

TESE

901

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

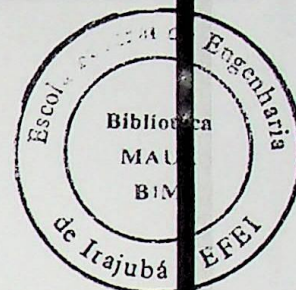
FRENAGEM DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM A
UTILIZAÇÃO DE CONVERSORES NO ROTOR

PEDRO PAULO DA SILVA

ITAJUBÁ, Novembro de 1996

**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
EFEI**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



**FRENAGEM DE MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO COM A UTILIZAÇÃO DE
CONVERSORES NO ROTOR**

PEDRO PAULO DA SILVA

ORIENTADORES:

ÂNGELO JOSÉ JUNQUEIRA REZEK

NERY DE OLIVEIRA JÚNIOR

ITAJUBÁ, NOVEMBRO DE 1996

CLASS. 621.313.333(043.2)
CUTTER. 5586f
TOMBO. 901



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PREPARAÇÃO DE MOTOR DE INDUÇÃO
TIPOLOGIA COM A UTILIZAÇÃO DE
CONVERTEDORES NO MOTOR

PETER PAULO DA SILVA

ORIENTADOR:

ANDRÉ JOSÉ JUNQUEIRA REZAK

NEY DE OLIVEIRA JUNIOR

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 1988

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, aos Professores Ângelo
e Nery de Oliveira Júnior pela grande
colaboração, incentivo e preocupação neste meu trabalho e
ao Instituto de Física da UFPA pela
ajuda prestada.

Dedico este trabalho a minha
esposa Maria Rita e à minha
filha Lília Paula com muito
amor, pelo apoio recebido em
todos os momentos.

FREIAGEM DE MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICA COM INJEÇÃO DE
AGRADECIMENTOS
CONVERSORES NO ROTOR

Paulo Paulo da Silva
1991

Agradeço a Deus em primeiro lugar, aos Professores Ângelo José Junqueira Rezek e Nery de Oliveira Júnior pela grande contribuição no desenvolvimento e execução deste meu trabalho e aos funcionários do laboratório de eletricidade da EFEI pela atenção prestada.

FRENAGEM DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM A UTILIZAÇÃO DE CONVERSORES NO ROTOR

Pedro Paulo da Silva
1996

RESUMO

O método da injeção estatórica de corrente contínua é utilizada neste trabalho para possibilitar a frenagem do motor de indução trifásico. A utilização de conversores no rotor (cascata subsíncrona de conversores) torna possível a recuperação da energia rotórica para a rede, ao contrário da frenagem dinâmica convencional, na qual há dissipação de energia no rotor do motor.

Um regulador de corrente foi também utilizado para a obtenção da frenagem controlada do motor, de modo a manter a corrente no link DC da cascata constante durante todo o processo frenante. Com a alteração do valor de referência de corrente, pode-se verificar uma alteração nos tempos de frenagem que variam diretamente com esta corrente de referência.

A principal contribuição deste trabalho foram os resultados experimentais, onde o controle da cascata foi desenvolvido e simulado para diferentes condições e pontos de operação.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO THE PPG/EFEI AS PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE OBTENTION OF THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

THREE-PHASE INDUCTION MOTOR BRAKING BY USING CONVERTERS IN THE ROTOR

Pedro Paulo da Silva
1996

ABSTRACT

The stator direct current injection method is used in this work to obtain the induction motor braking. The use of rotor converters (subsynchronous cascade converters) makes possible the recovery of the rotor energy to the supply system. It occurs in the contrary of the conventional dynamic braking, in which there is an rotor energy dissipation.

A current regulator has been used to obtain the motor controlled braking, in way that the cascade DC link current is maintained constant during all the braking process. By modifying the reference current, the braking time will also change.

The main contribution of this work is the experimental results, where the cascade control has been developed and simulated for many different conditions and operation points.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

<i>CASCATA SUBSÍNCRONA</i> _____	1
1.1. A CASCATA DE CONVERSORES ESTÁTICOS OU CASCATA SUBÍNCRONA _	2
1.2. UTILIZAÇÃO DA CASCATA SUBSÍNCRONA _____	4
1.3. OBTENÇÃO DA CARACTERÍSTICA TORQUE X ESCORREGAMENTO _____	6
1.4 - POTÊNCIA RECUPERADA PELA CASCATA SUBSINCRONA _____	11

CAPÍTULO II

<i>FRENAGEM DINÂMICA</i> _____	13
2.1. ANÁLISE DA FRENAGEM POR INTERMÉDIO DO CIRCUITO EQUIVALENTE _____	14
2.2. MODIFICAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE _____	16
2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA FRENAGEM DINÂMICA _____	17
2.4. RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE CONTÍNUA ESTATÓRICA I_{cc} E A CORRESPONDENTE CORRENTE ALTERNADA I_1 EQUIVALENTE _____	20
2.5. CÁLCULO DO TEMPO DE DESACELERAÇÃO _____	22
2.6. ARRANJO LABORATORIAL PARA VERIFICAÇÃO DO PROCESSO <i>FRENANTE</i> _____	26

CAPÍTULO III

<i>FRENAGEM REGENERATIVA</i> _____	28
3.1. ARRANJO LABORATORIAL PARA VERIFICAÇÃO DA FRENAGEM REGENERATIVA _____	29
3.2. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL A 90° _____	31
3.3. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL A 100° _____	37
3.4. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL A 110° _____	46
3.5. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL A 120° _____	50

CAPÍTULO IV

<i>FRENAGEM DE MOTORES COM UTILIZAÇÃO DE REGULADOR DE CORRENTE</i> _____	54
4.1. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA VELOCIDADE INICIAL DO ROTOR IGUAL A 1300 (RPM) - $\alpha_{INICIAL} = 90^\circ$ _____	56
4.2. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA VELOCIDADE INICIAL DO ROTOR IGUAL A 1000 (RPM) - $\alpha_{INICIAL} = 100^\circ$ _____	59

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	63
5.1. ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA TORQUE VERSUS VELOCIDADE	63
5.2. ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA VELOCIDADE VERSUS TEMPO	64
5.3. ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA CORRENTE VERSUS TEMPO	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

SIMBOLOGIA

- a - Relação de transformação entre a tensão do estator e a tensão do rotor
- a_t - Relação de transformação entre a tensão do lado primário e a tensão do lado secundário do transformador da cascata subsíncrona
- D - Coeficiente de amortecimento de atrito
- E_{20} - Tensão induzida no circuito do rotor para escorregamento igual a um
- I_1 - Corrente do circuito do estator do motor de indução trifásico
- I_2 - Corrente do circuito do rotor do motor de indução trifásico
- I_d - Corrente do circuito do rotor retificada
- I_{cc} - Corrente contínua injetada nos enrolamentos do estator do motor de indução trifásico
- I_r - Corrente vista por uma das fases do primário do transformador da cascata subsíncrona em função do tempo
- I_{ref} - Corrente de referência do regulador de corrente
- \dot{I}_m - Fasor da corrente de magnetização
- \dot{I}_1 - Fasor da corrente do circuito do estator
- \dot{I}_2 - Fasor da corrente do circuito do rotor
- J - Momento de inércia total referido ao eixo do motor
- L_d - Indutor de alisamento do circuito de corrente contínua
- n_1 - Velocidade síncrona do campo girante
- n_2 - Velocidade no eixo do motor
- P_1 - Potência ativa que atravessa o entreferro vinda do estator para o rotor

- P_2 - Potência mecânica exigida pela carga
- P_3 - Potência consumida no circuito do rotor
- p_i ($i=1$ a 4) - Potência ativa
- q_i ($i=1$ a 4) - Potência reativa
- R_1 - Resistência por fase do circuito do estator
- R_2 - Resistência por fase do circuito do rotor
- S - Escorregamento do motor de indução trifásico
- SEG - Unidade de tempo em segundo
- T_e - Torque eletromagnético por fase do motor de indução trifásico
- T_c - Torque resistente da carga
- T_{cc} - Torque frenante produzido pela corrente contínua
- T_{ccmax} - Torque frenante máximo
- t_f - Tempo de frenagem entre a velocidade inicial e a velocidade final
- TI - Constante de tempo do regulador de corrente
- TGS - Constante de tempo do filtro de referência
- TGI - Constante de tempo do filtro de realimentação
- U_1 - Tensão fase-neutro do circuito do estator do motor de indução trifásico
- U_2 - Tensão fase-neutro nos terminais do circuito do rotor
- U_{2t} - Tensão fase-neutro do lado secundário do transformador da cascata subsíncrona
- $U_{aa'}$ - Tensão contínua retificada pela ponte de diodos
- $U_{bb'}$ - Tensão contínua imposta pela ponte de tiristores
- V_2 - Tensão induzida por fase no circuito do rotor com base na velocidade angular síncrona

- V_1 - Tensão fase-fase do circuito do estator do motor de indução trifásico
- V_r - Tensão fase-fase do circuito do rotor com seu circuito aberto
- V_t - Tensão fase-fase do lado secundário do transformador da cascata subsíncrona
- V_{cc} - Fonte de tensão contínua
- VRI - Ganho do regulador de corrente
- X_1 - Reatância de dispersão por fase do circuito do estator
- X_2 - Reatância de dispersão por fase do circuito do rotor
- X_m - Reatância de magnetização por fase do estator
- X_{2p} - Reatância de dispersão por fase do circuito do rotor para escorregamento igual a um
- W_1 - Frequência angular da tensão do estator
- W_2 - Frequência angular da tensão do rotor
- W_s - Frequência angular síncrona
- W_0 - Velocidade angular inicial do rotor
- W_f - Velocidade angular final do rotor
- α - Ângulo de disparo da ponte de tiristores

CAPÍTULO I

CASCATA SUBSÍNCRONA

A cascate de conversores subsíncrona é obtida da associação de uma cascate de máquinas por dispositivos semicondutores.

O controle de velocidade do motor de indução trifásico, quando a variação de carga é grande, a tensão de estator não é suficiente para manter o motor em funcionamento, devido ao alto torque de partida.

Uma solução para aproveitar uma parcela de potência disponível no sistema de distribuição é a utilização de uma cascate de conversores.

CAPÍTULO I

CASCATA SUBSÍNCRONA

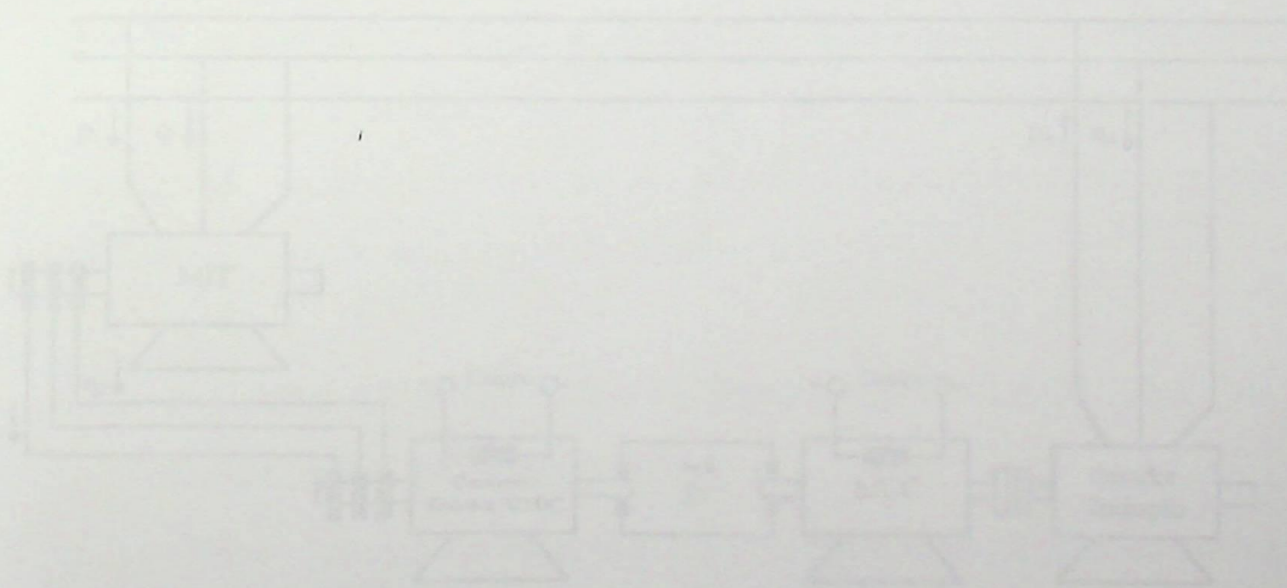


Figura 1.1 - Cascate Scherbius

CAPÍTULO I

CASCATA SUBSÍNCRONA

A cascata de conversores subsíncrona é obtida da substituição de uma cascata de máquinas por dispositivos semicondutores.

O controle de velocidade de motores de indução trifásicos, usando a variação do escorregamento através da tensão do estator e/ou da resistência do rotor, é bastante ineficiente, devido as altas perdas do motor.

Com a finalidade de reaproveitar uma parcela da potência dissipada no motor, dois sistemas clássicos com conversores rotativos foram desenvolvidos, conhecidos como conexão Scherbius e conexão Kraemer, os quais são ilustrados a seguir, nas figuras 1.1 e 1.2.

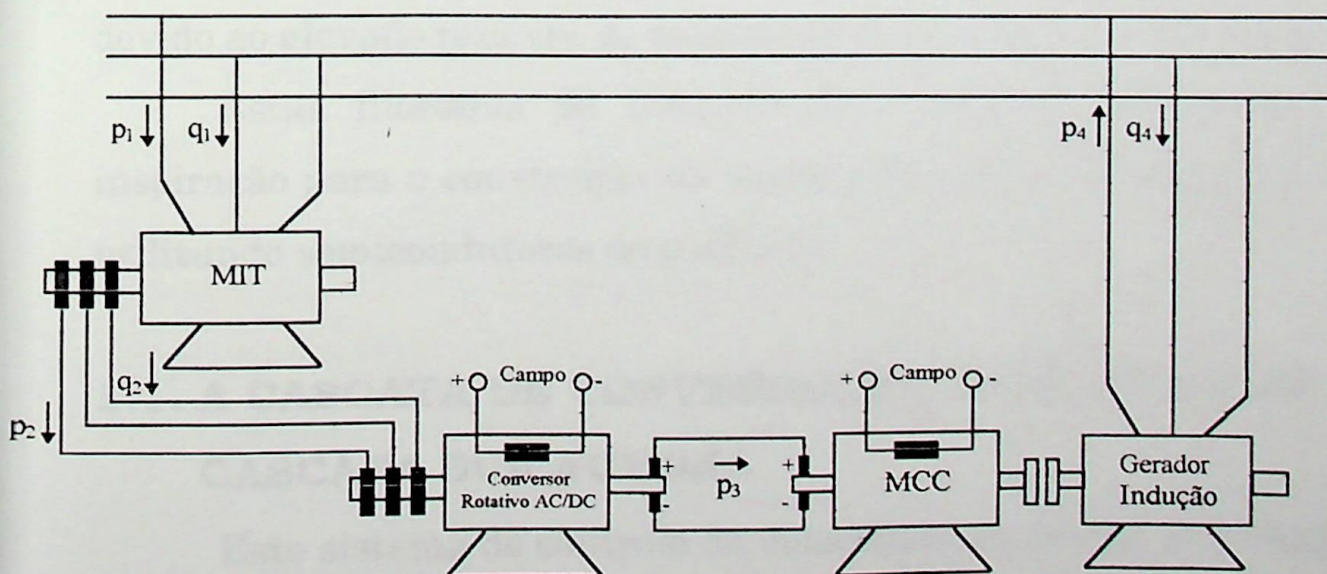


Figura 1.1 - Conexão Scherbius

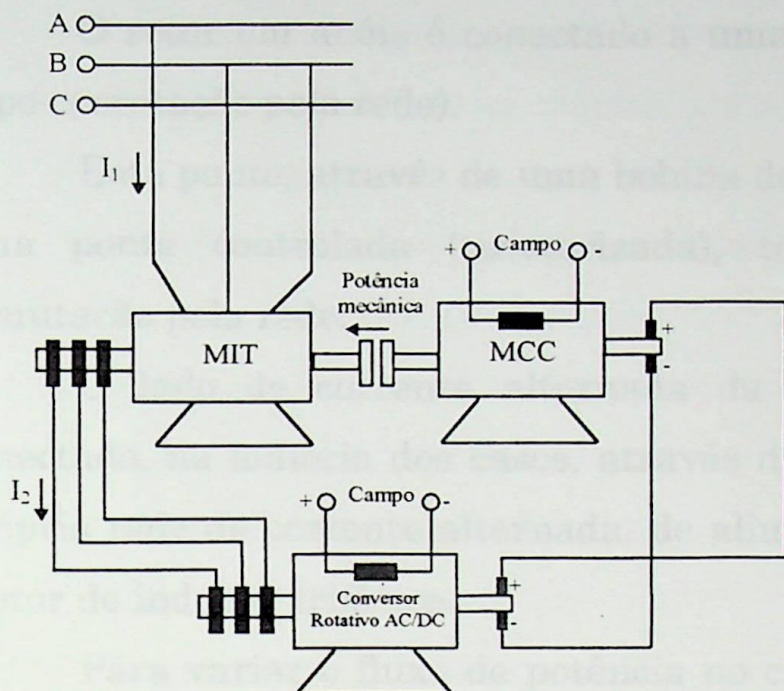


Figura 1.2 - Conexão Kraemer

O controle da velocidade é feito através de atuação no campo do motor de corrente contínua.

A velocidade é controlada sempre abaixo da velocidade síncrona.

Nota-se que estes métodos são completamente inviáveis, devido ao elevado número de máquinas (conversoras) envolvidas.

Estas filosofias de controle de velocidade serviram de inspiração para a construção da cascata de conversores estáticos, utilizando semicondutores de potência.

1.1. A CASCATA DE CONVERSORES ESTÁTICOS OU CASCATA SUBÍNCRONA

Este sistema de controle de velocidade de motor de indução trifásico de rotor bobinado, com recuperação da energia de escorregamento, tem o estator ligado diretamente à rede de corrente alternada (60 Hz).

O rotor em anéis é conectado a uma ponte não-controlada (tipo comutação pela rede).

Esta ponte, através de uma bobina de alisamento, alimenta uma ponte controlada (tiristorizada), também do tipo com comutação pela rede.

O lado de corrente alternada da ponte tiristorizada é conectado, na maioria dos casos, através de um transformador à própria rede de corrente alternada, de alimentação do estator do motor de indução trifásico.

Para variar o fluxo de potência no circuito do rotor, basta mudar o ângulo de disparo α da ponte tiristorizada, a qual irá funcionar sempre como inversora ($90^\circ < \alpha < 150^\circ$).

A grande vantagem deste sistema, consiste na utilização de uma ponte de diodos no lado do rotor, a qual opera muito bem na tensão e frequência variável do escorregamento, garantindo assim confiabilidade, robustez e baixo custo do sistema.

Com relação aos inversores, pode-se dizer que atualmente são os mais utilizados. A cascata subsíncrona torna-se viável nos casos em que já se dispõe do motor de rotor bobinado.

A desvantagem deste sistema é o baixo fator de potência, devido a ponte tiristorizada, instalada no lado da rede de corrente alternada (60 Hz).

As principais características deste acionamento são:

- Permite variar a velocidade em uma ampla faixa com alta eficiência;
- Manutenção fácil e de baixo custo;

- Quanto menor a faixa de controle de velocidade, menor será a potência do conversor, tornando assim o sistema mais econômico;
- Possibilita o custo inicial do controle de velocidade em regime permanente para grandes motores ser competitivo com os métodos existentes e adicionalmente oferece grande confiabilidade e versatilidade, bem como custos de operação reduzidos.

Principais aplicações

- Bombas, ventiladores;
- Estrusoras, esteiras;
- Compressores, exaustores;
- Laminadores, esmagadores;
- Pontes rolantes, etc...

1.2. UTILIZAÇÃO DA CASCATA SUBSÍNCRONA

A figura 1.3 que segue mostra a configuração da cascata subsíncrona para controle de velocidade de motores de indução de rotor em anéis.

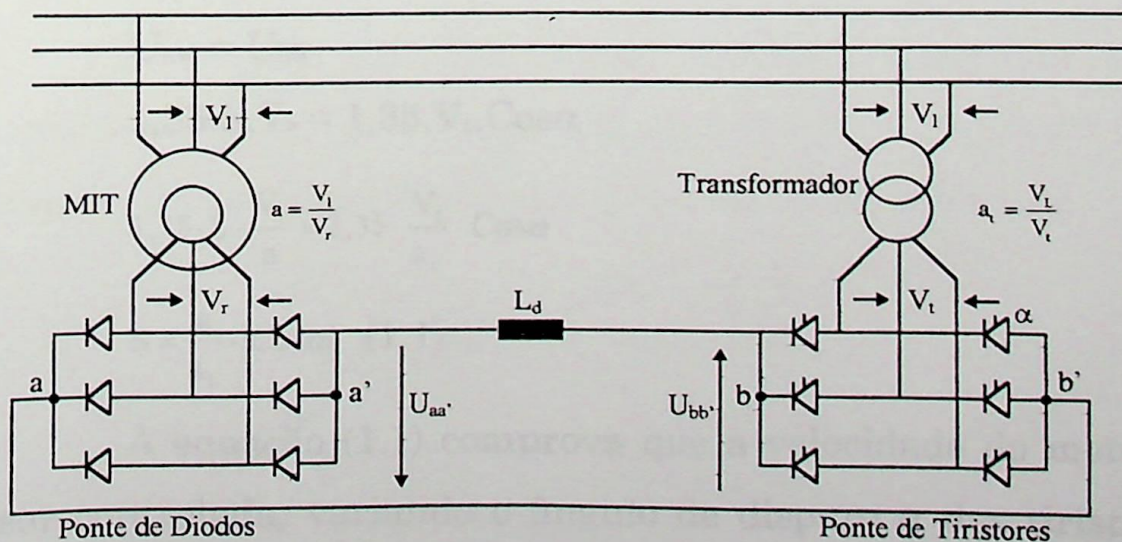


Figura 1.3 - Cascata Subsíncrona



Onde:

a = Relação de transformação estator - rotor

a_t = Relação de transformação do transformador

V_1 = Tensão fase-fase do estator

V_r = Tensão fase-fase do rotor com circuito aberto

V_t = Tensão fase-fase do secundário do transformador

L_d = Indutor de alisamento

S = Escorregamento do motor

α = Ângulo de disparo da ponte de tiristores

$U_{aa'}$ = Tensão contínua retificada pela ponte de diodos

$U_{bb'}$ = Tensão contínua imposta pela ponte de tiristores

Sabe-se que:

$$U_{aa'} = 1,35 \cdot S \cdot V_r$$

$$U_{bb'} = 1,35 \cdot V_t \cdot \cos\alpha$$

$$V_r = \frac{V_1}{a}$$

$$V_t = \frac{V_1}{a_t}$$

Desprezando-se em regime permanente a resistência do indutor L_d , tem-se:

$$U_{aa'} = U_{bb'}$$

$$1,35 \cdot S \cdot V_r = 1,35 \cdot V_t \cdot \cos\alpha$$

$$1,35 \cdot S \cdot \frac{V_1}{a} = 1,35 \cdot \frac{V_1}{a_t} \cdot \cos\alpha$$

$$S = \frac{a}{a_t} \cdot |\cos\alpha| \quad (1.1)$$

A equação (1.1) comprova que a velocidade do motor pode ser controlada, variando o ângulo de disparo α dos tiristores da ponte inversora.

1.3. OBTENÇÃO DA CARACTERÍSTICA TORQUE X ESCORREGAMENTO

Seja o circuito equivalente por fase correspondente ao rotor do motor de indução trifásico, conforme mostra a figura 1.4.

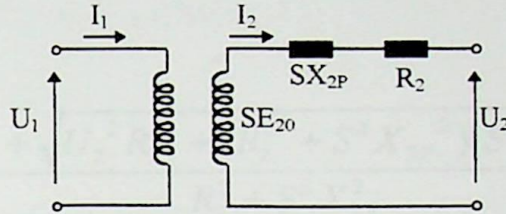


Figura 1.4 - Circuito Equivalente do Rotor

Da Figura 1.4, tem-se:

- E_{20} - Tensão induzida no rotor para escorregamento igual a 1
- X_{2P} - Reatância do rotor para escorregamento igual a 1
- R_2 - Resistência do rotor
- U_2 - Tensão terminal do rotor
- I_2 - Corrente do rotor

Do circuito do rotor pode-se escrever:

$$\dot{I}_2 = \frac{SE_{20} - \dot{U}_2}{R_2 + jSX_{2P}}$$

A Figura 1.5, que segue mostra o diagrama fasorial, considerando-se apenas a componente fundamental, uma vez que para a análise da potência ativa, apenas esta é relevante.

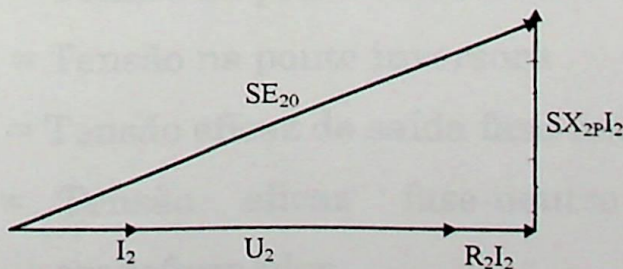


Figura 1.5 - Diagrama Fasorial

A corrente I_2 está em fase com a tensão terminal U_2 , uma vez que a ponte conectada ao circuito do rotor é não controlada a diodos.

Da Figura 1.5, pode-se escrever:

$$(SE_{20})^2 = (U_2 + R_2 I_2)^2 + (S X_{2P} I_2)^2$$

Então:

$$I_2 = \frac{-U_2 R_2 + \sqrt{U_2^2 R_2^2 + (R_2^2 + S^2 X_{2P}^2)(S^2 E_{20}^2 - U_2^2)}}{R_2^2 + S^2 X_{2P}^2} \quad (1.2)$$

A tensão secundária do transformador pode ser obtida da Figura 1.6 que segue, com os valores indicados da Cascata Subsíncrona simplificada.

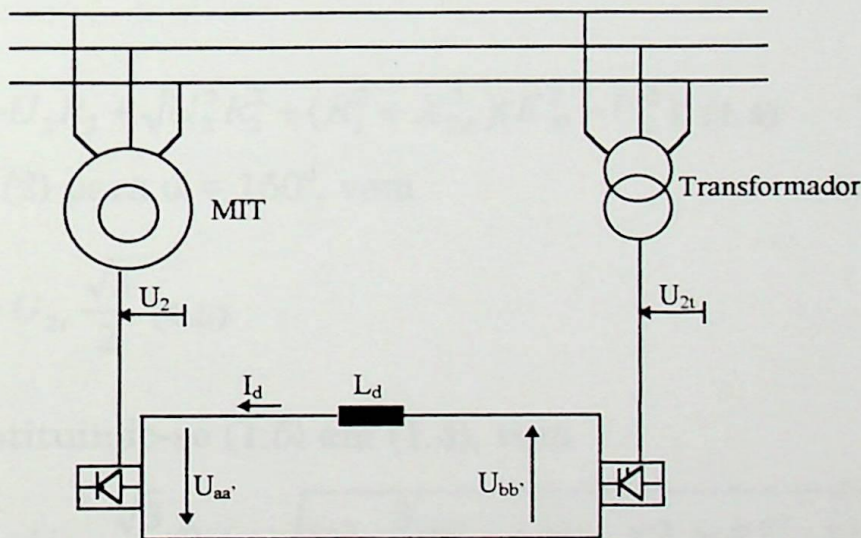


Figura 1.6 - Cascata Subsíncrona simplificada

Onde:

$U_{aa'}$ = Tensão na ponte retificadora

$U_{bb'}$ = Tensão na ponte inversora

U_2 = Tensão eficaz de saída fase-neutro do rotor

U_{2t} = Tensão eficaz fase-neutro no secundário do transformador

I_d = Corrente do rotor retificada

Da Figura 1.6. tem-se:

$$U_{aa'} = 2,34.U_2$$

$$U_{bb'} = 2,34.U_{2t}.\text{Cos}\alpha$$

$$U_{aa'} = U_{bb'}$$

$$2,34.U_2 = 2,34.U_{2t}.\text{Cos}\alpha$$

$$U_2 = |U_{2t}.\text{Cos}\alpha| \quad (1.3)$$

A tensão secundária do transformador será calculada de tal modo que seja nula a corrente do rotor para escorregamento igual a 1 e ângulo de disparo do inversor $\alpha = 150^\circ$. Levando-se em conta estas condições de contorno nas equações (1.2) e (1.3), vem de (1.2):

$$0 = -U_2 R_2 + \sqrt{U_2^2 R_2^2 + (R_2^2 + X_{2P}^2)(E_{20}^2 - U_2^2)} \quad (1.4)$$

e de (2) para $\alpha = 150^\circ$, vem

$$U_2 = U_{2t} \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.5)$$

Substituindo-se (1.5) em (1.4), vem

$$0 = (-U_{2t} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} R_2) + \sqrt{U_{2t}^2 \cdot \frac{3}{4} R_2^2 + (R_2^2 + X_{2P}^2)(E_{20}^2 - U_{2t}^2 \cdot \frac{3}{4})}$$

$$U_{2t}^2 \cdot R_2^2 \frac{3}{4} = U_{2t}^2 \cdot R_2^2 \frac{3}{4} + (R_2^2 + X_{2P}^2)(E_{20}^2 - U_{2t}^2 \cdot \frac{3}{4})$$

$$0 = (R_2^2 + X_{2P}^2)(E_{20}^2 - U_{2t}^2 \cdot \frac{3}{4})$$

$$E_{20}^2 - U_{2t}^2 \cdot \frac{3}{4} = 0$$

$$U_{2t} = \frac{2}{\sqrt{3}} E_{20} \quad (1.6)$$

A equação (1.6) determina a tensão secundária do transformador, a partir das condições de contorno descritas anteriormente.

O torque motor por fase pode ser determinado por:

$$T = \frac{R_2 \left(\frac{1-S}{S} \right) I_2^2}{\frac{2\pi}{60} \cdot n_2} \quad (1.7)$$

Onde:

n_2 - velocidade no eixo do motor em (rpm)

Considerando que n_1 é a velocidade síncrona do campo girante em (rpm), tem-se:

$$n_2 = (1 - S) n_1$$

Substituindo em (1.7), vem:

$$T = \frac{R_2 \left(\frac{1-S}{S} \right) I_2^2}{\frac{2\pi}{60} \cdot (1-S)n_1}$$

$$T = \frac{R_2 I_2^2}{S \cdot n_1} \cdot \frac{30}{\pi} (N \cdot m / FASE) \quad (1.8)$$

Utilizando as equações (1.2), (1.3), (1.6) e (1.8) obtém-se as características do torque versus escorregamento.

Os passos para o traçado destas curvas são os seguintes:

a) Determinar as constantes do motor

$$E_{20}, R_2, X_2 \text{ e } n_1$$

- b) Determinar através da equação (1.6) a tensão secundária do transformador U_{2t} .
- c) Atribuir valores ao ângulo de disparo, que se mantém como parâmetro para cada curva traçada ($90 < \alpha < 150$).
- d) Calcular a tensão do rotor U_2 por intermédio da equação (1.3).
- e) Para cada valor de escorregamento atribuído, calcular a corrente do rotor I_2 por intermediário da equação (1.2).
- f) Substituir S e I_2 na equação (1.8), obtendo desta forma o torque para o valor de S atribuído.

Desta forma obtém-se um ponto da curva torque versus escorregamento.

Para obtenção de outros pontos, mudar o valor do escorregamento e repetir o processo de cálculo (voltar ao passo e).

Para o traçado de outras curvas voltar ao passo C.

A figura 1.7 que segue, mostra o aspecto da característica torque versus escorregamento.

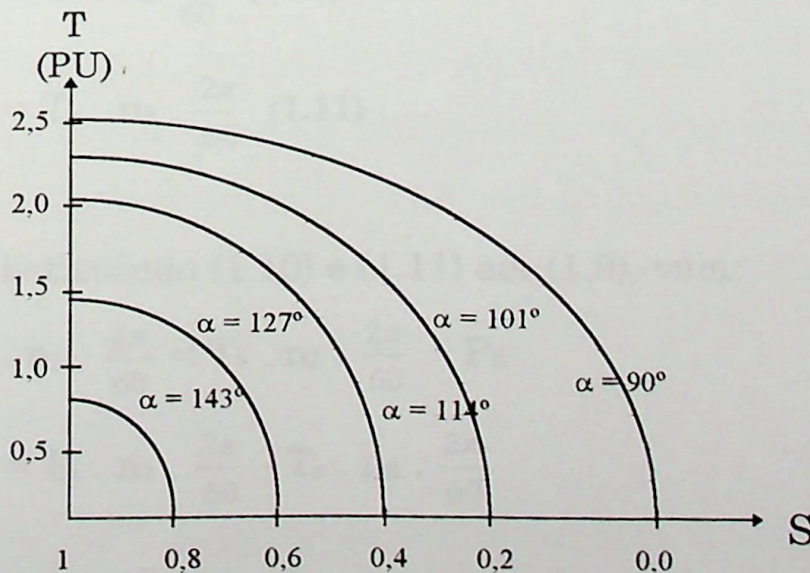


Figura 1.7 - Característica torque X Escorregamento

1.4 - POTÊNCIA RECUPERADA PELA CASCATA SUBSÍNCRONA

Um motor de indução trifásico alimentado com uma fonte de tensão constante, frequência constante é bastante ineficiente para baixas velocidades.

Para operação com velocidade menor que a metade da velocidade síncrona, mais da metade da potência que atravessa o entreferro é dissipada nos enrolamentos do rotor e resistores externos deste.

Se P_1 é a potência ativa que atravessa o entreferro vinda do estator para o rotor, P_2 a potência mecânica exigida pela carga, P_3 as perdas no circuito do rotor, n_1 a velocidade síncrona do campo girante, n_2 a velocidade no eixo do motor e T_e o torque desenvolvido pelo motor, tem-se:

$$P_1 = P_2 + P_3 \quad (1.9)$$

$$P_1 = T_e \cdot n_1 \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (1.10)$$

$$P_2 = T_e \cdot n_2 \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (1.11)$$

Substituindo (1.10) e (1.11) em (1.9), vem:

$$T_e \cdot n_1 \cdot \frac{2\pi}{60} = T_e \cdot n_2 \cdot \frac{2\pi}{60} + P_3$$

$$P_3 = T_e \cdot n_1 \cdot \frac{2\pi}{60} - T_e \cdot n_2 \cdot \frac{2\pi}{60}$$

$$P_3 = T_e (n_1 - n_2) \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (1.12)$$

Sabe-se que:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$$n_1 - n_2 = S \cdot n_1 \quad (1.13)$$

Substituindo (1.13) em (1.12), vem:

$$P_3 = T_e \cdot S \cdot n_1 \cdot \frac{2\pi}{60}$$

Mas,

$$T_e \cdot n_1 \cdot \frac{2\pi}{60} = P_1$$

Assim,

$$P_3 = S \cdot P_1 \quad (1.14)$$

A equação (1.14) define as perdas no circuito do rotor.

Para variar o escorregamento do motor, por exemplo, com uso de resistores no circuito do rotor, aparecerá uma perda adicional nestes, perda esta dissipada em forma de calor, sem nenhum aproveitamento.

O inversor (ponte tiristorizada) usado no circuito da cascata subsíncrona, tem o objetivo de receber esta energia que seria perdida e entregá-la para a fonte de suprimento.

Se a resistência do circuito do rotor é bastante pequena, pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$P_3 = S \cdot P_1 = U_{bb'} \cdot I_d$$

$U_{bb'} \cdot I_d$ é a potência entregue pelo inversor à fonte de suprimento, desprezando as perdas no retificador e inversor, assumindo as condições anteriores.

CAPÍTULO II

FRENAGEM DINÂMICA

A frenagem dinâmica utilizando corrente contínua no estator dos motores em geral tem sido usada há bastante tempo.

Este método de parada de motores ocorre de um

aquecimento significativo em meados de 1930 juntamente com

de estela rotação para laminadores de chapas de aço de alta

velocidade.

O método consiste na injeção de corrente contínua no

estator para substituição à alimentação trífase, a partir do

momento em que o motor está em plena velocidade.

O objetivo desta operação é reduzir a velocidade do

equipamento acionado pelo motor, mas com pontos rotativos.

Quando o motor está em plena velocidade, a velocidade de

cargas descendentes em valores admissíveis.

O método é utilizado também em máquinas fixas,

maquinarias de processo e também retardamentos rápidos de

máquinas de grande potência acionadas por motor de indução, etc.

Quando o motor é desenergizado a rede trífase e ocorre a

alimentação em corrente contínua surge um campo magnético

estacionário no estator, o qual induz uma força eletromotriz no

rotor.

A tensão alternada gerada nos enrolamentos do rotor de

origem corrente contínua, sendo induzida nos enrolamentos

na resistência do circuito do rotor de forma que a

frenagem ou um tempo frenante.



CAPÍTULO II

FRENAGEM DINÂMICA

A frenagem dinâmica utilizando corrente contínua no estator dos motores em gaiola tem sido usada há bastante tempo.

Este método de parada de motores decorre de um acontecimento significativo em meados de 1930, juntamente com o uso de esteira rolante para laminadores de chapas de aço de alta velocidade.

O método consiste na injeção de corrente contínua no estator, em substituição à alimentação trifásica, a partir do instante em que se deseja a redução da velocidade do motor, e tem como objetivo reduzir mais rapidamente a velocidade do equipamento acionado pelo motor, tais como: pontes rolantes, elevadores e gaiolas de minas, mantendo assim a velocidade de cargas descendentes em valores admissíveis.

O método é utilizado também em máquinas têxteis, maquinarias de processo e também retardamentos rápidos de máquinas de grande inércia acionadas por motor de indução, etc.

Quando o motor é desconectado da rede trifásica e recebe a alimentação em corrente contínua, surge um campo magnético estacionário no estator, o qual induz uma força eletromotriz no rotor.

A tensão alternada gerada nos enrolamentos do rotor originam correntes que circulam nestes, cuja potência dissipada na resistência do circuito do rotor constitui uma força de frenagem ou um torque frenante.

Quando o motor é do tipo rotor bobinado, pode-se inserir resistências auxiliares.

A vantagem sobre o método de corrente reversa ou “Inversão de duas fases”, é que neste, o sentido de rotação não inverte e a energia dissipada no rotor é muito menor.

A desvantagem é que a fonte de corrente contínua deve estar disponível.

A exatidão com a qual é desejável prever os torques de frenagem depende de aplicação particular.

O controle da frenagem pode ser feito pela variação da intensidade da corrente contínua ou ainda pela introdução de resistências em série com o rotor, quando no caso do motor de rotor bobinado (Anéis).

2.1. ANÁLISE DA FRENAGEM POR INTERMÉDIO DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Seja o circuito equivalente de um motor de indução trifásico, mostrado na figura 2.1.

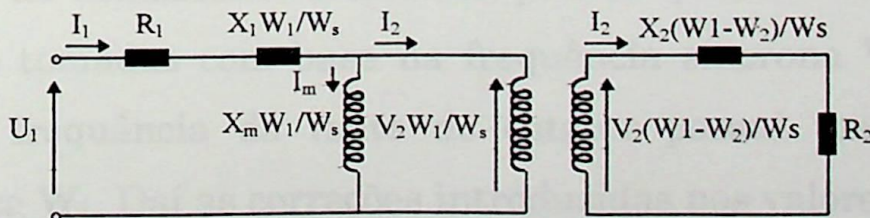


Figura 2. 1 - Circuito Equivalente do motor de indução trifásico

Na figura 2.1, tem-se:

U_1 = Tensão por fase do estator, à frequência W_1 (v)

R_1 = Resistência por fase do estator (Ω)

W_s = Frequência angular síncrona (rad/s elétrico)

W_1 = Frequência angular da tensão do estator (rad/s elétrico)

W_2 = Frequência angular do rotor (rad/s elétrico)

V_2 = Tensão induzida por fase no circuito do rotor tomada como base na frequência angular W_s (v) (rotor parado)

R_2 = Resistência por fase do rotor (Ω)

I_m = Corrente de magnetização por fase (A)

I_1 = Corrente do estator por fase (A)

I_2 = Corrente do rotor por fase (A)

$(W_1 - W_2)$ = Frequência da tensão induzida no circuito do rotor (rad/s elétrico)

X_1, X_2, X_m = Reatância de dispersão do estator, reatância de dispersão do rotor, reatância de magnetização, expressas em (Ω /fase), valores calculados com base na frequência angular W_s .

O circuito apresentado se mostra ligeiramente modificado quanto ao usualmente conhecido, pois as quantidades V_2, X_1, X_2 e X_m são tomadas com base na frequência síncrona W_s , enquanto que a frequência da fonte do estator possui uma frequência genérica W_1 . Daí as correções introduzidas nos valores citados.

A tensão e a frequência estatórica estão dentro dos valores nominais, o circuito magnético é portanto linear.

Para maior facilidade a relação de transformação será tomada igual a 1.

2.2. MODIFICAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Um circuito equivalente que tenha uma única frequência W_s , será determinado tanto para o circuito do estator como para o circuito do rotor.

Para isto, as grandezas do rotor serão divididas por $(W_1 - W_2) / W_s$ e as do estator por W_1 / W_s .

Com base neste procedimento, e considerando-se ainda a relação de transformação de 1:1, pode-se unificar os dois circuitos.

A figura 2.2. mostra o circuito equivalente.

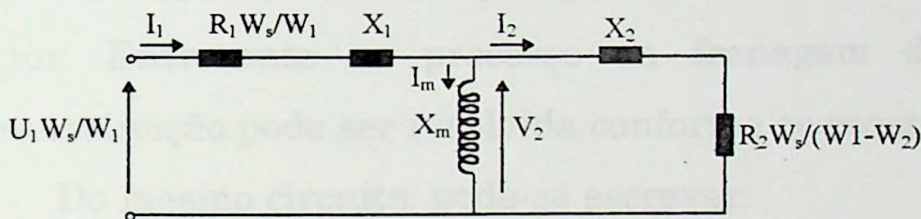


Figura 2. 2 - Circuito equivalente do motor de indução a frequência W_s

O circuito da figura 2.2 admite quaisquer valores de W_1 e W_2 .

A expressão do torque eletromagnético por fase, em Watts síncronos, é dada pela potência dissipada na resistência do rotor.

$$\frac{R_2 W_s}{W_1 - W_2}$$

Assim,

$$T_e = R_2 I_2^2 \cdot \frac{W_s}{W_1 - W_2} \text{ (Watts síncronos/fase)}$$

Em condições de frenagem dinâmica, a corrente imposta ao estator é contínua, portanto $W_1 = 0$. Neste caso o torque é expresso por:

$$T_{cc} = -R_2 I_2^2 \cdot \frac{W_s}{W_2}, \text{ que sendo negativo caracteriza um torque}$$

frenante.

2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA FRENAGEM DINÂMICA

Atribuindo o valor de $W_1 = 0$, às grandezas do circuito da figura 2.2, a fonte de tensão primária assim como a resistência do circuito primário apresentarão valores infinitos, o que causa portanto, uma indeterminação para a corrente do circuito do estator. Entretanto no processo da frenagem dinâmica esta indeterminação pode ser resolvida conforme se mostra a seguir:

Do mesmo circuito, pode-se escrever:

$$I_1 \lim_{W_1 \rightarrow 0} = \frac{U_1 \frac{W_s}{W_1} - V_2}{R_1 \frac{W_s}{W_1} + jX_1}$$

Aplicando a regra de L'Hopital,

$$I_1 = \frac{-U_1 W_s W_1^{-2}}{-R_1 W_s W_1^{-2}}$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}$$

Sendo a corrente I_1 perfeitamente conhecida, pode-se reescrever o circuito como mostrado na figura 2.3.

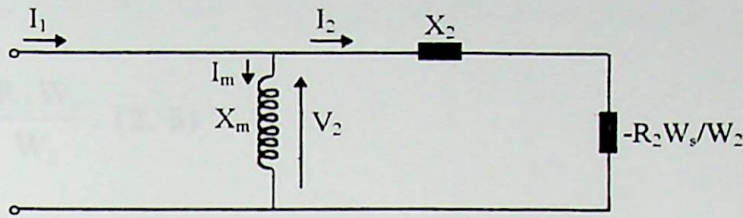


Figura 2.3 - Circuito equivalente para frenagem dinâmica

Chamado de $R = -\frac{R_2 W_s}{W_2}$ e

escrevendo as equações para o circuito anterior vem:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_2 \quad (2.1)$$

$$\dot{I}_m = \dot{V}_2 / jX_m \quad (2.2)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{V}_2 / (R + jX_2) \quad (2.3)$$

De (2.2) e (2.3), vem:

$$\dot{I}_m = \dot{I}_2 (R + jX_2) / jX_m$$

Substituindo em (2.1)

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 (R + jX_2) / jX_m + \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 [R + j(X_2 + X_m)] / jX_m$$

$$\dot{I}_2 = \frac{j\dot{I}_1 X_m}{R + j(X_2 + X_m)}$$

$$|\dot{I}_2|^2 = \frac{(I_1)^2 (X_m)^2}{R^2 + (X_2 + X_m)^2}$$

O torque frenante será portanto:

$$T_{cc} = \frac{R (I_1)^2 (X_m)^2}{R^2 + (X_2 + X_m)^2} \quad (2.4)$$

Onde,

$$R = -\frac{R_2 W_s}{W_2} \quad (2.5)$$

O torque em (N.m), pode ser obtido dividindo-se a equação (2.4) pela respectiva velocidade síncrona.

Considerando X_m constante, isto é para as condições insaturáveis, o torque frenante máximo ocorrerá quando:

$$\frac{dT_{cc}}{dR} = 0$$

$$T_{cc} = \frac{R (I_1)^2 (X_m)^2}{R^2 + (X_2 + X_m)^2}$$

$$\frac{dT_{cc}}{dR} = \frac{(I_1)^2 (X_m)^2 [R^2 + (X_2 + X_m)^2] - 2R (I_1)^2 (X_m)^2 R}{[R^2 + (X_2 + X_m)^2]^2} = 0$$

$$(I_1)^2 (X_m)^2 R^2 + (I_1)^2 (X_m)^2 (X_2 + X_m)^2 - 2R(I_1)^2 (X_m)^2 R = 0$$

$$R(I_1)^2 (X_m)^2 - (2R)^2 (I_1)^2 (X_m)^2 = -(I_1)^2 (X_m)^2 (X_2 + X_m)^2$$

$$-R^2 (I_1)^2 (X_m)^2 = -(I_1)^2 (X_m)^2 (X_2 + X_m)^2$$

$$R^2 = (X_2 + X_m)^2$$

$R = (X_2 + X_m)$, valor de R para o qual ocorrerá o torque frenante máximo.

Substituindo em (2.4)

$$T_{ccmax} = \frac{(I_1)^2 (X_m)^2 (X_2 + X_m)}{(X_2 + X_m)^2 + (X_2 + X_m)^2}$$

$$T_{ccmax} = \frac{(I_1)^2 (X_m)^2}{2(X_2 + X_m)} \quad (\text{Watts síncronos/Fase}) \quad (2.6)$$

A velocidade W_2 para a qual ocorrerá o torque frenante máximo pode ser calculada, pois $R = \frac{R_2 W_s}{W_2}$, logo:

$$W_2(T_{ccmax}) = \frac{R_2 W_s}{R_{Tccmax}} = \frac{R_2 W_s}{X_2 + X_m}$$

$$W_2(T_{ccmax}) = \frac{R_2 W_s}{X_2 + X_m} \quad (2.7)$$

A expressão (2.4) mostra que o torque frenante depende da corrente estatórica I_1 e da resistência rotórica R_2 .

Nota: No caso da relação de transformação ser diferente de 1, a corrente estatórica I_1 , deve ser referida ao rotor.

2.4. RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE CONTÍNUA ESTATÓRICA I_{cc} E A CORRESPONDENTE CORRENTE ALTERNADA I_1 EQUIVALENTE

A relação entre a corrente contínua do estator I_{cc} , e a equivalente corrente alternada I_1 em valor eficaz, depende da conexão utilizada do estator.

Duas conexões do estator serão mostradas a seguir, nas figuras 2.4 e 2.5.

1ª Conexão

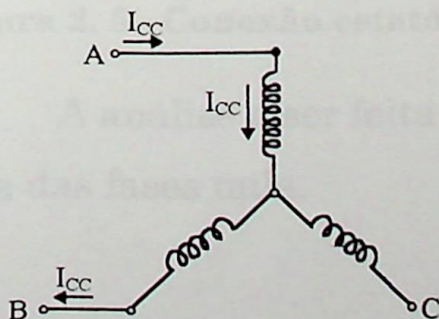


Figura 2.4 - Conexão estatórica para frenagem dinâmica

Nesta situação a corrente da fase C é nula e as das fases A e B, atingem valores instantâneos de módulos iguais. Isto ocorre quando as correntes das fases A e B atingem valores iguais a $\frac{\sqrt{3}}{2}$ do valor de pico, ou seja:

$$I_{cc} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_1 \right) \cdot \sqrt{2}$$

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_1$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{cc}$$

sendo:

I_1 = valor eficaz da corrente alternada equivalente

I_{cc} = corrente contínua no estator

2ª Conexão

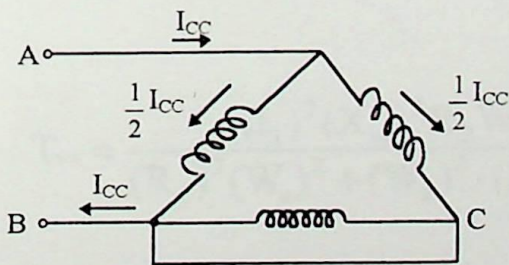


Figura 2. 5 - Conexão estática para frenagem dinâmica

A análise a ser feita é similar a anterior, isto é, corrente em uma das fases nula.

$$\frac{1}{2} I_{cc} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_1 \right) \cdot \sqrt{2}$$

$$I_1 = \frac{I_{cc}}{\sqrt{6}}$$

sendo:

I_1 = valor eficaz da corrente alternada equivalente

I_{cc} = corrente contínua no estator

2.5. CÁLCULO DO TEMPO DE DESACELERAÇÃO

Considerando-se o tempo de frenagem devido somente à ação da frenagem dinâmica ou seja desprezando o torque de atrito, tem-se das equações (2.4) e (2.5):

$$T_{cc} = \frac{(I_1)^2 (X_m)^2 \left(\frac{R_2 W_s}{W_2} \right)}{\left(\frac{R_2 W_s}{W_2} \right)^2 + (X_2 + X_m)^2}$$

$$T_{cc} = \frac{(I_1)^2 (X_m)^2 R_2 W_s W_2}{(R_2)^2 (W_s)^2 + (W_2)^2 \cdot (X_2 + X_m)^2} \text{ (Watts síncronos/fase)}$$

$$3T_{cc} = \frac{3(I_1)^2 (X_m)^2 R_2 W_s}{(R_2)^2 (W_s)^2 + (W_2)^2 \cdot (X_2 + X_m)^2} \cdot W_2 \text{ (Watts síncronos)}$$

$$\frac{3T_{cc}}{W_s} = \frac{3(I_1)^2 (X_m)^2 R_2}{(R_2)^2 (W_s)^2 + (W_2)^2 \cdot (X_2 + X_m)^2} \cdot W_2 \text{ (N.m)}$$

Chamando-se:

$$\frac{3T_{cc}}{W_s} = M_{cc}$$

Vem:

$$M_{cc} = \frac{3(I_1)^2(X_m)^2 R_2}{(R_2)^2(W_s)^2 + (W_2)^2 \cdot (X_2 + X_m)^2} \cdot W_2 \text{ (N.m)}$$

Sabe-se que:

$$M_{cc} = -J \frac{dW_2}{dt} + DW_2$$

Desprezando o efeito do atrito ($DW_2 = 0$), tem-se:

$$dt = \frac{-J}{M_{cc}} \cdot dW_2$$

Integrando vem:

$$\int_0^{t_f} dt = - \int_{W_0}^{W_f} J \frac{R_2^2(W_s)^2 + (W_2)^2(X_2 + X_m)^2}{3(I_1)^2(X_m)^2 R_2 W_2} \cdot dW_2$$

$$\int_0^{t_f} dt = - \int_{W_0}^{W_f} \frac{JR_2(W_s)^2}{3(I_1)^2(X_m)^2 W_2} \cdot dW_2 - \int_{W_0}^{W_f} \frac{J(X_2 + X_m)^2 W_2}{3(I_1)^2(X_m)^2 R_2} dW_2$$

$$t \Big|_0^{t_f} = - \frac{JR_2(W_s)^2}{3(I_1)^2(X_m)^2} \ln W_2 \Big|_{W_0}^{W_f} - \frac{J(X_2 + X_m)^2}{2[3(I_1)^2(X_m)^2 R_2]} (W_2)^2 \Big|_{W_0}^{W_f}$$

$$t_f = - \frac{JR_2(W_s)^2}{3(I_1)^2(X_m)^2} \ln\left(\frac{W_f}{W_0}\right) - \frac{J(X_2 + X_m)^2}{6(I_1)^2(X_m)^2 R_2} [(W_f)^2 - (W_0)^2] \quad (2.8)$$

Na equação (2.8), tem-se:

t_f = Tempo de frenagem entre W_0 e W_f em segundos

I_1 = Corrente alternada equivalente, referida ao rotor

R_2 = Resistência rotórica total (acrescida das resistências externas)

J = Momento de Inércia total referido ao eixo do motor
(kg.m²)

W_0 = Velocidade inicial do rotor (rad/s elétrico)

W_f = Velocidade final do rotor (rad/s elétrico)

Algumas simplificações serão introduzidas na equação do tempo de frenagem (t_f) sem incorrer em grandes erros.

O termo logarítmico representa uma parcela muito pequena do tempo total, podendo portanto ser desprezado, e a equação 2.8 fica então:

$$t_f = -\frac{J(X_2 + X_m)^2}{6[(I_1)^2(X_m)^2 R_2]} \cdot [(W_f)^2 - (W_0)^2]$$

Considerando também que X_m é bem maior que X_2 , vem:

$$\frac{(X_2 + X_m)^2}{(X_m)^2} \cong 1$$

Logo:

$$t_f = -\frac{J[(W_f)^2 - (W_0)^2]}{6[(I_1)^2 R_2]} \quad (\text{SEG})$$

Para velocidade final igual a zero, ou seja $W_f = 0$, tem-se:

$$t_f = \frac{J[(W_0)^2]}{6[(I_1)^2 R_2]} \quad (\text{SEG}) \quad (2.9)$$

A equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma:

$$t_f = \frac{1}{2} J(W_0)^2 \cdot \frac{1}{3R_2(I_1)^2}$$

A primeira parcela $\left(\frac{1}{2} J W_0^2\right)$ corresponde a energia cinética armazenada no eixo do motor para velocidade inicial W_0 . A segunda parcela $\left[\frac{1}{3R_2(I_1)^2}\right]$ corresponde a potência elétrica dissipada nas resistências do rotor.

A equação (2.9) também despreza o torque de atrito. Logo para valores pequenos de corrente contínua na armadura e resistência do rotor também pequena, o torque devido ao atrito é relevante, proporcionando erro grande no cálculo do tempo de frenagem.

Para que o torque frenante apresente um valor superior ao torque devido ao atrito e o cálculo do tempo de frenagem apresente um valor mais exato, tanto o valor da corrente injetada no estator quanto o da resistência rotórica devem ser altos, não esquecendo de respeitar os limites térmicos do motor.

Variando-se convenientemente a corrente contínua aplicada ao estator e a resistência rotórica total, pode-se então realizar a frenagem dinâmica de acordo com as exigências do acionamento em questão.

2.6. ARRANJO LABORATORIAL PARA VERIFICAÇÃO DO PROCESSO FRENANTE

Características do motor de indução trifásico

- Tensão nominal..... 220 (V)
- Corrente nominal..... 7,5 (A)
- Potência nominal 1,86 (KW)
- Fator de potência 0.82
- Rotação nominal 1410 (rpm)
- Conexão do estator Triângulo

A figura 2.6 mostra as conexões.

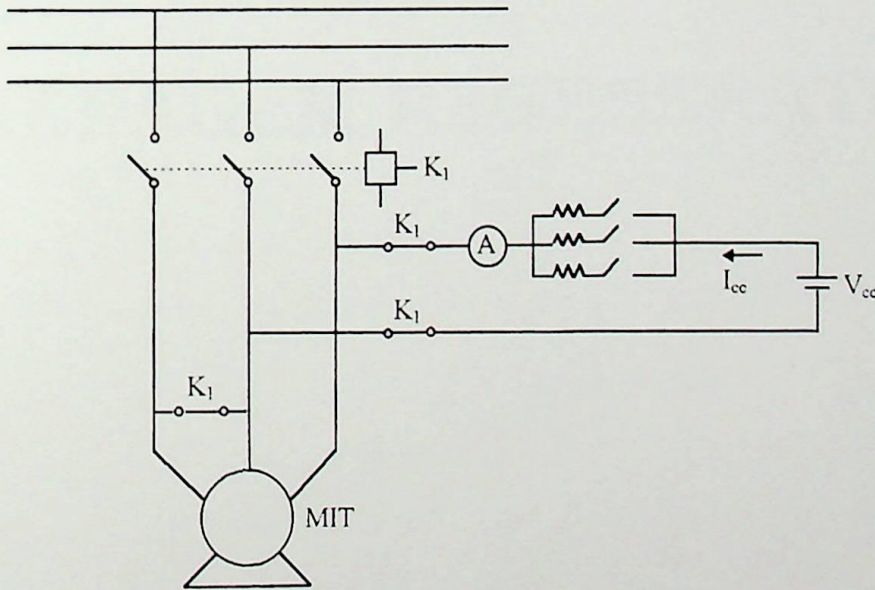


Figura 2. 6 - Arranjo Laboratorial

Com o arranjo simplificado da figura 2.6, diversos valores de corrente contínua foram injetadas no estator do motor de indução, tão logo este era desligado da fonte de corrente alternada.

Para cada corrente contínua injetada, o motor estava sempre funcionando a vazio a uma velocidade de 1760 (rpm), com rotor curto circuitado.

A tabela 2.1 mostra a variação dos valores de corrente contínua injetada e os respectivos tempos de frenagem.

I_{cc} (A)	0,0	1,0	1,8	2,6	3,3	4,1	4,8	5,1	6,7	8,2
t_f (SEG)	13,5	12,5	11,0	9,5	8,7	8,0	7,4	6,9	5,1	4,4

Tabela 2.1 - Tempos de frenagem

CAPÍTULO III

FRENAGEM REGENERATIVA

No capítulo anterior foi mostrado o processo para realização da frenagem dinâmica, no qual toda energia que é utilizada para parar a máquina é dissipada em forma de calor no resistor de rotor total do motor.

Quando se o motor está sendo acionado pela mesma fonte de energia, e utilizando o mesmo princípio para pará-lo, pode-se obter uma frenagem regenerativa (R.R.) nos enrolamentos do motor.

CAPÍTULO III

FRENAGEM REGENERATIVA

Sabe-se que o torque desenvolvido pelo motor é diretamente proporcional ao fluxo criado pelo estator que é girante na velocidade síncrona e à corrente de rotor. Sob condições normais de operação o sentido e velocidade do campo está definido pelas ligações do motor a rede.

Portanto uma forma de parar o motor é frear o campo girante. Quando se desliga o motor da fonte trifásica e aplica corrente contínua nos enrolamentos do rotor, produz-se um campo magnético estacionário, justificando desta forma a frenagem regenerativa.

Quando se desliga o motor da fonte trifásica e aplica corrente contínua nos enrolamentos do rotor, produz-se um campo magnético estacionário, justificando desta forma a frenagem regenerativa.

Quando se desliga o motor da fonte trifásica e aplica corrente contínua nos enrolamentos do rotor, produz-se um campo magnético estacionário, justificando desta forma a frenagem regenerativa.



CAPÍTULO III

FRENAGEM REGENERATIVA

No capítulo anterior foi mostrado o processo para realização da frenagem dinâmica, na qual toda energia que é utilizada para parar a máquina é dissipada em forma de calor na resistência rotórica total do motor.

Agora se o motor está sendo acionado pela cascata subsíncrona no rotor, e utilizando o mesmo princípio para pará-lo, ou seja, injetando corrente contínua (I_{cc}) nos enrolamentos do estator, duas vantagens podem ser obtidas. A primeira é que proporciona ao motor uma parada mais rápida e suave, e a segunda é que parte da energia cinética armazenada no eixo do motor é devolvida à rede em forma de energia elétrica pelo sistema inversor da cascata, durante o período em que o motor está freando (Frenagem Regenerativa).

Sabe-se que o torque devolvido pelo motor é diretamente proporcional ao fluxo criado pelo estator que é girante na velocidade síncrona e à corrente do rotor. Sob condição normal de operação o sentido e velocidade do campo está definido pelas ligações do motor a rede.

Portanto uma forma de parar o motor é frear o campo girante.

Quando se desliga o motor da fonte trifásica e injeta corrente contínua nos enrolamentos do estator, produz-se um campo magnético estacionário, justificando desta forma porque o motor pára mais rapidamente.

3.1. ARRANJO LABORATORIAL PARA VERIFICAÇÃO DA FRENAGEM REGENERATIVA

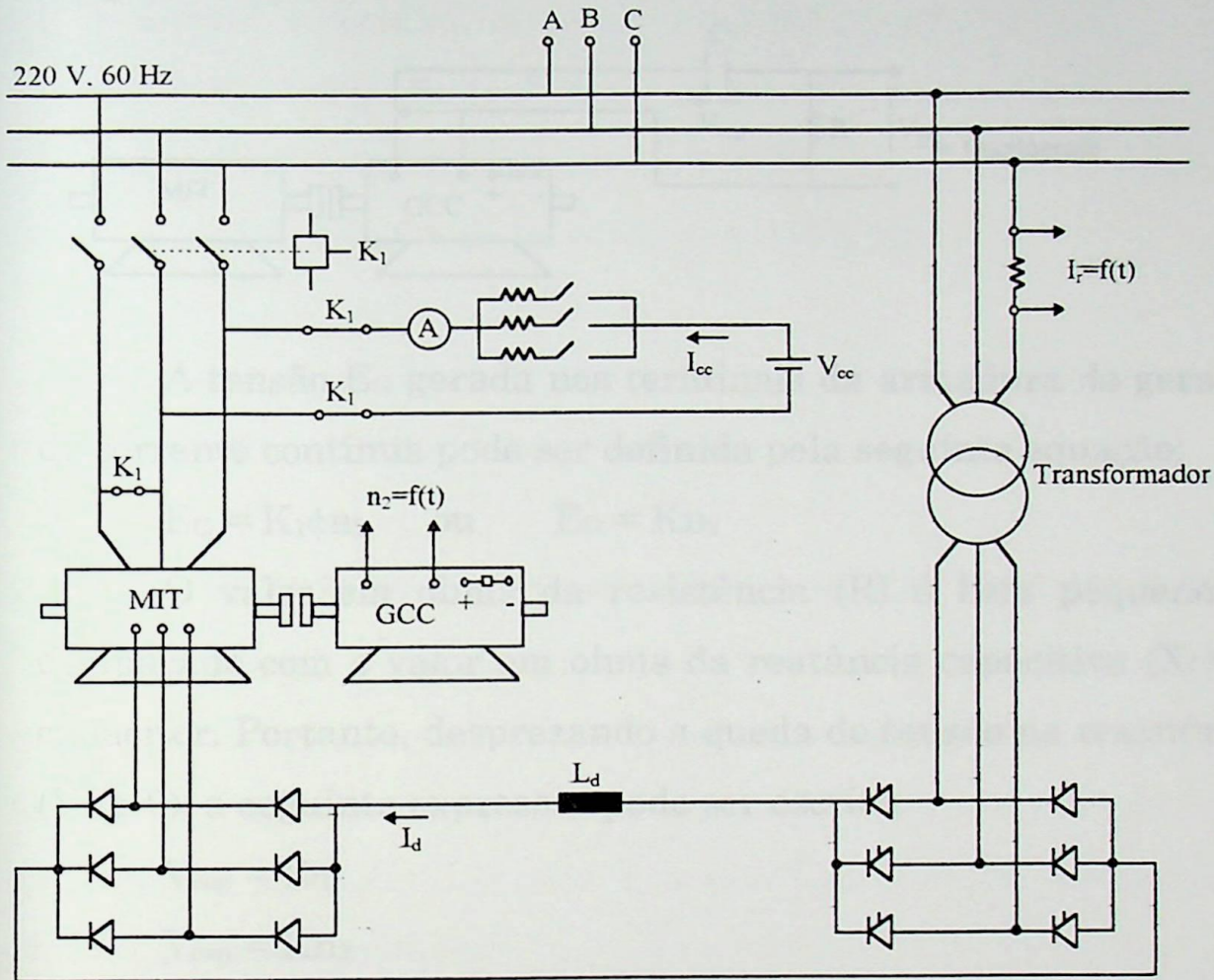
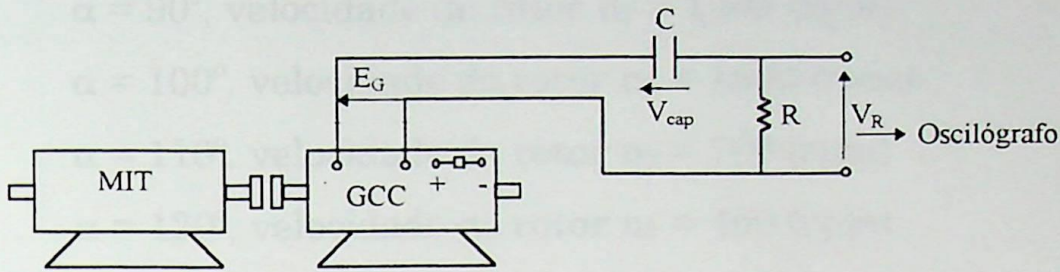


Figura 3.1 - Arranjo Laboratorial

Como arranjo mostrado na figura 3.1 e com o uso de um equipamento próprio levantou-se as seguintes características durante o processo de frenagem:

- Velocidade do motor (n_2) em função do tempo
 $n_2 \times f(t)$
- Torque frenante (T_{cc}) versus velocidade do motor
 $T_{cc} \times n_2 (1)$
- Corrente (I_r) em função do tempo no primário do transformador
 $I_r \times f(t)$

(1) Circuito elétrico para obtenção do aspecto qualitativo do torque frenante versus velocidade do motor.



A tensão E_G gerada nos terminais da armadura do gerador de corrente contínua pode ser definida pela seguinte equação:

$$E_G = K_1 \phi n_2 \quad \text{ou} \quad E_G = K n_2$$

O valor em ohms da resistência (R) é bem pequeno se comparado com o valor em ohms da reatância capacitiva (X_C) do capacitor. Portanto, desprezando a queda de tensão na resistência ($V_R \cong 0$), a seguinte expressão pode ser escrita:

$$V_{\text{cap}} = E_G$$

$$V_{\text{cap}} = K n_2$$

$$i_{\text{cap}} = C \frac{dV_{\text{cap}}}{dt}$$

$$V_R = R i_{\text{cap}}$$

$$V_R = R \cdot C \frac{dV_{\text{cap}}}{dt}$$

$$V_R = R \cdot C \frac{dK n_2}{dt}$$

$$V_R = R \cdot C \cdot K \frac{dn_2}{dt}$$

$$V_R = K_2 \cdot \frac{dn_2}{dt}$$

A expressão final é proporcional ao torque frenante, cuja expressão é dada por $J \frac{dn_2}{dt}$.

Os valores escolhidos para o ângulo de disparo α da ponte de tiristores para a realização dos ensaios foram os seguintes:

$\alpha = 90^\circ$, velocidade do rotor $n_2 = 1300$ (rpm)

$\alpha = 100^\circ$, velocidade do rotor $n_2 = 1000$ (rpm)

$\alpha = 110^\circ$, velocidade do rotor $n_2 = 700$ (rpm)

$\alpha = 120^\circ$, velocidade do rotor $n_2 = 400$ (rpm)

O torque resistente oferecido ao motor, foi somente o torque devido ao atrito (motor a vazio).

3.2. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL A 90°

As figuras numeradas de 3.2 a 3.3, mostram a característica do torque versus velocidade, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor e a intensidade da corrente contínua injetada nos enrolamentos do estator do motor de indução trifásico.

As figuras numeradas de 3.4 a 3.5, mostram a característica da velocidade versus tempo, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor, a intensidade da corrente contínua e o tempo de frenagem do motor.

A figura numerada como 3.6 mostra a característica da corrente versus tempo, durante o processo de frenagem, vista em uma das fases do primário do transformador da cascata subsíncrona.

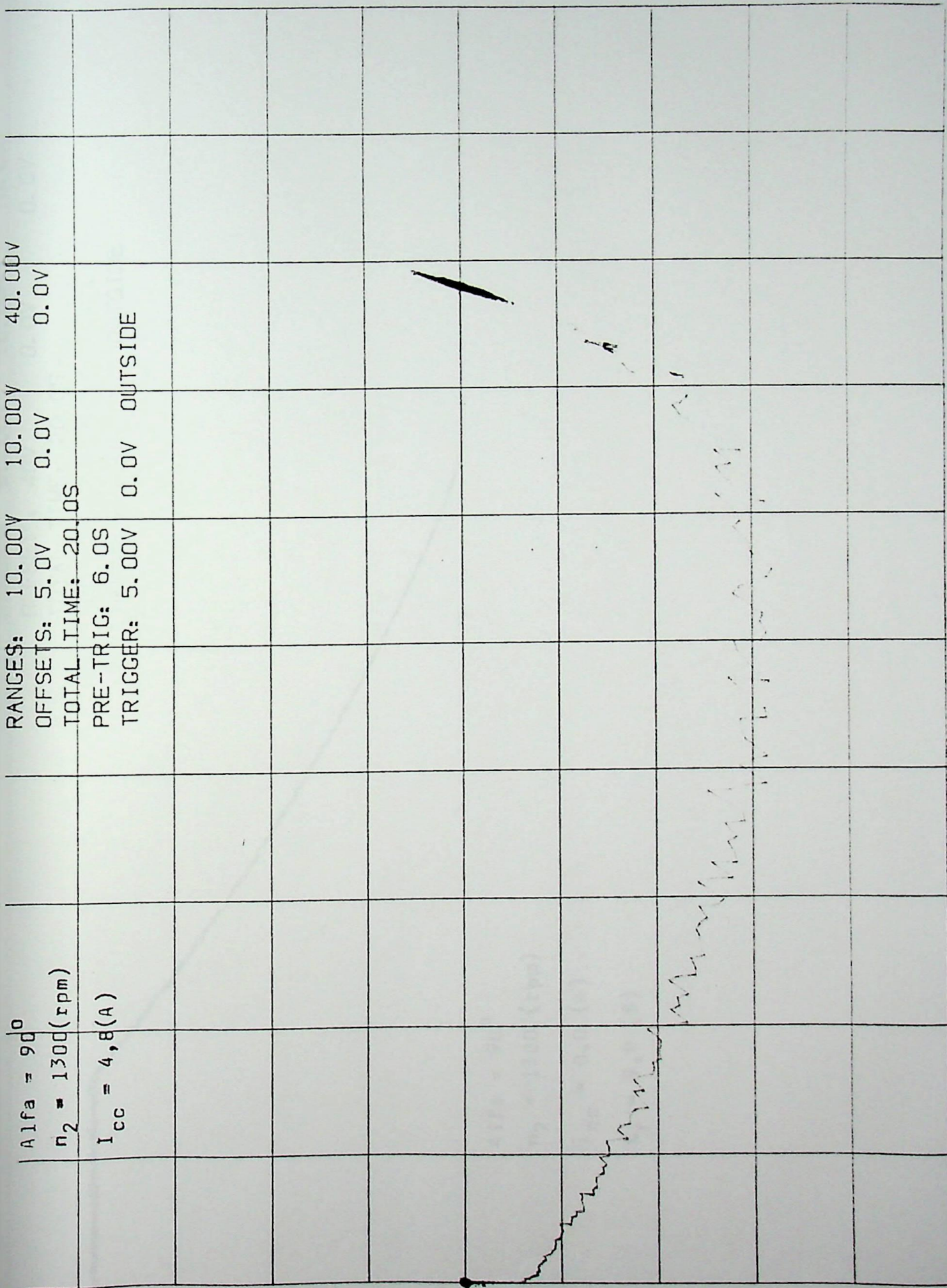
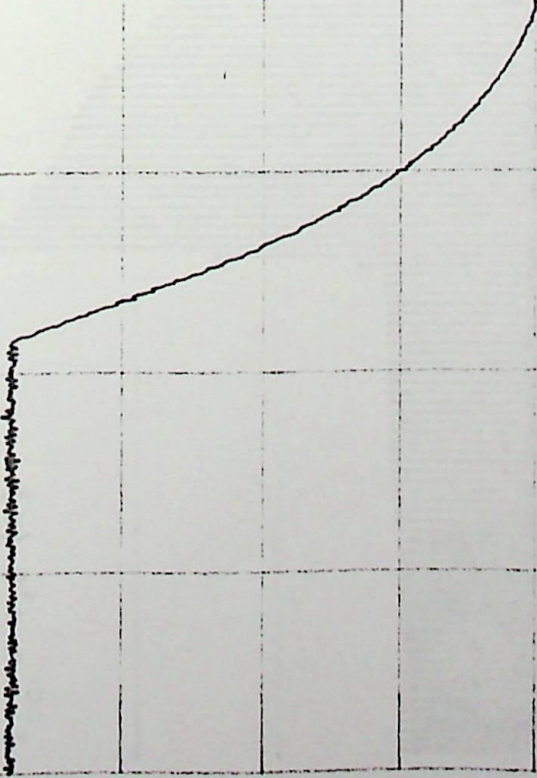


Figura 3.3 - Torque x Velocidade

RANGES: 80.00V 10.00V 10.00V
OFFSETS: 40V 0.0V 0.0V
TOTAL TIME: 20.0S
POST-TRIG: 0.0S
TRIGGER: 0.0V 1V OUTSIDE



$\alpha = 90^\circ$
 $n_2 = 1300$ (rpm)
 $I_{CC} = 4,8$ (A)
 $t_f = 3,3$ (S)

Figura 3.5 -- Velocidade x Tempo

OFFSETS: 1.0V 0.0V 0.0V
TOTAL TIME: 10.0S
POST-TRIG: 0.0S
TRIGGER: 0.0V 0.02V OUTSIDE

Alfa = 90°
n₂ = 1300 (rpm)
I_{cc} = 4,8 (A)

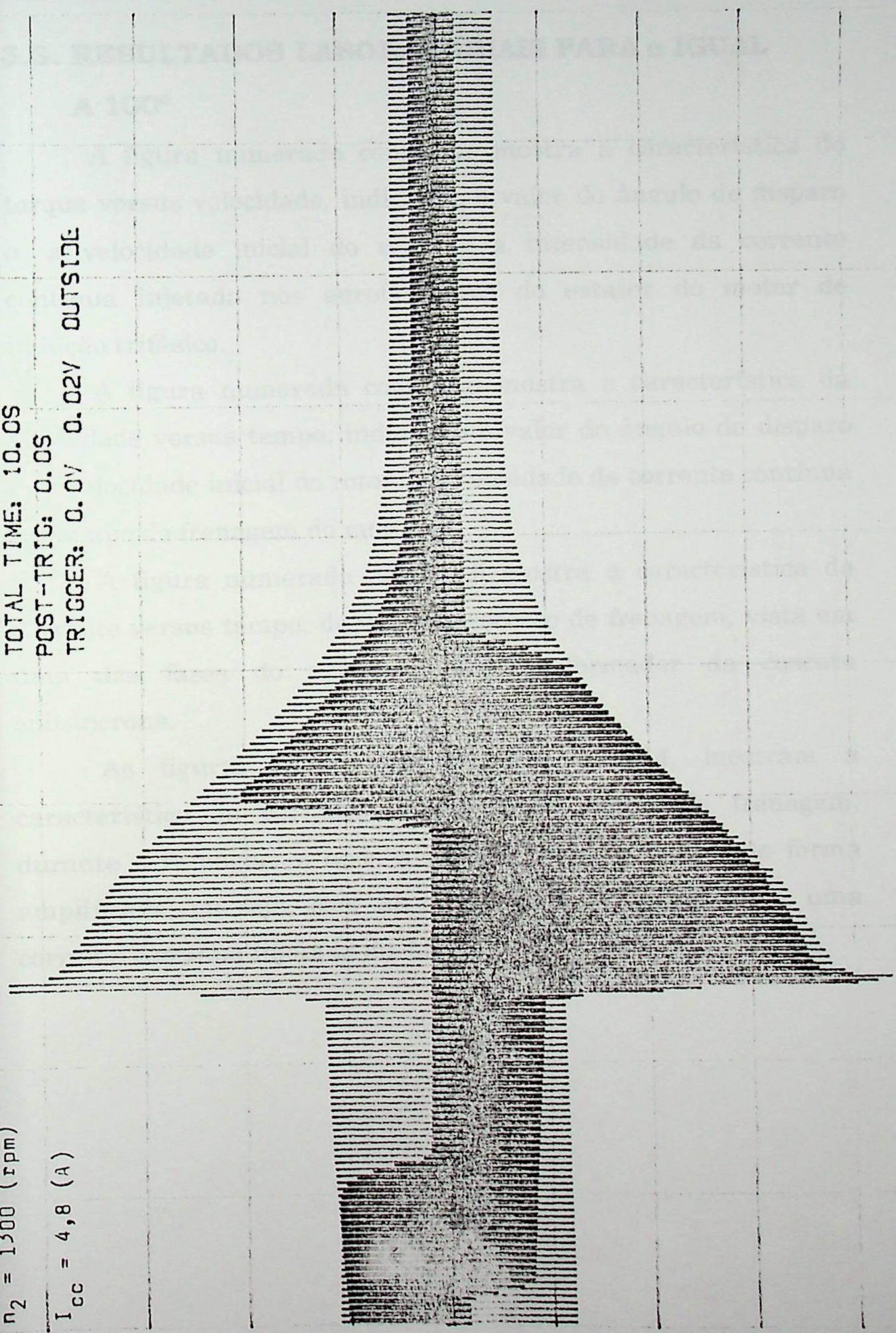


Figura 3.6 - Corrente x Tempo

3.3. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL

A 100°

A figura numerada como 3.7 mostra a característica do torque versus velocidade, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor e a intensidade da corrente contínua injetada nos enrolamentos do estator do motor de indução trifásico.

A figura numerada como 3.8 mostra a característica da velocidade versus tempo, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor, a intensidade da corrente contínua e o tempo de frenagem do motor.

A figura numerada como 3.9 mostra a característica da corrente versus tempo, durante o processo de frenagem, vista em uma das fases do primário do transformador da cascata subsíncrona.

As figuras numeradas de 3.10 a 3.14, mostram a característica da corrente versus tempo antes da frenagem, durante a frenagem e após a parada total do motor, de forma amplificada, ou seja, com alta velocidade do papel, para uma corrente contínua injetada de 4,8 (A).

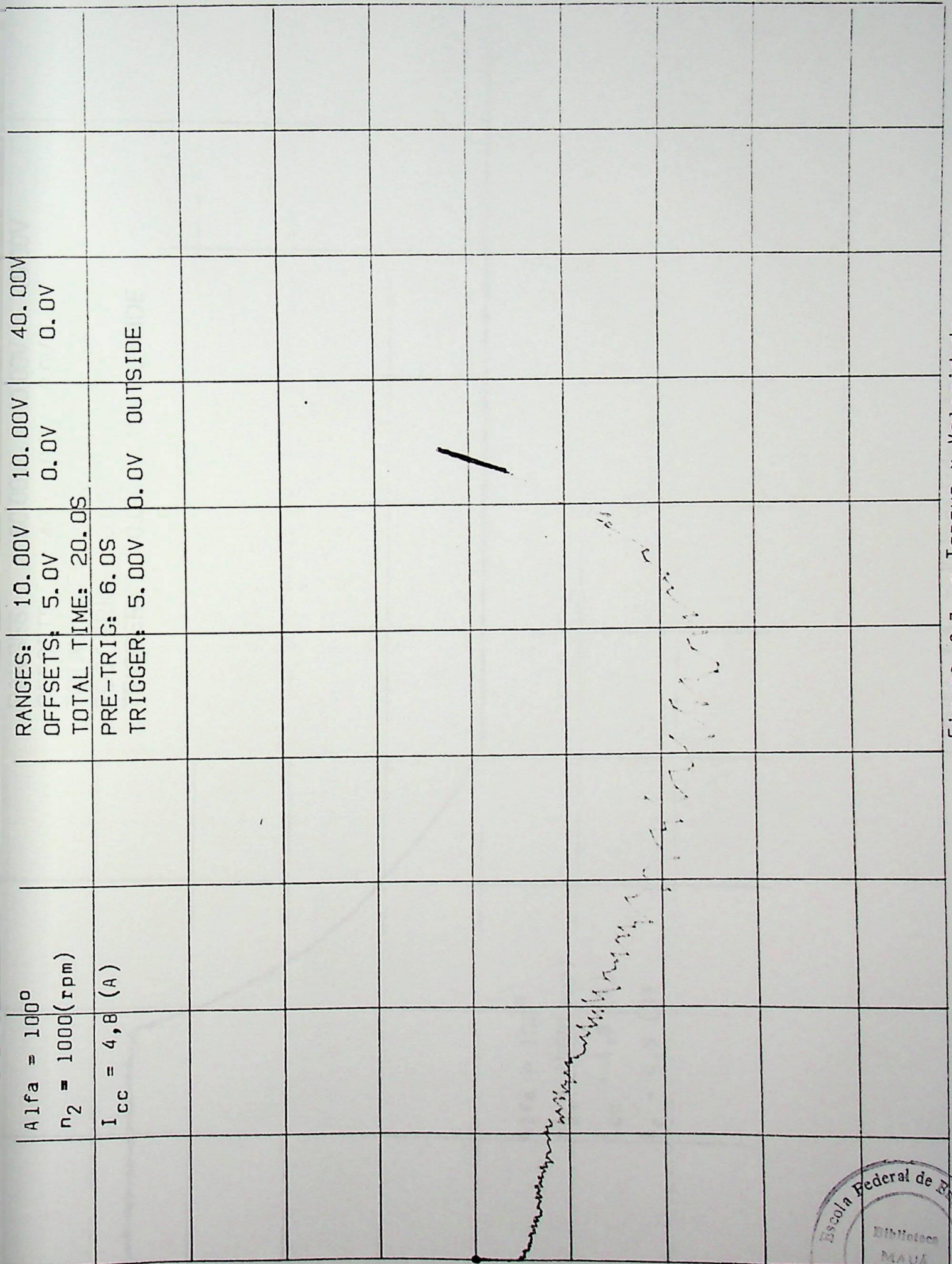


Figura 3.7 - Torque x Velocidade



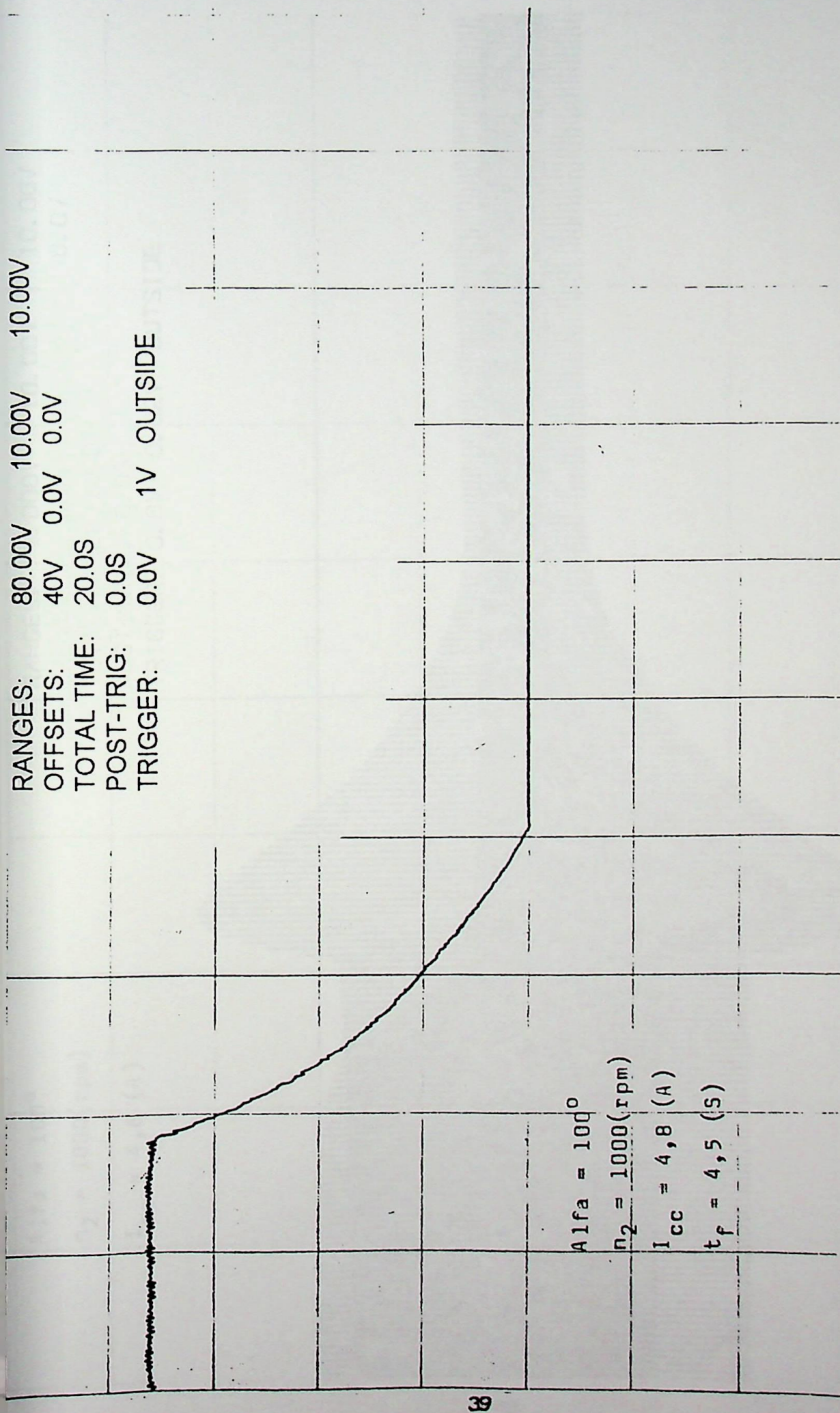


Figura 3.8 - Velocidade x Tempo

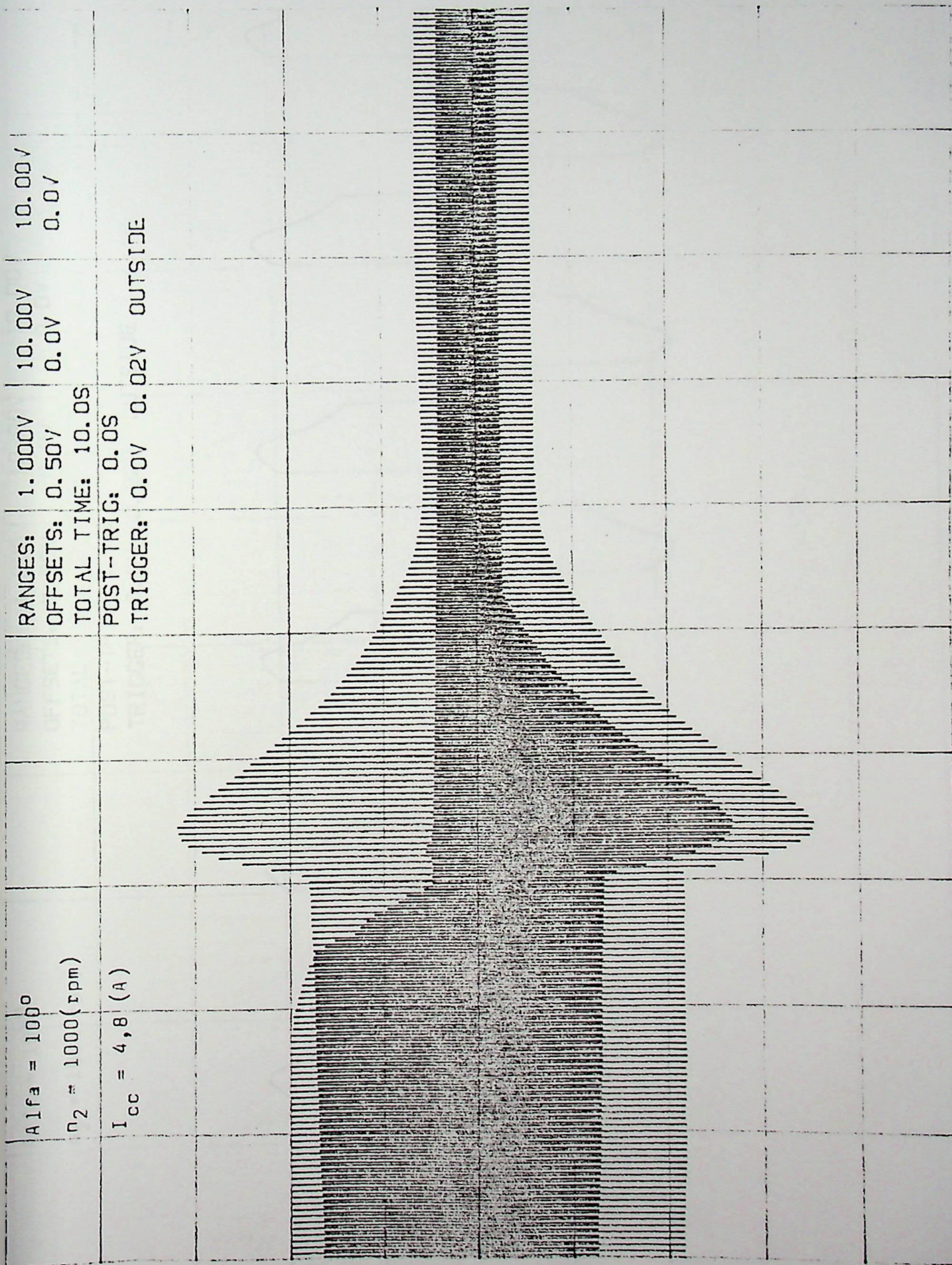


Figura 3.9, - Corrente x Tempo

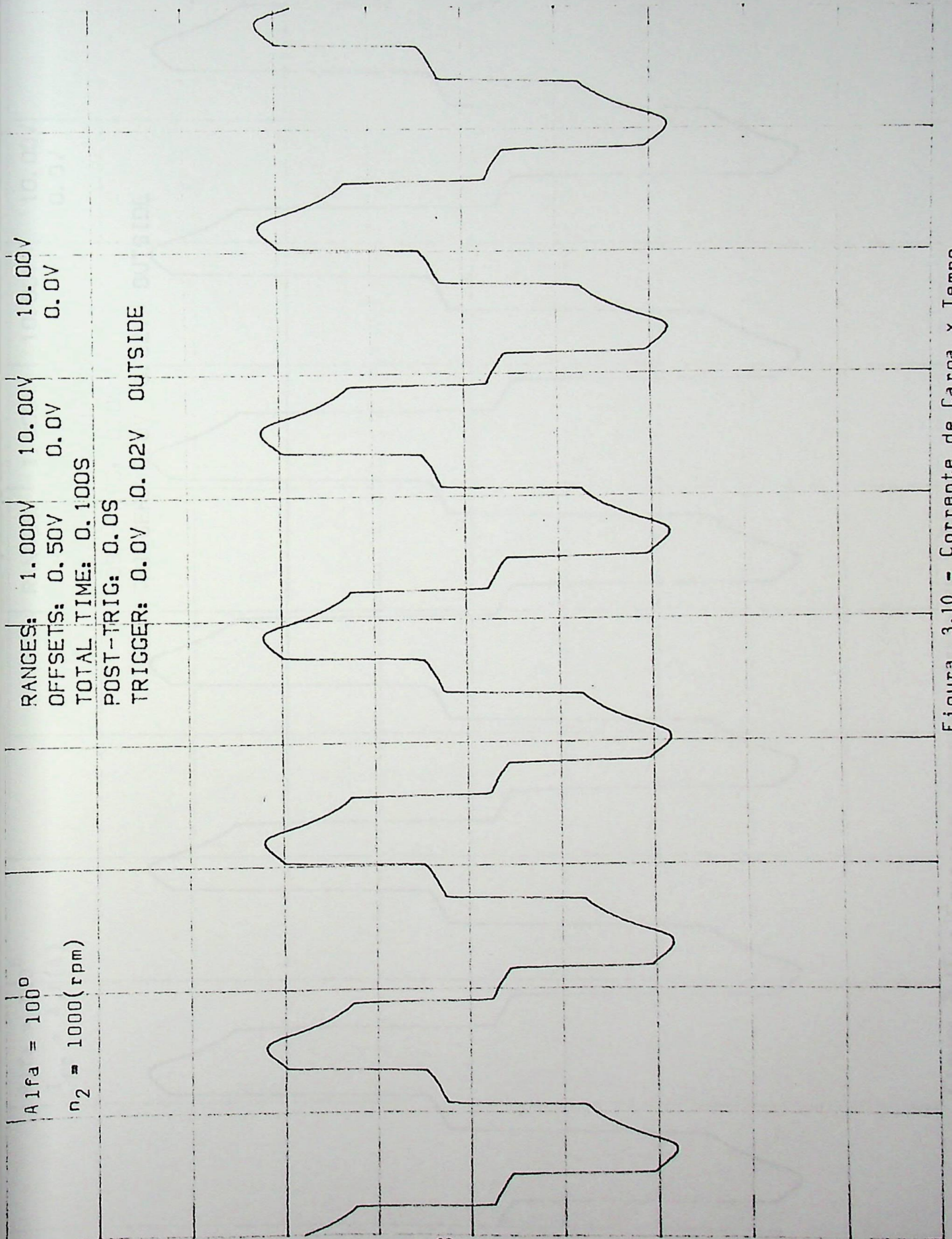


Figura 3.10 - Corrente de Carga x Tempo

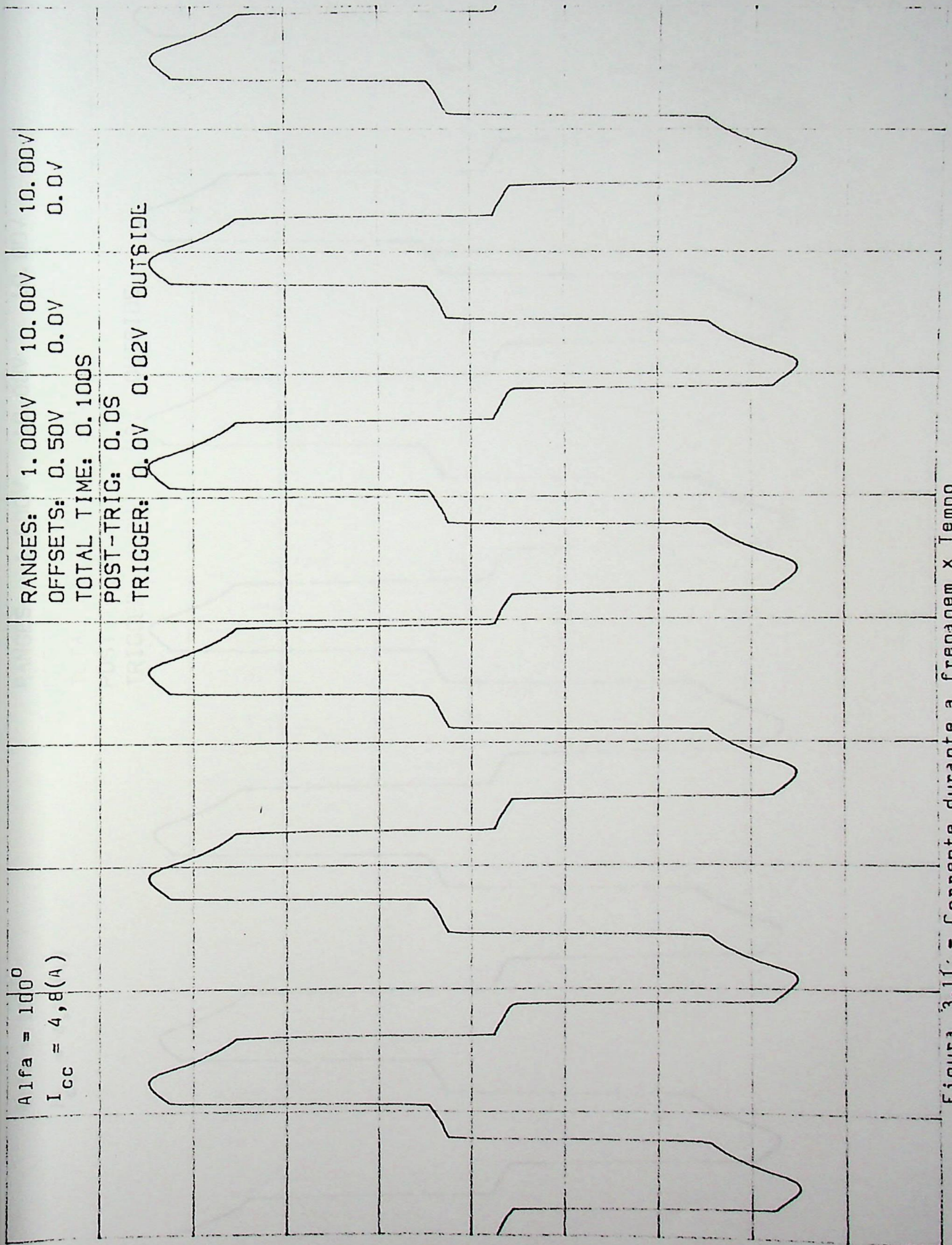


Figura 3.11 - Corrente durante a frenagem x Tempo

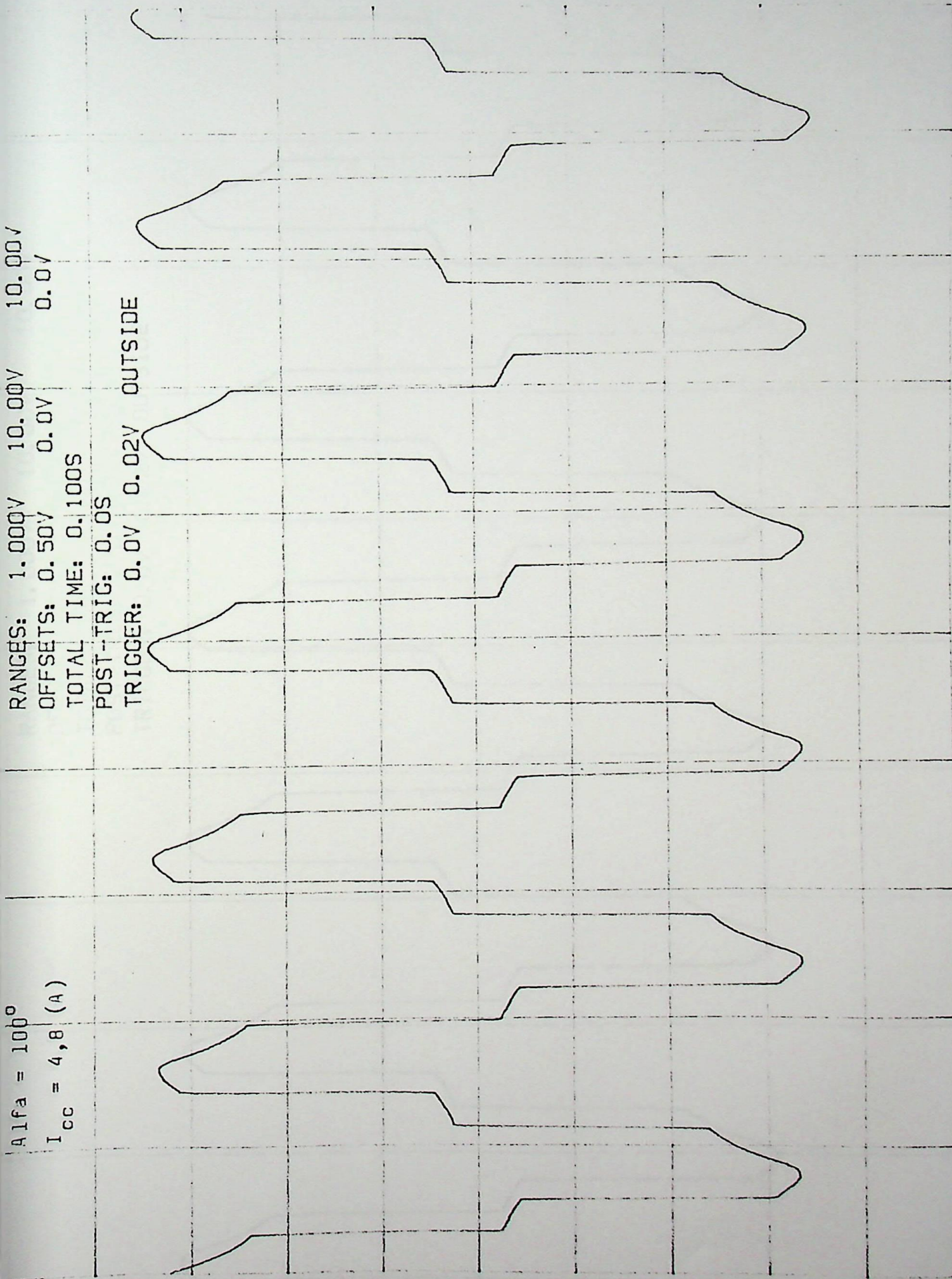


Figura 3.12 - Corrente durante a frenagem x Tempo

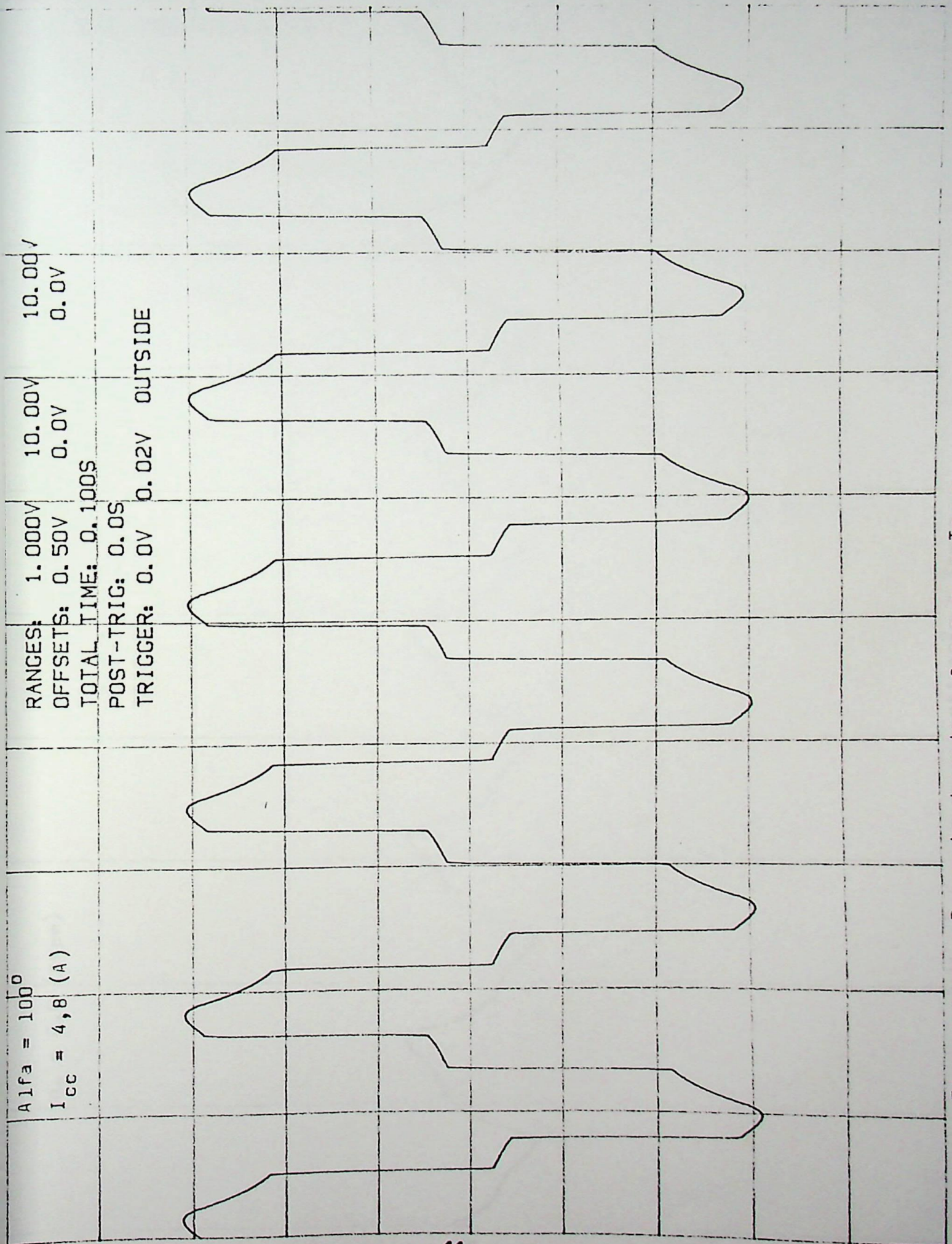


Figura 3.13. - Corrente durante a frenagem x Tempo

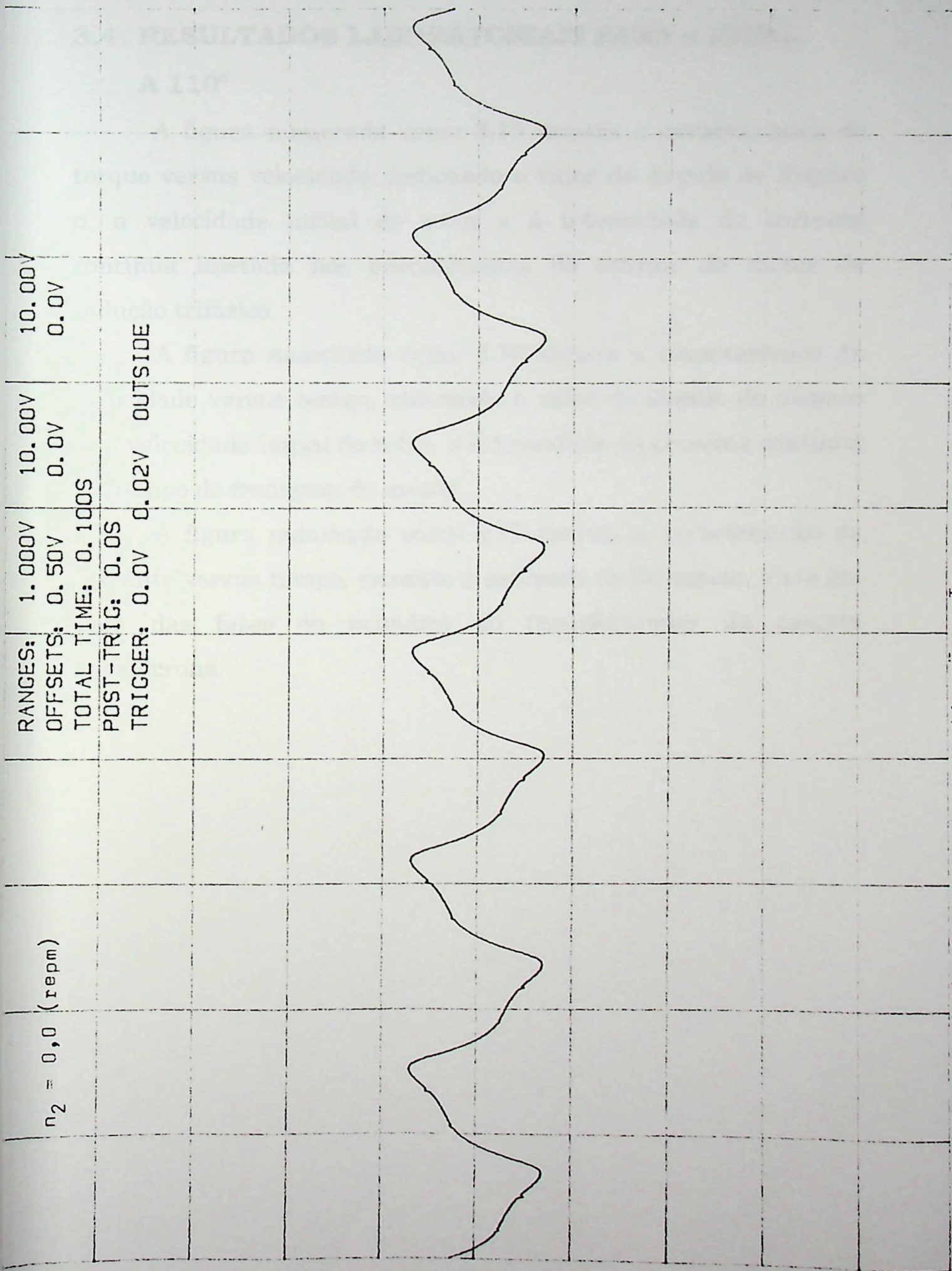


Figura 3.14 - Corrente de magnetização x Tempo

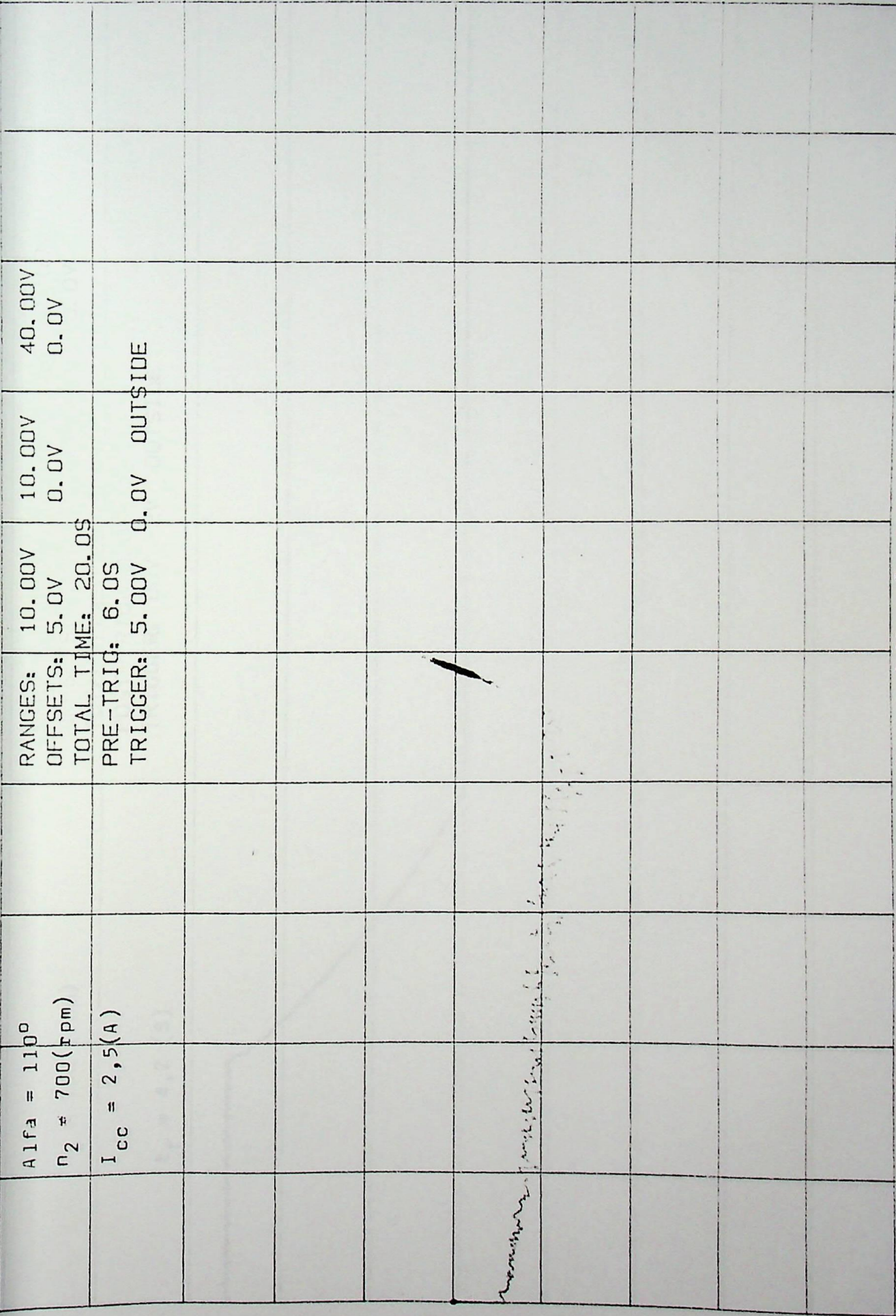
3.4. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL

A 110°

A figura numerada como 3.15 mostra a característica do torque versus velocidade, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor e a intensidade da corrente contínua injetada nos enrolamentos do estator do motor de indução trifásico.

A figura numerada como 3.16 mostra a característica da velocidade versus tempo, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor, a intensidade da corrente contínua e o tempo de frenagem do motor.

A figura numerada como 3.17 mostra a característica da corrente versus tempo, durante o processo de frenagem, vista em uma das fases do primário do transformador da cascata subsíncrona.



RANGES: 10.00V 10.00V 40.00V
 OFFSETS: 5.0V 0.0V 0.0V
 TOTAL TIME: 20.0S
 PRE-TRIG: 6.0S
 TRIGGER: 5.00V 0.0V OUTSIDE

Alfa = 110°
 n₂ = 700 (rpm)
 I_{cc} = 2,5(A)

Figura 3.15 - Torque x Velocidade

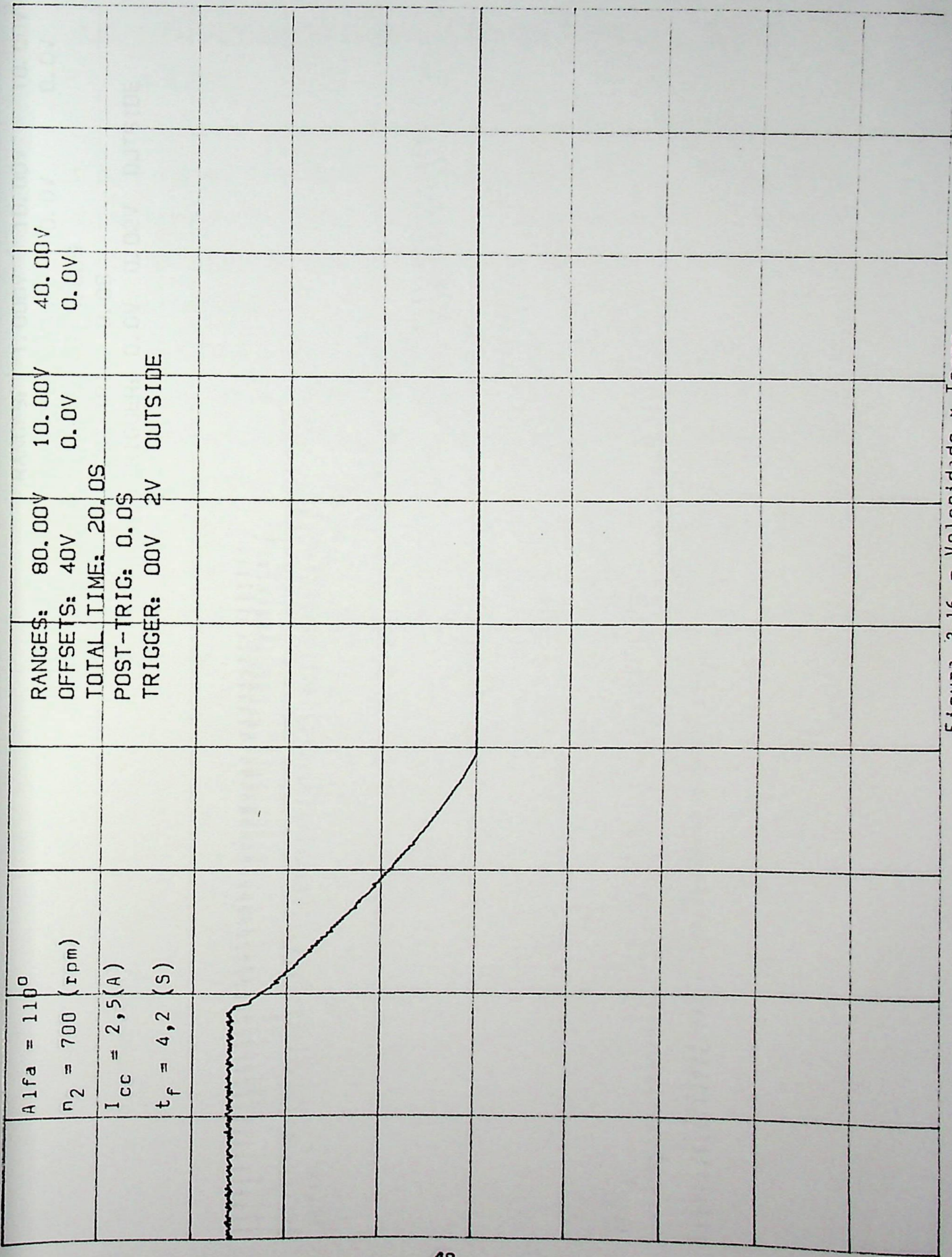


Figura 3.16 - Velocidade x Tempo

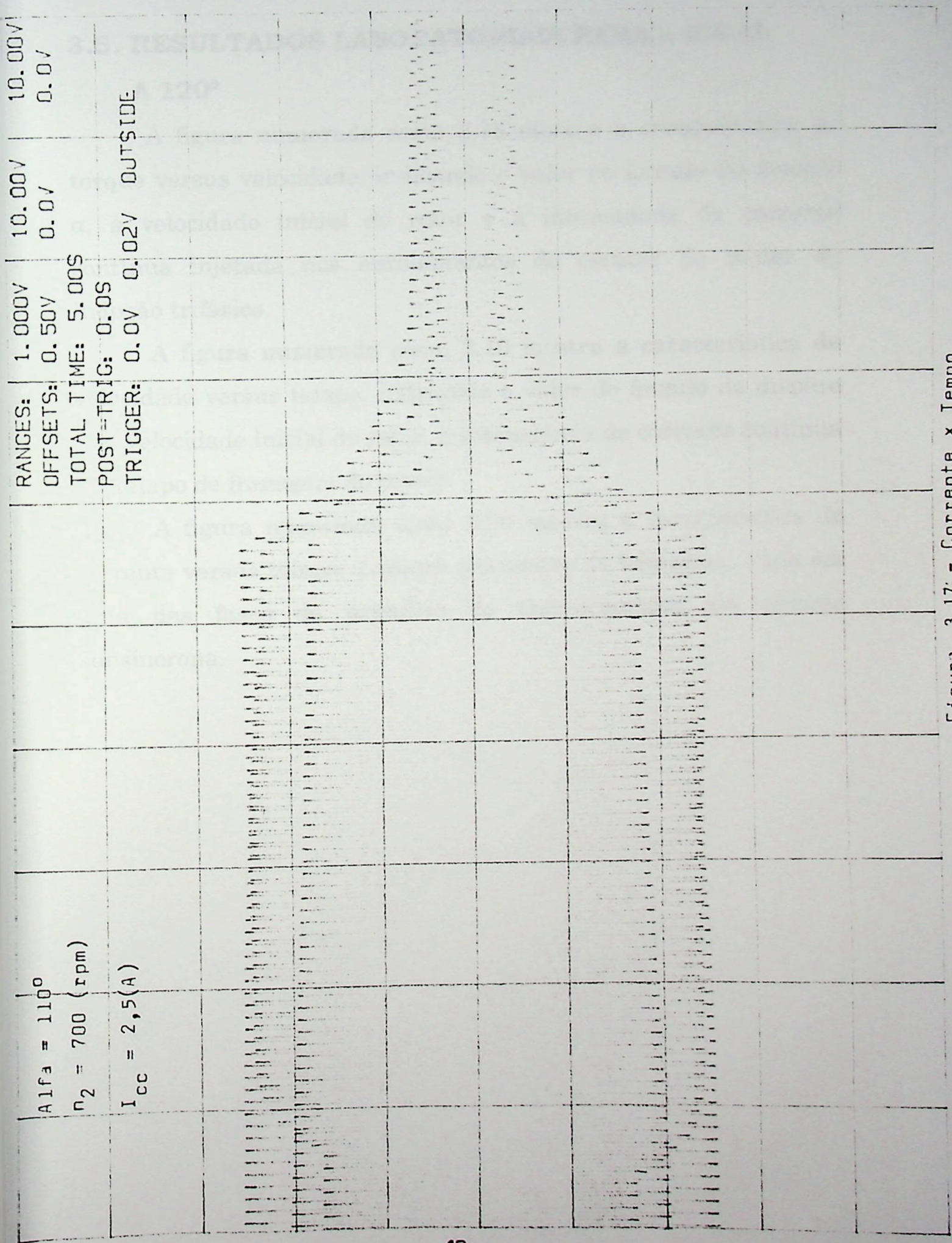


Figura 3.17 - Corrente x Tempo

3.5. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA α IGUAL

A 120°

A figura numerada como 3.18 mostra a característica do torque versus velocidade, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor e a intensidade da corrente contínua injetada nos enrolamentos do estator do motor de indução trifásico.

A figura numerada como 3.19 mostra a característica da velocidade versus tempo, indicando o valor do ângulo de disparo α , a velocidade inicial do rotor, a intensidade da corrente contínua e o tempo de frenagem do motor.

A figura numerada como 3.20 mostra a característica da corrente versus tempo, durante o processo de frenagem, vista em uma das fases do primário do transformador da cascata subsíncrona.

RANGES: 10.00V 10.00V 40.00V
OFFSETS: 5.0V 0.0V 0.0V
TOTAL TIME: 20.0S
POST-TRIG: 6.0S
TRIGGER: 5.0V 0.0V OUTSIDE

$\alpha = 120^\circ$
 $n_2 = 400$ (rpm)
 $I_{cc} = 4,0$ (A)

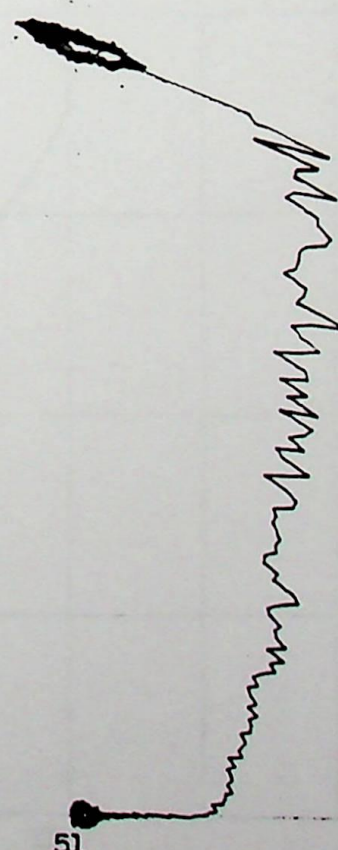


Figura 3.18. - Torque x Velocidade

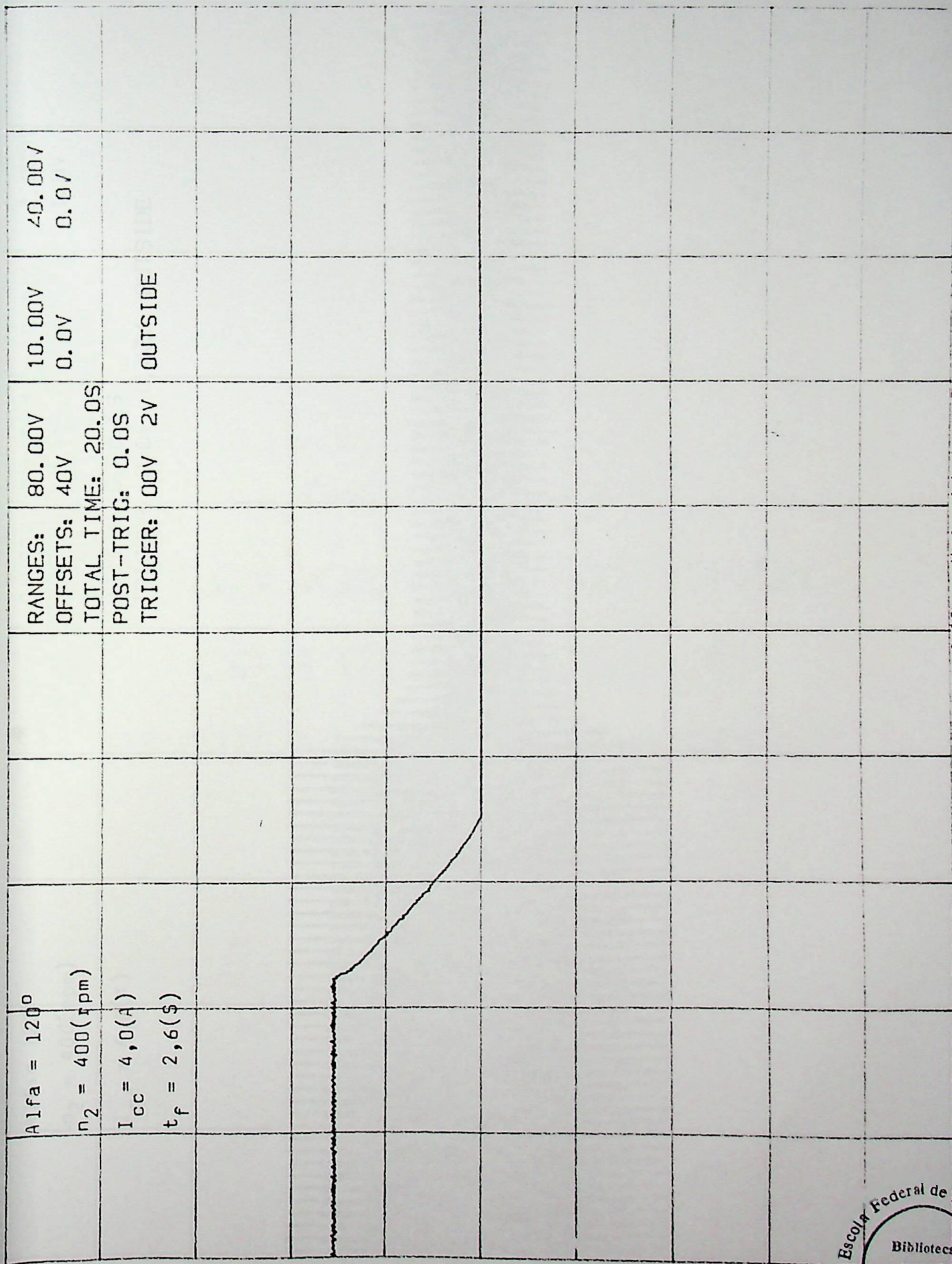
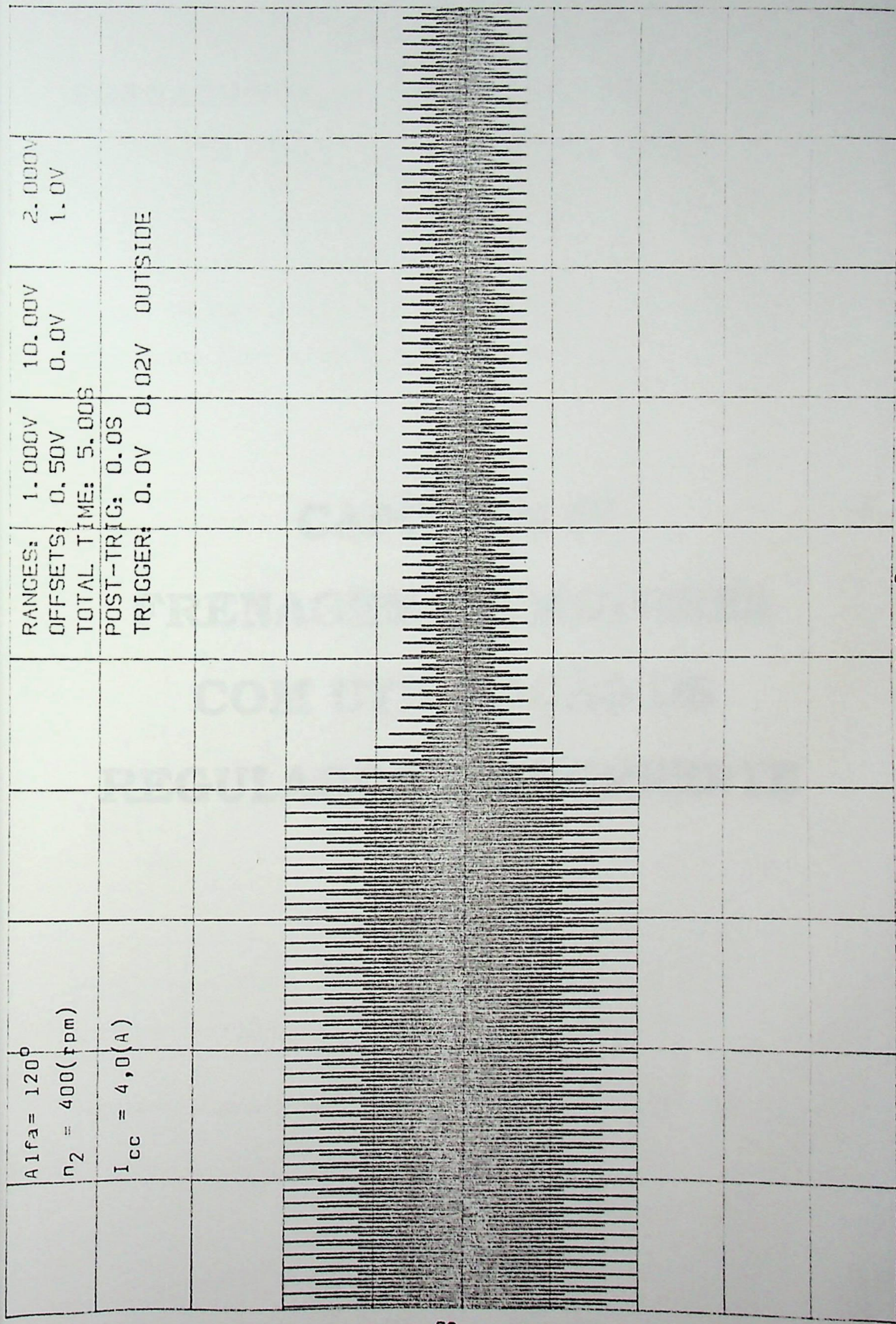


Figura 3.19 - Velocidade x Tempo



Alfa = 120°
 $n_2 = 400$ (rpm)
 $I_{cc} = 4,0$ (A)

RANGES: 1.000V 10.00V 2.000V
 OFFSETS: 0.50V 0.0V 1.0V
 TOTAL TIME: 5.00S
 POST-TRIG: 0.0S
 TRIGGER: 0.0V 0.02V OUTSIDE

Figura 3.20 - Corrente x Tempo

CAPÍTULO IV

FRENAGEM DE MOTORES COM UTILIZAÇÃO DE REGULADOR DE CORRENTE

A figura 4.1 que segue ilustra o esquema de frenagem de um motor usando um regulador de corrente com controle de corrente constante durante a frenagem.

CAPÍTULO IV

FRENAGEM DE MOTORES COM UTILIZAÇÃO DE REGULADOR DE CORRENTE

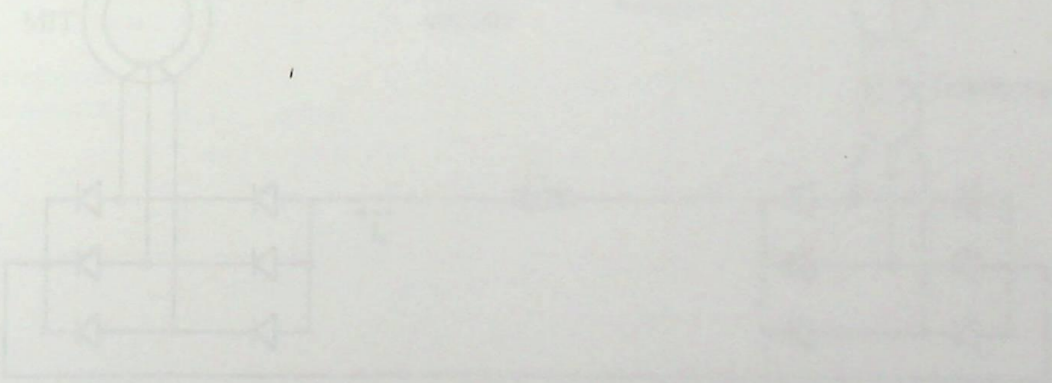


Figura 4.1 - Circuito de frenagem de um motor com regulador de corrente.

CAPÍTULO IV

FRENAGEM DE MOTORES COM UTILIZAÇÃO DE REGULADOR DE CORRENTE

A figura 4.1 que segue, mostra a configuração do sistema usando um regulador de corrente, para manter a corrente no link DC constante durante a frenagem.

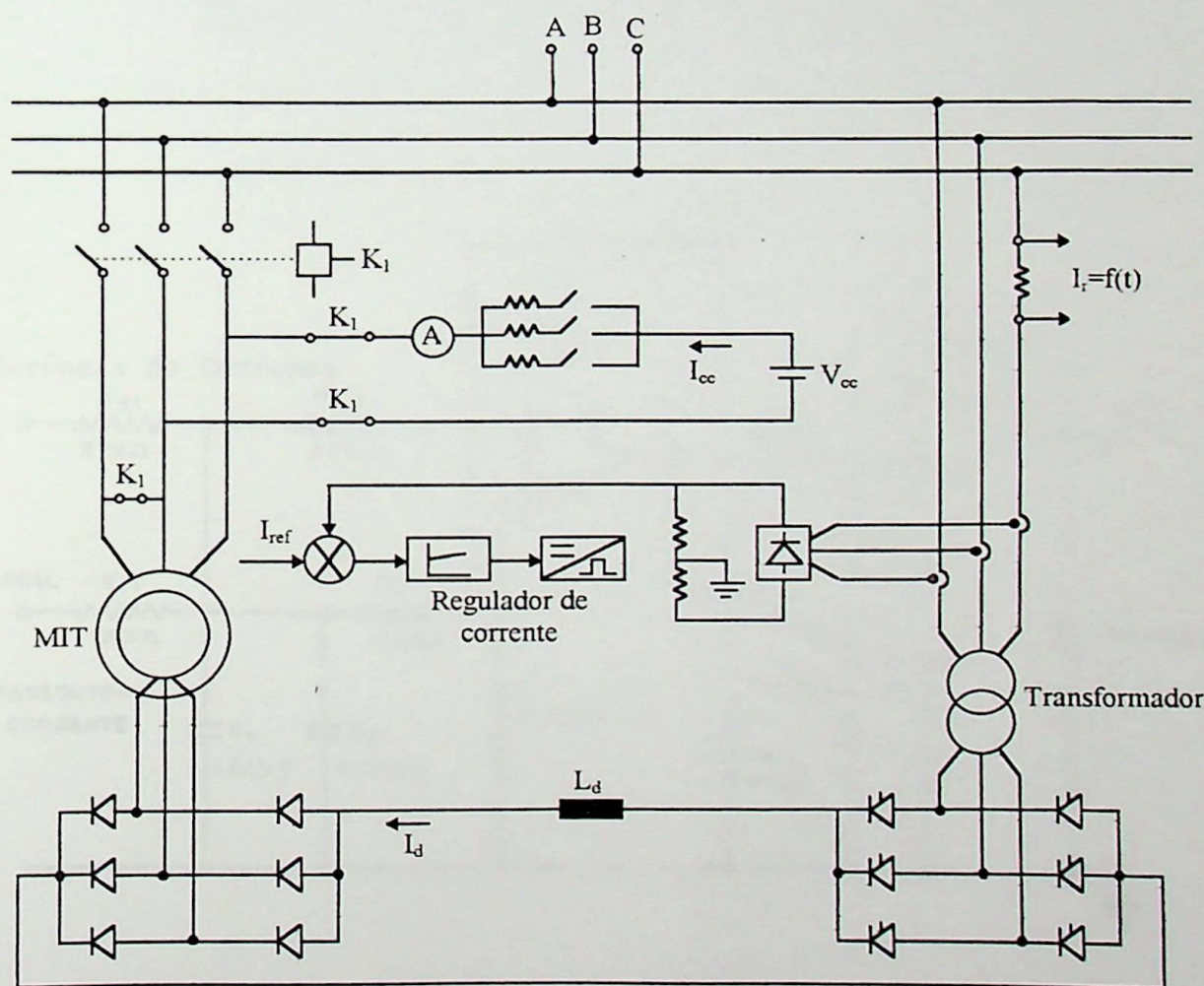


Figura 4.1 - Cascata Subsíncrona com sistema regulador de corrente

4.1. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA VELOCIDADE INICIAL DO ROTOR IGUAL A 1300 (RPM) - $\alpha_{INICIAL} = 90^\circ$

A figura numerada como 4.2 mostra a característica da velocidade versus tempo, indicando o valor inicial do ângulo de disparo α , a intensidade da corrente contínua injetada, o valor da corrente limite do regulador de corrente e o tempo de frenagem do motor.

A figura numerada como 4.3 mostra a característica da corrente versus tempo, nas mesmas condições anteriores.

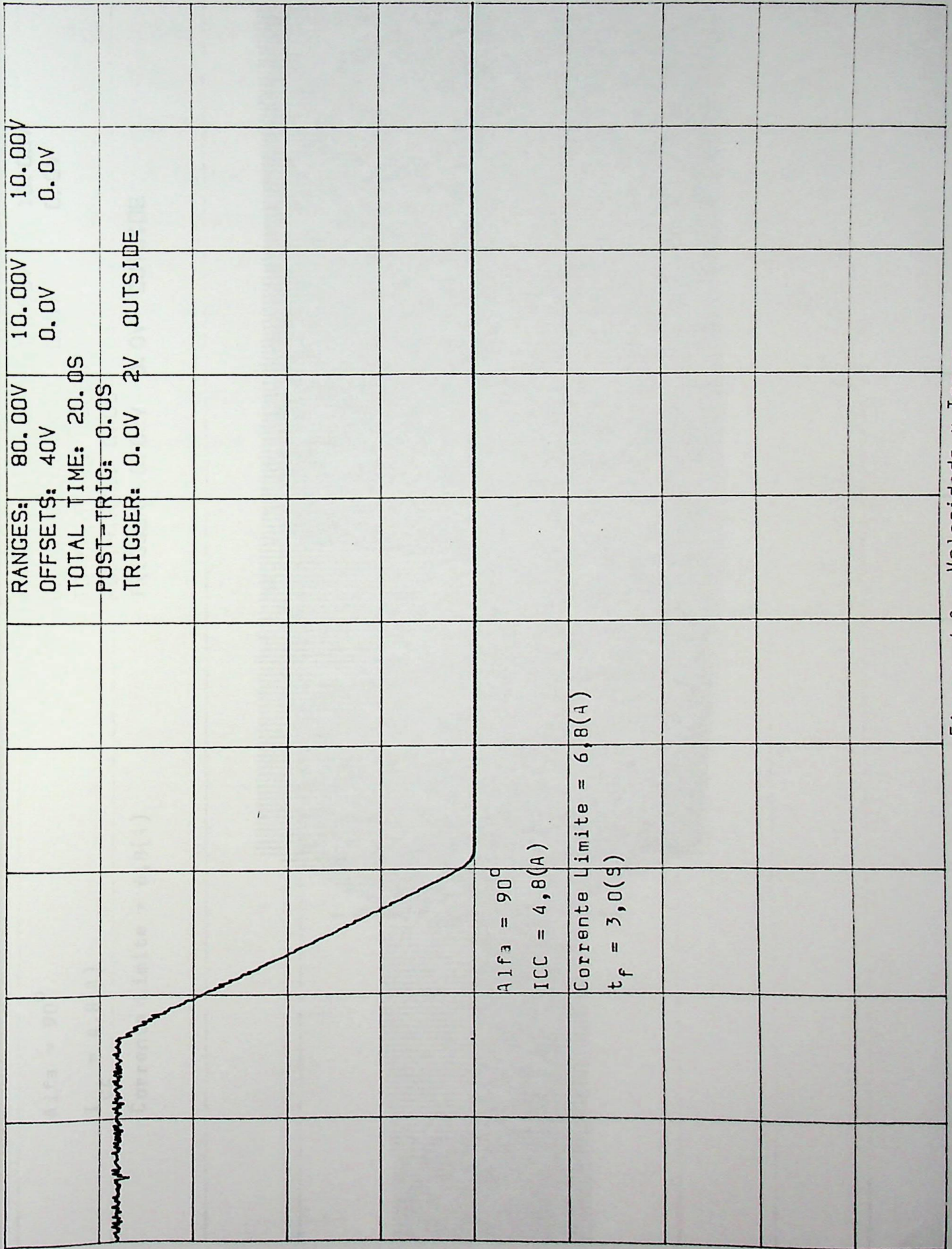


Figura 4.2 - Velocidade x Tempo

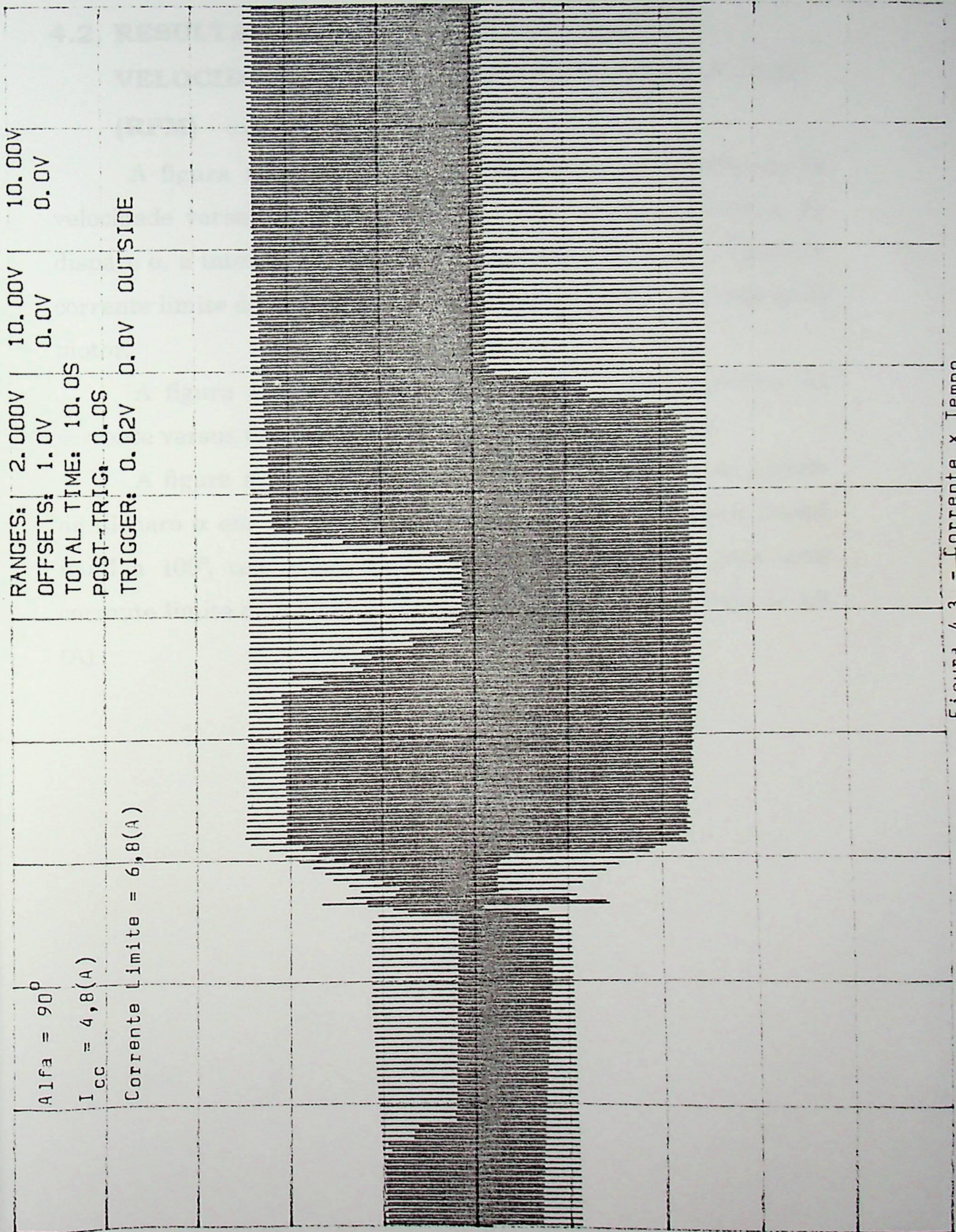


Figura 4.3 - Corrente x Tempo

4.2. RESULTADOS LABORATORIAIS PARA VELOCIDADE INICIAL DO ROTOR IGUAL A 1000 (RPM) - $\alpha_{INICIAL} = 100^\circ$

A figura numerada como 4.4 mostra a característica da velocidade versus tempo, indicando o valor inicial do ângulo de disparo α , a intensidade da corrente contínua injetada, o valor da corrente limite do regulador de corrente e o tempo de frenagem do motor.

A figura numerada como 4.5 mostra a característica da corrente versus tempo, nas mesmas condições anteriores.

A figura numerada como 4.6 mostra a variação do ângulo de disparo α em relação ao tempo, partindo de um valor inicial igual a 100° , com o regulador de corrente ajustado para uma corrente limite de 8,0 (A) e uma corrente contínua injetada de 4,8 (A).

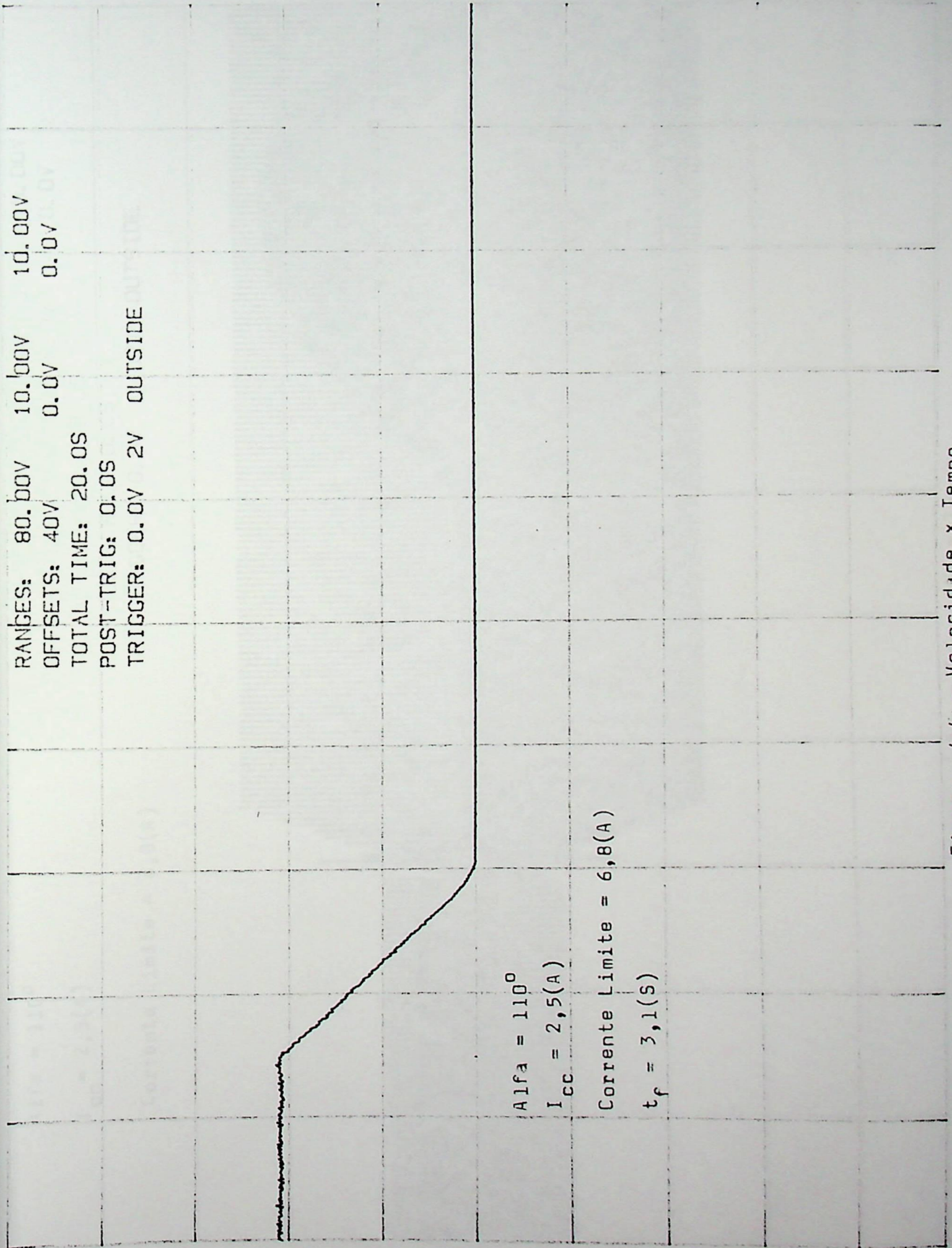


Figura 4.4 - Velocidade x Tempo

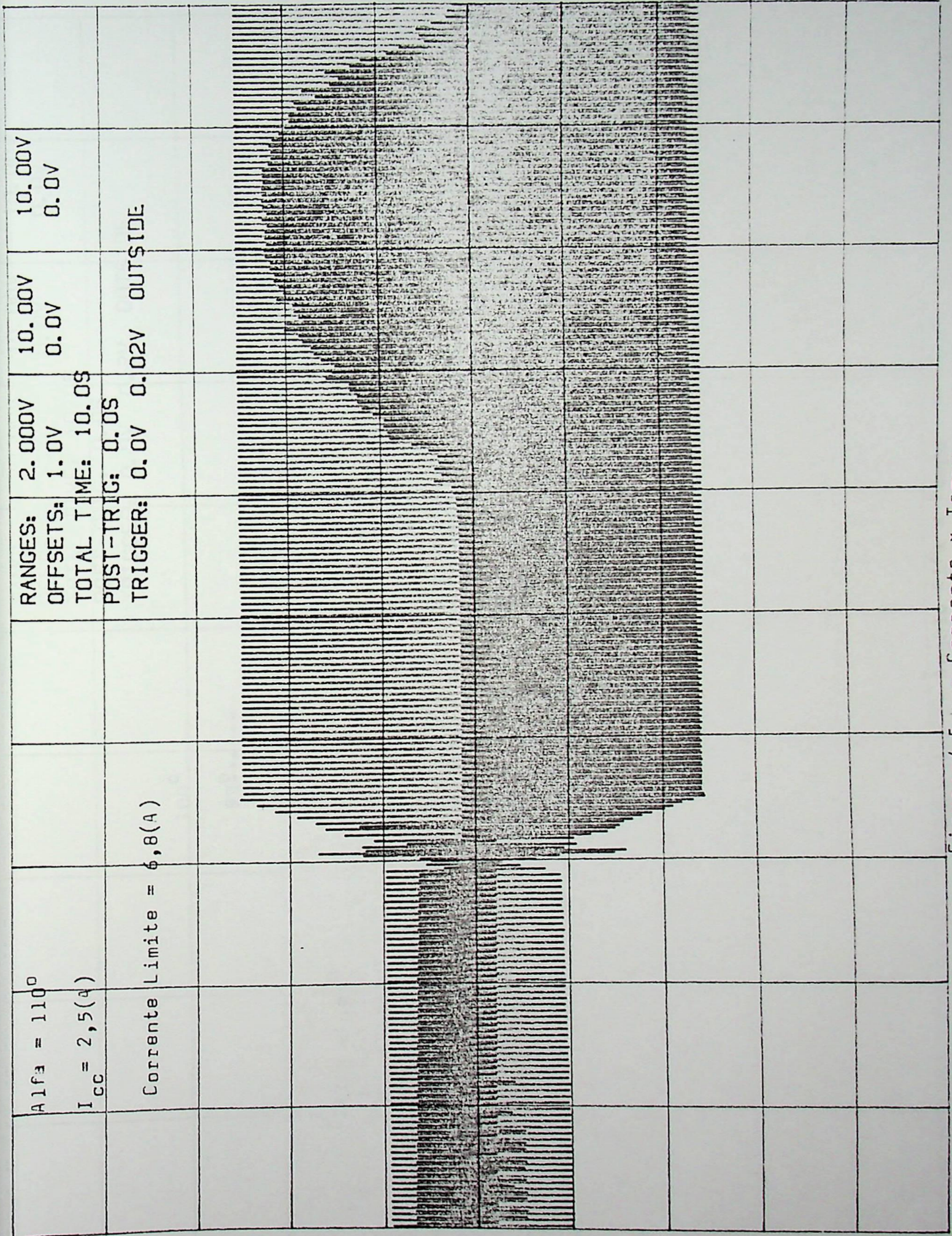


Figura 4.5 - Corrente x Tempo

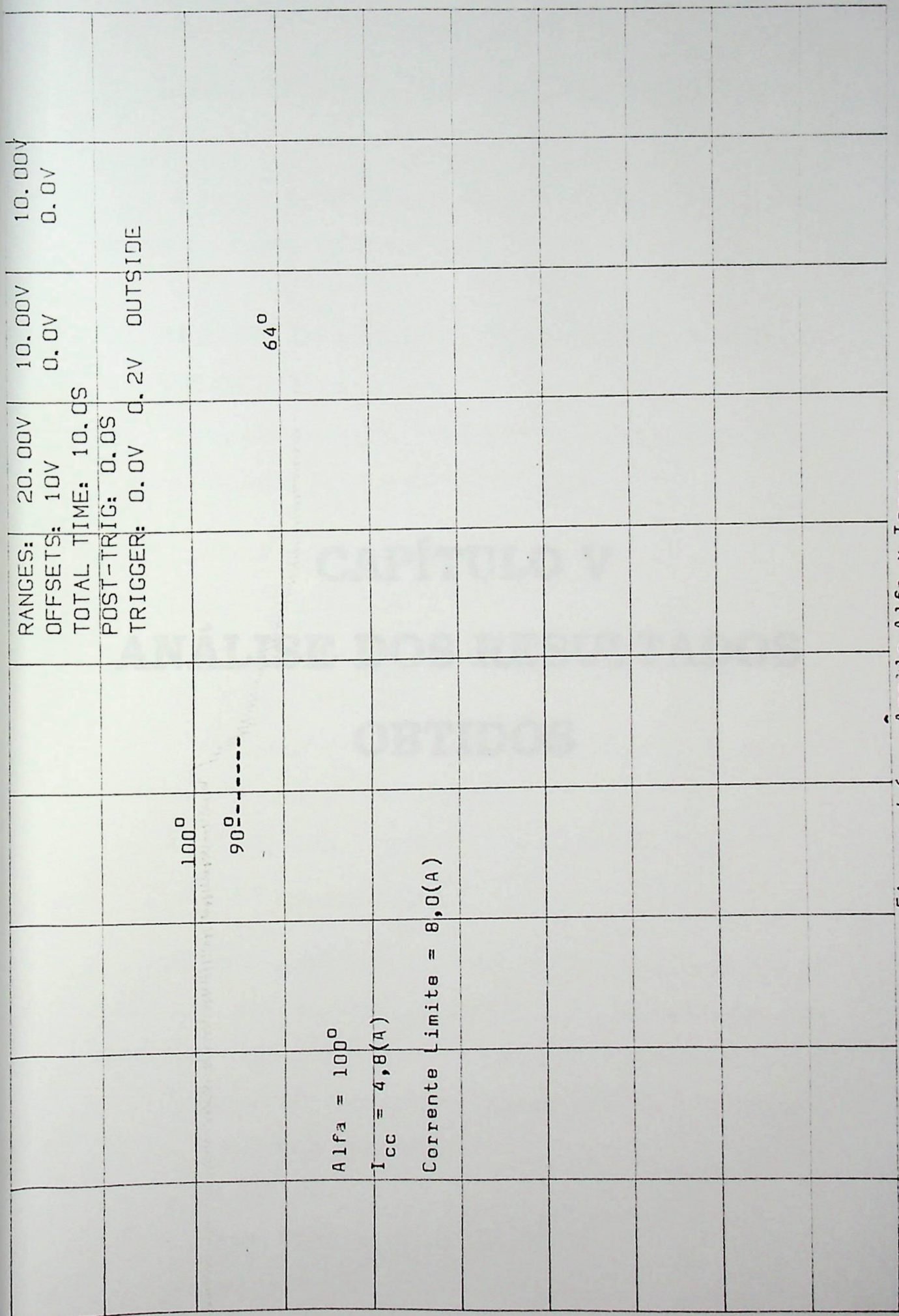


Figura 4.6 . - Ângulo Alfa x Tempo

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A seguir procurar-se-á analisar as diversas características obtidas dos ensaios laboratoriais.

5.1. ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA TORQUE VERSUS VELOCIDADE

Antes de traçar-se a curva que liga o balanço dos torques é definida pela equação 5.1 que segue:

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS

OBTIDOS

T_c = Torque de carga

J = Momento de inércia do eixo do motor

ω = Velocidade angular do motor

D = Diâmetro da amortecedor de teste

$\frac{dT_c}{dt}$ = Torque de partida

Algumas considerações devem ser feitas aqui quando da realização dos ensaios utilizando corrente contínua nos enrolamentos do estator do motor, para o processo de traçagem:

1. Torque eletromagnético nominal $(T_c = 0)$, motor a velocidade de rede trifásica
2. Motor a zero $(T_c = 0)$
3. Torque de partida a zero $(D = 0)$

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A seguir procurar-se-á analisar as diversas características obtidas dos ensaios laboratoriais.

5.1. ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA TORQUE VERSUS VELOCIDADE

Antes da frenagem a equação que rege o balanço dos torques é definida pela equação 5.1 que segue:

$$T_e - T_c = J \frac{dn_2}{dt} + Dn_2 \quad (5.1)$$

Onde:

T_e = Torque eletromagnético do motor

T_c = Torque da carga

J = Momento de inércia total referido ao eixo do motor

n_2 = Velocidade no eixo do motor

D = Coeficiente de amortecimento devido ao atrito

$J \frac{dn_2}{dt}$ = Torque de inércia

Algumas considerações devem ser feitas aqui, quando da realização dos ensaios, utilizando corrente contínua nos enrolamentos do estator do motor, para o processo de frenagem:

1. Torque eletromagnético torna-se nulo ($T_e = 0$), motor é desligado da rede trifásica
2. Motor a vazio ($T_c = 0$)
3. Torque devido ao atrito nulo ($D = 0$)

4. É produzido um torque frenante (T_{cc}), devido a corrente contínua.

Assim sendo, a equação 5.1 pode ser reescrita da seguinte maneira durante a frenagem:

$$\underbrace{T_e}_{0} - \underbrace{T_c}_{0} - T_{cc} = J \frac{dn_2}{dt} + D \underbrace{n_2}_{0}$$

o que resulta:

$$-T_{cc} = J \frac{dn_2}{dt} \quad (5.2)$$

A equação 5.2 indica que a variação da velocidade do rotor depende do torque frenante (T_{cc}), ou seja, quanto maior a intensidade da corrente contínua, maior o torque frenante, como consequência o motor pára mais rapidamente.

Ao desligar o motor da rede trifásica e não injetando corrente contínua no estator, o torque devido ao atrito não pode ser desprezado, pois senão o motor nunca pararia.

A figura numerada como 3.2 mostra o aspecto qualitativo do torque versus velocidade devido somente ao atrito.

As figuras numeradas como 3.3, 3.7, 3.15, 3.18, mostram a característica do torque versus velocidade, com os respectivos valores de corrente contínua e valores do ângulo de disparo α .

5.2. ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA VELOCIDADE VERSUS TEMPO

Com o objetivo de fazer o motor parar mas rapidamente, torna-se necessário aumentar o torque frenante, o que é

conseguido aumentando a intensidade da corrente contínua injetada nos enrolamentos do estator do motor.

A tabela 5.1, construída a partir de inúmeros ensaios, mostra os tempos de frenagem, o valor da corrente contínua e os respectivos ângulos de disparo α da ponte tiristorizada.

	$\alpha = 90^\circ$ 1300 (rpm)	$\alpha = 100^\circ$ 1000 (rpm)	$\alpha = 110^\circ$ 700 (rpm)	$\alpha = 120^\circ$ 400 (rpm)
I_{cc} (A)	t_f (SEG)	t_f (SEG)	t_f (SEG)	t_f (SEG)
0,0	9,8	7,4	5,0	3,1
0,9	9,0	7,0	4,8	3,0
1,7	6,8	6,3	4,4	2,9
2,5	5,3	5,3	4,2	2,8
3,2	4,4	4,7	4,0	2,7
4,0	3,7	4,6	3,8	2,6
4,8	3,3	4,5	3,7	2,5

Tabela 5.1 - Tempos de frenagem

De uma outra forma, a energia cinética armazenada no eixo do motor será consumida num tempo menor, quanto maior for a intensidade da corrente contínua.

A operação da cascata subsíncrona com o ângulo α igual a 90° , faz com que a velocidade do motor esteja próxima da velocidade síncrona. Portanto deve-se tomar cuidado com o valor da corrente contínua a ser injetada, pois surgirá nos enrolamentos do rotor correntes de valores elevados, podendo causar grandes danos ao conjunto da cascata.

As figuras numeradas como 3.4, 3.5, 3.8, 3.16, 3.19, 4.2, 4.4 mostram a característica velocidade versus tempo, durante o processo de frenagem.

Com o objetivo de manter a corrente no link DC constante, como consequência constante também no circuito do rotor, é necessário que o sistema regulador de corrente atue no ângulo de disparo α . Diante do exposto, valores maiores de corrente limite implica em parada mais rápida do motor.

5.3. ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA CORRENTE VERSUS TEMPO

Os registros de corrente apresentam-se com três fases distintas e semelhantes para todos os valores do ângulo de disparo α .

Quando a cascata subsíncrona não está utilizando o sistema regulador de corrente, a primeira fase corresponde a corrente de carga, a segunda é a fase transitória quando o motor está sendo alimentado com corrente contínua e a última correspondente a corrente de magnetização do transformador, já que a corrente do rotor torna-se nula ao término da frenagem.

Com a utilização do sistema regulador de corrente a diferença é notada na terceira fase, uma vez que esta passa a assumir o valor da corrente limite.

Na fase transitória, quando o motor está sendo freado, parte da energia cinética que está armazenada no eixo, é devolvida à rede em forma de energia ativa, caracterizando uma frenagem regenerativa, exceto quando o ângulo de disparo α é igual a 90° .

Isto pode ser observado através das figuras numeradas como 3.6, 3.9, 3.17, 3.20, 4.3, 4.5.

Para o ângulo α igual a 90° , o circuito do rotor se comporta como se estivesse curto circuitado, e o fator de potência visto pelo transformador é praticamente nulo. Assim sendo na fase transitória o aumento verificado na amplitude da corrente, é ocasionado pela corrente induzida no rotor, que além de proporcionar uma frenagem somente de ação dinâmica, ou seja, toda energia é dissipada nas resistências do rotor, esta reflete para o sistema de 60 (Hz), como uma absorção apenas em forma de energia reativa consumida.

Isto pode ser observado através das figuras numeradas como 3.6 e 4.3.

As figuras numeradas como 3.11, 3.12 e 3.13, mostram que a corrente durante a frenagem possui aspecto não senoidal, conseqüentemente conteúdos harmônicos são injetados para a rede.

O aspecto em forma de uma sombra mais acentuada nos registros de corrente é devido a presença de harmônicos já mencionados.

Relativamente a figura 4.6, a qual mostra a variação do ângulo de disparo α em relação ao tempo, pode-se dizer, que se tem uma frenagem regenerativa, enquanto o valor de α é superior a 90° , caso contrário a frenagem é apenas dinâmica.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - Harrison, D.: "The Dynamic Braking of Induction Motors", AIEE, Paper n° 1885 U, Aug. 1955, pp. 121-134.
- [02] - Barkand, T.D.; Helfrich, W.J.: "Application of Dynamic Braking to Mine Hoisting Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, n° 5, September/October 1988, pp. 884-895.
- [03] - Shepherd, W.; Stanway, J.: "Slip Power Recovery in an Induction Motor by the use of a Thyristor Inverter", IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. IGA-5, n° 1, January/February 1969, pp. 74-82.
- [04] - Lavi, A.; Polge, R.J.: "Induction Motor Speed Control with Static Inverter in the Rotor", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, n° 1, January 1966, pp. 76-84.
- [05] - Rezek, A.J.J.; Silva, V.F.; Nakashima, K.; Campos, A.L.S.; Santos, C.C.J.; Júnior, N.O.; Silva, P.P.: "A Wound-Rotor Induction Motor Closed-Loop Control System", ISIE 94, Santiago, Chile, May 1994, pp. 149-154.

- [06] - Evert, C.F.: "Dynamic Braking of Squirrel-Cage Induction Motors", AIEE, April 1954, pp. 242-244.
- [07] - La Pierre, W.; Metaxas, N.: "D-C Dynamic Braking of Squirrel-Cage Induction Motors", AIEE, Oct. 1953, pp. 981-985.
- [08] - Paice, D.A.: "Speed Control of Large Induction Motors by Thyristor Converters", IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. IGA-5, n° 5, September/October 1969, pp. 545-551.
- [09] - Cochran, P.: "Calculation of Dynamic Braking Characteristics of Wound Rotor Induction Motors", AIEE, October 1953, pp. 992-996.
- [10] - Liao, F.; Sheng, J.; Lipo, T.A.: "A New Energy Recovery Scheme for Doubly Fed, Adjustable-Speed Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, n° 4, July/August 1991, pp. 728-733.
- [11] - Dewan, S.B.; Slemon, G.R.; Straughen, A.: "Power Semiconductor Drives", Wiley - Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1984.
- [12] - Murphy, J.M.D.; Turnbull, F.G.: "Power Electronic Control of AC Motors", Pergamon Press, 1988.

- [13] - Sen, P.C.: "Principles of Electric Machines and Power Electronics", John Wiley & Sons, 1989.
- [14] - —.: "Controle e Regulação de Acionamentos Elétricos em Corrente Alternada", Siemens, Informativo Técnico, Vol. X, 1978, pág. 2/23-2/30.
- [15] - Fröhr, F.; Orttenburger, F.: "Introducción al Control Electrónico", Barcelona, Siemens, 1986.
- [16] - Rezek, A.J.J.; Siqueira, M.; Piazzaroni, M.; Monteiro, M.B.: "Análise Comparativa da Frenagem Dinâmica do Motor de Indução Trifásico (MIT), com a Utilização de Diferentes Conexões Estatóricas", VI Seminário de Pesquisa da EFEI, Outubro 1992.
- [17] - Gehlot, N.S; Penã, J.R.Q.: "Regulação de Velocidade do Motor de Indução usando Sistema Estático de Cascata Scherbius", 5º CBA/1º CLAA, Campina Grande, Pb, Brasil, 1984, pág. 774-780.
- [18] - Rezek, A.J.J.; et alli: "Projeto e Simulação de um Sistema de Acionamento Controlado para Máquina de Corrente Contínua", II SIMEAR, Abinee Tec/91, EPUSP, Maio 1991, pág. 141-160.

- [19] - Rezek, A.J.J.; Cogo, J.R.; Sá, J.S.; Marques, J.A.:
“Frenagem de Motores de Indução Trifásicos utilizando
Corrente Contínua no Estator - Frenagem Dinâmica”,
Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, Vol. VIII,
nº 2, 1982, pág. 66-80.
- [20] - Say, M.G.: “The Performance and Design of Alternating
Current Machines”, Pitman Paperbacks, 1958.

DATA 05 / 06 / 19 97
PROC. _____
PED. PPG
LIV. _____
RS Dawson

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200901

NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA