Ajustador de Tensão - levar o valor da tensão para um valor adequado ao bom funcionamento do circuito.
- h) Proporcional-integral - fazer com que a diferença entre a imagem da velocidade no eixo e a velocidade desejada, tenda à zero, ou seja, o motor trabalhar à uma velocidade igual a velocidade de referência.
- i) Somador-inversor - adicionar e inverter os dois valores de tensão.
- j) Inversor - tornar o sinal positivo, para que possa entrar no conversor tensão-freqüência.

4.5 - ESTUDO EXPERIMENTAL

O material utilizado para a realização desta experiência está descrito no capítulo 2, ítem 2.6.

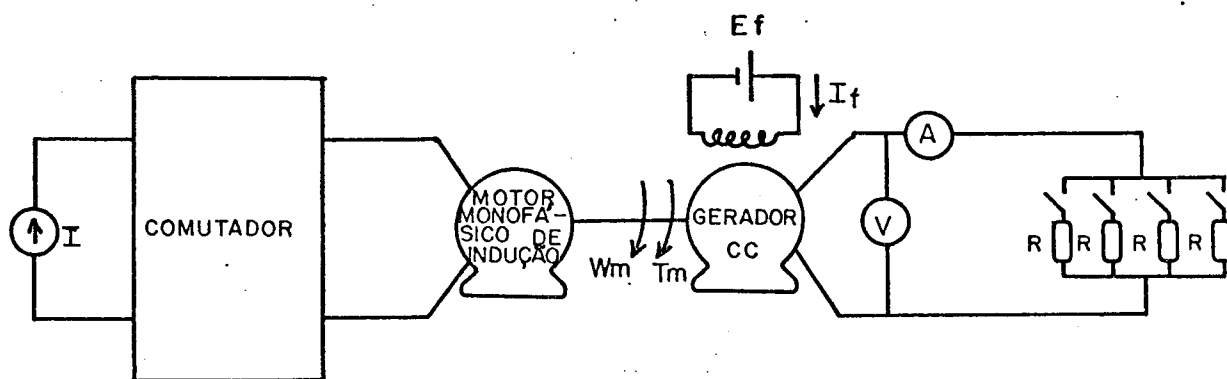


Figura 4.7 - Esquema para o estudo experimental com controle de velocidade.

O estudo experimental foi realizado mantendo a excitação do gerador cc constante e aumentando a carga através da colocação dos resistores R em paralelo, conseqüentemente aumentando a carga do motor monofásico de indução.

Através deste estudo foram obtidas as curvas da Figura (4.8).

Estas curvas foram obtidas com o motor utilizando a sua corrente nominal ($I_s = 4,5 \text{ A}$).

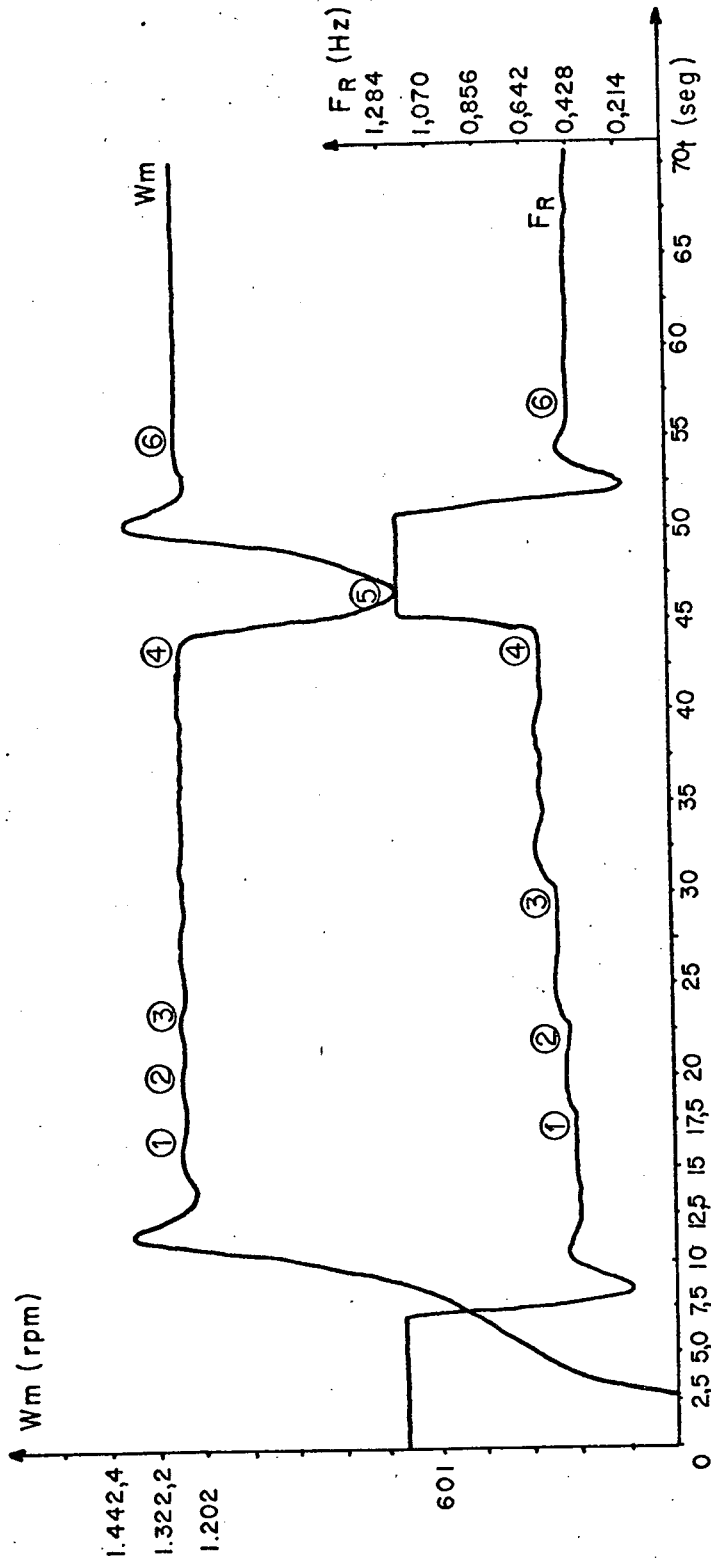


Figura 4.8 - Curvas características para funcionamento com controle de velocidade.

Os pontos que estão assinalados na Figura (4.8) representam o seguinte:

PONTO 1 - É aplicada uma carga, isto é, é ligada uma resistência R (Figura 4.7) como carga do gerador cc, e o motor passa por um transitório e mantém a velocidade ω_m , aumentando ω_r .

PONTO 2 - É aplicada mais uma carga, isto é, é colocada uma resistência R em paralelo com a que já está ligada como carga do gerador cc e novamente o motor passa por um transitório porém consegue manter a velocidade ω_m , aumentando ω_r .

PONTO 3 - É aplicada mais uma carga, o motor passa por outro transitório e ainda mantém ω_m , aumentando ω_r .

PONTO 4 - É aplicada mais uma carga, porém esta carga é excessiva para o motor. Começa a decrescer a velocidade à procura de outro ponto de operação.

PONTO 5 - A carga é retirada totalmente, antes que o motor pare, e ele, começa a voltar à velocidade desejada.

PONTO 6 - O motor se encontra novamente, em regime permanente, na velocidade desejada.

4.6 - RESULTADOS

Resultados teóricos.

Tomando as equações (4.13) e (4.14).

$$2 m \omega_0 = \frac{D+K\ell}{J} + \frac{K_4 A}{J K K'} \quad (4.13)$$

$$\omega_0^2 = \frac{K_4 B}{J K K'} \quad (4.14)$$

Todos os parâmetros que estão nestas equações são conhecidos, menos m e ω_0 , que serão calculados.

Do capítulo 2.

$$D = 0,0052$$

$$J = 0,026$$

$$K\ell = 0,0102$$

$$K_4 = 2,31$$

Do circuito de controle de velocidade implementado:

$$A = 8,89$$

$$B = 16,84$$

$$K' = 7,99$$

$$K = 25,46$$

Portanto, resolvendo a equação (4.14), o valor de ω_0 é encontrado.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2,31 \times 16,84}{0,026 \times 7,99 \times 25,46}}$$

$$\boxed{\omega_0 = 2,71 \text{ rad/seg}} \quad (4.15)$$

De posse deste valor, resolvendo a equação (4.13) o valor de m é encontrado.

$$2 \times 2,71 \times m = \left(\frac{0,0052 + 0,0102}{0,026} + \frac{2,31 \times 8,89}{0,026 \times 7,99 \times 25,46} \right)$$

$$\boxed{m = 0,82} \quad (4.16)$$

Da Figura (4.8) é obtido o valor de ω_0 experimental.

$$\boxed{\omega_0 = 1,7 \text{ rad/seg}} \quad (4.17)$$

$$\epsilon\% = \frac{2,71 - 1,7}{2,71} \times 100 = 37\%$$

Comparando-se os valores de ω_0 encontrados o erro percentual é de 37%. O que pode ser considerado um bom resultado.

4.7 - CONCLUSÕES

À partir dos estudos teóricos e experimentais realizados, podemos estabelecer as seguintes conclusões:

- a) O controle de velocidade do motor monofásico de indução através da variação de Fr é satisfatório, não apresentando problemas de estabilidade.
- b) Os resultados encontrados, teórica e experimentalmente, confirmam que a modelagem do sistema como uma equação diferencial de segunda ordem é satisfatória.
- c) Devido à simplicidade e eficiência do modelo empregado, ele é facilmente empregável na área industrial.

C O N C L U S Õ E S

À partir dos estudos teóricos e experimentais, realizados no decorrer do trabalho apresentado, pode-se concluir que:

- 1 - O problema de estabilidade do motor monofásico de indução alimentado em corrente, sob frequência variável é resolvido pelo controle do torque médio, seja pelo controle da frequência da corrente do rotor, seja pelo controle do módulo da tensão do estator.
- 2 - O controle do torque médio através do módulo da tensão do estator em eficácia se equivale ao primeiro, porém em simplicidade ele é superior, porque não precisa de medições externas ao comutador sendo, portanto, muito mais simples e compacto.
- 3 - O controle de velocidade é simples e preciso, quando é realizado pela variação do torque médio, através da variação da frequência da corrente rotórica.
- 4 - Os modelos encontrados para todos os casos são simples e de fácil emprego, sendo, portanto, de fácil utilização na área industrial.

Convém ressaltar que no presente trabalho foi efetuado o estudo apenas para frequências de alimentação acima de 10 Hz. Para que o sistema encontre emprego industrial, deve ser estudado porém, um método de partida com o motor sendo alimentado com baixas frequências.

A P Ê N D I C E A

M E D I Ç Ã O D O M O M E N T O D E I N É R C I A (J)

O momento de inércia (J) que foi medido, é o momento de inércia do conjunto motor monofásico de indução-máquina de corrente contínua.

Foram utilizados nesta experiência os seguintes materiais:

Um Registrador Gráfico;

Um Amperímetro Analógico;

Um Motor Monofásico de indução, descrito no capítulo 2, item 2.3;

Uma Máquina de corrente contínua, descrita no capítulo 2, item 2.6.2;

Uma Fonte estabilizadora modelo TCA 300 - 5.

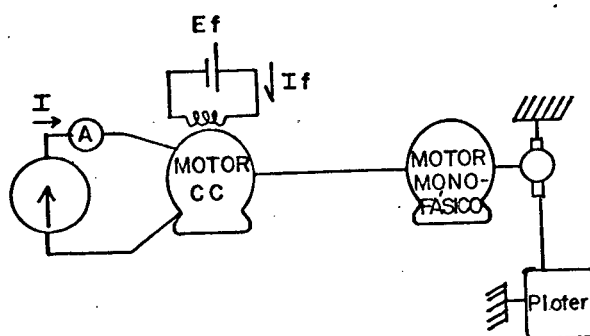


Figura 1 - Montagem utilizada na medição do momento de inércia (J).

Para a realização da medição, a fonte foi utilizada de maneira a fornecer uma corrente constante e igual à 0,5 A. A corrente de campo do motor de corrente contínua foi mantida constante e igual à 0,37 A.

Através do registrador gráfico a curva da Figura 2 foi obtida.

O torque no motor de corrente contínua com campo constante é dado pela equação 1.

$$T = K_t I_a \quad (1)$$

Dos dados de placa do motor de corrente contínua é possível obter os seguintes valores:

$$T_{nom} = 9,17 \text{ [Nxm]} \quad (2)$$

$$I_{nom} = 5,6 \text{ [A]} \quad (3)$$

Substituindo (2) e (3) em (1).

$$K_t = \frac{9,17}{5,6}$$

$$K_t = 1,638 \text{ [Nxm/A]} \quad (4)$$

O torque de aceleração é dado pela equação (5).

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} \text{ (s)}$$

Como a curva da Figura 2 é aproximadamente linear, pode ser, portanto, aproximada por uma reta.

$$T = J \frac{\Delta\omega_m}{\Delta t} \quad (6)$$

$$J = \frac{T_x \Delta t}{\Delta\omega_m} \quad (7)$$

Mas, T é o torque aplicado ao eixo, então é a diferença entre o torque total e o torque de atrito.

$$T_1 = Kt I \quad (8)$$

$$I = 0,5 [A]$$

$$T_1 = 1,638 \times 0,5$$

$$T_1 = 0,819 [Nxm] \quad (9)$$

$$T = T_1 - T_a \quad (10)$$

$$T_a = 0,5 [Nxm]$$

$$T = 0,819 - 0,5$$

$$T = 0,319 [Nxm] \quad (11)$$

Da Figura 2

$$\Delta t = 8,1 \text{ [seg]} \quad (12)$$

$$\Delta \omega = 98,175 \text{ [rad/seg]} \quad (13)$$

Substituindo as equações (11), (12) e (13) na equação (7) obtem-se o momento de inércia.

$$J = \frac{0,319 \times 8,1}{98,175}$$

$$J = 0,026 \text{ [Kgxm}^2\text{]}$$

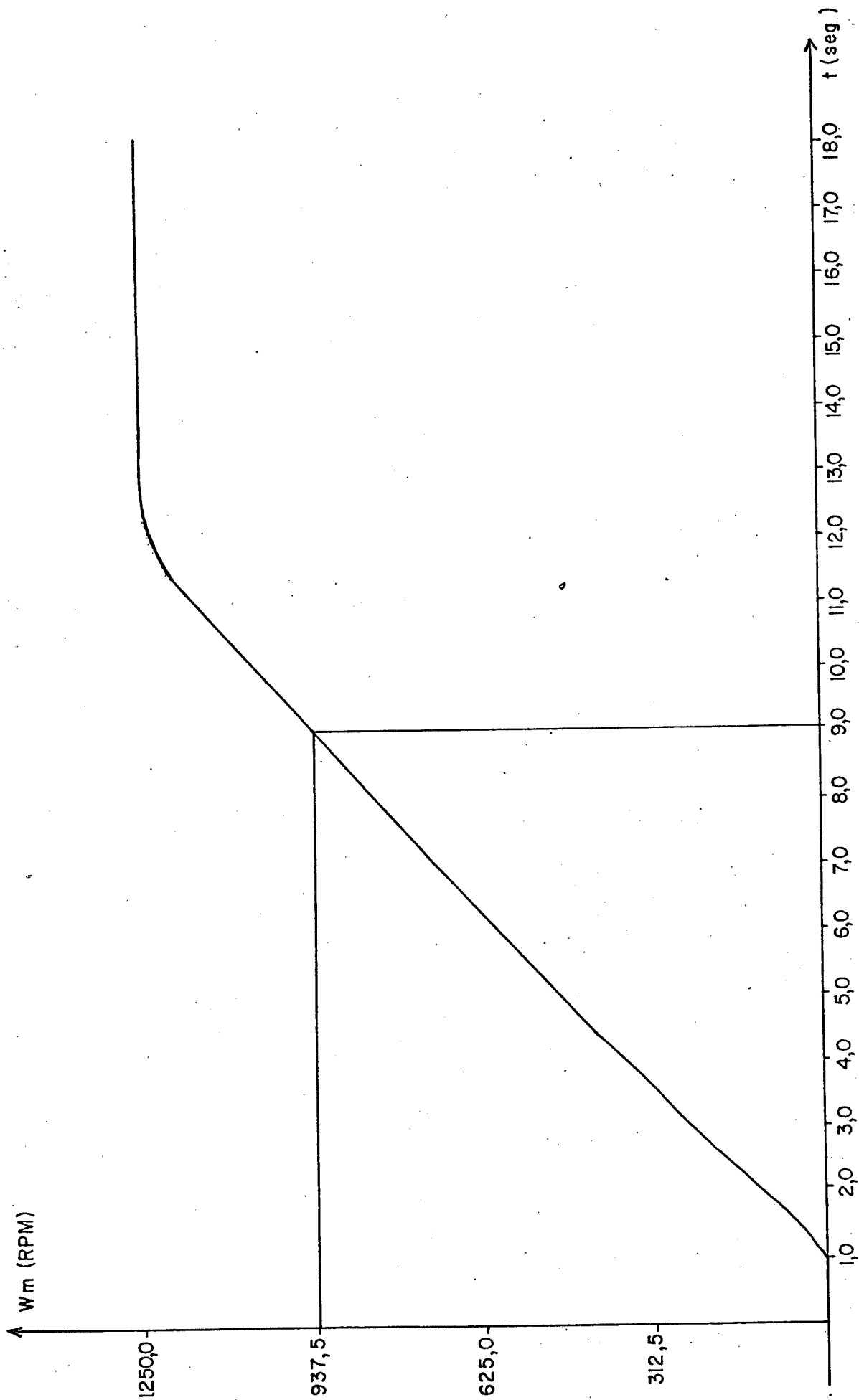


Figura 2 - Curva ω_{mxt} , para T constante.

A P Ê N D I C E BPROGRAMAS UTILIZADOS

- 1 - BATISTA FORTRAN - este programa calcular o torque médio do motor monofásico de indução, em função da frequência da corrente do rotor, através das tres equações encontradas no capítulo 2. Calcula também o módulo da tensão do estator em função da frequência da corrente do rotor.
- 2 - VIEIRA FORTRAN - este programa calcula os valores da velocidade e da frequência de alimentação do motor monofásico de indução, em função do tempo, durante o transitório de aplicação de uma carga no motor, calcula também o torque de carga em função do tempo.

FILFO BATISTA FORTRAN C1 UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - NPD.

```

C -----BAT00010
C PROGRAMA PARA CALCULO DO TORQUE E DA TENSAO DO MOTOR MURUFASI- BAT00020
C QD DE XINGUADO, EM FUNCAO DE WS, WR E IS BAT00030
C -----BAT00040
C DIMENSION T(300),NRCTON(30),FR(300),NR(30),TI(30),T2(20),VS(300)BAT00050
C BAT00060
C5999 CLNTINE BAT00070
C DATA T(300)=/,KR,PLR,MSF/3.06,0.3207,0.3118/,R,FREQD,RP/2.60,4BAT00080
C 1/ANWTRH/30000./,FR/30000./,WR/30000./,TI/30000./,T2/2000./,PS/3.4BAT00090
C 243/ BAT00100
C RPTC(5,2)CIS(1),I=1,3 BAT00110
C 2 PFORMAT(3F5.2) BAT00120
C J=1 BAT00130
C 4 JFDEFE=10 BAT00140
C 5 JNE=1200/JFREQD/HP BAT00150
C N=J/5 BAT00160
C WRDE=JFDEFE*2*2.1416 BAT00170
C WS=WRDE/3 BAT00180
C CO=1.3E14 BAT00190
C WATF(1)=1#10 BAT00200
C FR(1)=JFREQD*WATF(1)/(N*J) BAT00210
C W(1)=FR(1)*2*3.1416 BAT00220
C -----BAT00230
C CALCULO DO TORQUE MEDIO EM FUNCAO DE WS, WR E IS - EQUACAO
C (COMPLETE)
C Z=CO*(PL**2)*(NS**2)*(ALR**2)*(1-NR(1)/(NR*SI)**3) BAT00240
C B=CO/(ONS*(L**2))*(KR**4-PLR**2)*W*(ALR**2)*(1-NR(1)/(NR*SI)) BAT00250
C C=LPL**4*(FR**2+(NR*DE**2)*(PLR**2)*(1-NR(1)/(NR*SI)**4) BAT00260
C D=2*(L/ALR*EQU**2)*E**2*(WR*DE**4)*(ALR**4)*(1-NR(1)/(NR*SI)) BAT00270
C 1**2) BAT00280
C E=(1-(WR*DE)**4)*(E**2+2*(WR*DE**2)*(ALN**2)) BAT00290
C F=L*(E**4)*(S*(E**2)+L*EQU**2)*(ALR**2) BAT00300
C G=(120/30)*W*(NS**2)*(CIS(J)**2)/WRDE BAT00310
C A=Z**3 BAT00320
C CDEF=C+D+E+F BAT00330
C T(1)=(A*G)/CDEF BAT00340
C -----BAT00350
C CALCULO DO MOMENTO DO TORQUE EM FUNCAO DE WS,WR E IS BAT00360
C -----BAT00370
C 3I=1-NR(1)/(NR*SI) BAT00380
C VS1=Z*(A**2+(41**2-1)*(N**2)*(NS**2)*(AL**2)) BAT00390
C VS2=2*KR*(N**2)*(S**2)*(E**2)*FR*(N**2)*(A**2)*MSR**2) BAT00400
C VS3=VS1+VS2**2 BAT00410
C VS4=WR*5*(ALN**2*(21**2-1)*(R**2)*(NS**2)*(L**4**2)) BAT00420
C VS5=WR*KR*(S**2*(L**2*(1-A**2)*(N**3)*(S**3)*L**5*(MSR**2) BAT00430
C VS6=(VS4+VS5)**2 BAT00440
C VS7=(KR**2*(1+A**2-1)*(R**2)*(NS**2)*(AL**2)**2) BAT00450
C VS8=L*(N*E**2*(S**2)*L**2) BAT00460
C VS9=FR*(VS3+VS4)/(VS7+VS8)) BAT00470
C VS(1)=VS*(V(1))**2*(L**2) BAT00480
C -----BAT00490
C 10 CRR(VJ) BAT00500
C WATF(1)=JFREQD/CRR(VJ) BAT00510
C 20 PFORMAT(3F5.2),WR,VS(1),VS(1),VS(1),VS(1),VS(1),VS(1) BAT00520
C 1.3000 3.4000 0.3118 0.3207 0.3118 0.3207 0.3118 0.3207 0.3118 0.3207

```

FILEO BATESTA FORTIRAN CI UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - NPDC

```

2E I,16, HERTZ , E CORRENTE DO ESTATOR=F,5.2, AMPERES ,//, BAT00560
3PULSAO ROTOR(RPM) TORQUE FREQ.NO ROTOR PUL. ROTOR (K/S) BAT00570
4, A QUADRA TENSÃO DO ESTATOR (VOLTS),// BAT00580
5 I=1,M BAT00590
6 IIT,(0,3)M DIOP(I),T(I),FF(I),WR(I),V5(I) BAT00600
30 FORAT(DEL5.5) BAT00610
40 CONTINUE BAT00620
----- BAT00630
C CALCULO DO TORQUE MEDIO EM FUNCAO DE MS, M, IS - EQUACAO SIM- BAT00640
C PLIFICADA BAT00650
C BAT00660
C BAT00670
C BAT00680
C BAT00690
C BAT00700
C BAT00710
C BAT00720
C BAT00730
60 CONTINUE
70 PARA T(1),
80 PARA FREQ A PULSAO NO ROTOR PARA FREQUENCIA BAT00750
2E I,16, HERTZ,//, PULSAO 750
30, M, ROTOR (RPM) TORQUE FREQ. DO ROTOR PULSAO ROTOR (K/S) BAT00770
40 I=1,M BAT00780
C BAT00790
C BAT00800
C BAT00810
C BAT00820
C BAT00830
C BAT00840
C BAT00850
C BAT00860
C BAT00870
C BAT00880
C BAT00890
C BAT00900
90 CONTINUE
100 CONTINUE
110 PARA T(1),
120 PARA FREQ A PULSAO DO ROTOR MURDASICA DE BAT00940
2E I,16, HERTZ,//, PULSAO 550
30, M, ROTOR (RPM) TORQUE FREQ. NO ROTOR PULSAO ROTOR (K/S) BAT00950
40 I=1,M BAT00960
C BAT00970
C BAT00980
C BAT00990
120 PARA T(1),
130 CONTINUE
140 STOP
C DEBOA INT
C AT 555
C T(1),
C PUL

```


REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - BARBI, I. - Conversão Eletromecânica de Energia. Publicações internas, UFSC, 1983.
- [2] - LAMBERT, J.A.- Motor Monofásico de Indução Alimentado em Corrente, sob Frequência Variável. Dissertação de Mestrado, UFSC, 1983.
- [3] - RODRIGUES, K.D. - Controle de Velocidade do Motor Monofásico de Indução Alimentado sob Frequência Variável. Dissertação de Mestrado, UFSC, 1982.
- [4] - BARBI, I. - RODRIGUES, K.D. - MARTINS, D.C. - Estudo do Motor Monofásico de Indução, Alimentado em Tensão sob Frequência Variável. Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico nº 9, Escola Federal de Engenharia Itajubá, 1983.
- [5] - FINAZZI, A.P. - Motor Monofásico de Indução a Capacitor, sob Frequência Variável. Dissertação de Mestrado UFSC, 1983.
- [6] - RODRIGUES, K.D. - OLIVEIRA, J.C. - BARBI, I. - Acionamento do Motor Monofásico de Indução Alimentado sob Frequência Variável. I Congresso Latino-Americano de Automação, Campina Grande - PB, 1984.