

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

ESTUDO E REALIZAÇÃO DE UM PULSADOR DE CORRENTE PARA O ACIONAMENTO
DE UM SERVOMOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA EM QUATRO QUADRANTES

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


RUY LUIZ MACHADO

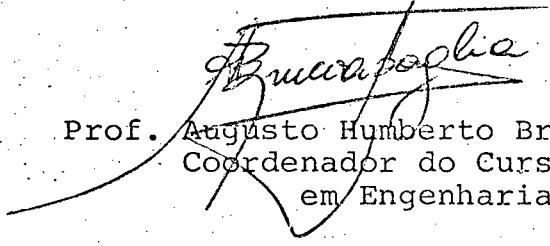
FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO 1984

ESTUDO E REALIZAÇÃO DE UM PULSADOR DE CORRENTE PARA O ACIONAMENTO
DE UM SERVOMOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA EM QUATRO QUADRANTES

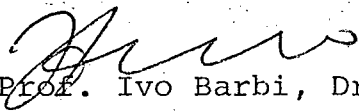
RUY LUIZ MACHADO


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

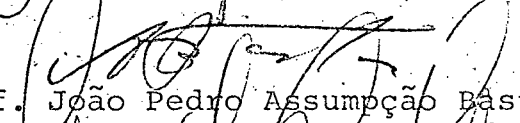

Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.
Orientador


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

BANCA EXAMINADORA


Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.


Prof. Arnaldo José Perin, Dr. Ing.


Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr. Et.


Prof. Renato Carlson, Dr. Ing.

À minha esposa Christianne

Aos meus pais Oduvaldo e Sonia

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

Ao Professor Ivo Barbi pela orientação. Por sua dedicação e sua amizade que de forma decisiva contribuíram para o 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 na realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa CNEN pelo apoio financeiro.

À minha esposa Christianne por seu incentivo e por sua participação.

Aos meus pais Oduvaldo e Sonia por seu apoio e por sua contribuição.

Aos professores: Ivo Barbi, Dr. Ing.; Arnaldo José Perin, Dr. Ing.; João Pedro Assumpção Bastos, Dr., Et.; Renato Carlson, Dr. Ing., que constituíram a banca examinadora da defesa de dissertação de mestrado.

RESUMO

Este trabalho trata do acionamento do servomotor de corrente contínua em quatro quadrantes para aplicação em controle de posição.

É proposta uma nova técnica que consiste no emprego de conversores que alimentam o servomotor em corrente.

São realizados estudos teóricos da comutação, da reversibilidade e do controle da máquina associada aos conversores citados.

A partir dos resultados teóricos, foi construído um protótipo de laboratório com grau de operacionalidade industrial.

Foram realizados estudos experimentais que permitiram a verificação dos resultados teóricos.

A B S T R A C T

This work deals with DC servomotor driving in four-quadrant for application on position control.

A new technique based on the use of converters through which the servomotor is current-fed is proposed.

Theoretical studies involving commutation, reversibility and control of the machine associated with the converters are performed.

Based on the preliminary theoretical results, a laboratory prototype has been built, which is compatible with industrial applications.

Several laboratory tests have been performed which confirmed the theoretical results.

S I M B O L O G I A

- v_a - Tensão de armadura (valor instantâneo)
 v_f - Tensão de campo (valor instantâneo)
 v_c - Tensão nos capacitores do pulsador de corrente (valor instantâneo)
 v_{ap} - Tensão fornecida pelo conversor positivo que compõe o conversor dual (valor instantâneo)
 v_{an} - Tensão fornecida pelo conversor negativo que compõe o conversor dual (valor instantâneo)
 v_p - Tensão nos terminais da fonte de corrente (valor instantâneo)
 e_a - Força contra-eletromotriz induzida (valor instantâneo)
 V_a - Tensão de armadura (valor médio)
 V - Tensão de alimentação do pulsador de tensão (valor médio)
 V_p - Tensão nos terminais da fonte de corrente (valor médio)
 V_{c01} - Tensão mínima nos capacitores do pulsador de corrente,
 $V_{c01} < 0$
 V_{c02} - Tensão máxima nos capacitores do pulsador de corrente,
 $V_{c02} > 0$
 E_a - Força contra-eletromotriz induzida (valor médio)

- i_a - Corrente de armadura (valor instantâneo)
 i_f - Corrente de campo (valor instantâneo)
 I_a - Corrente de armadura (valor médio)
 I_f - Corrente de campo (valor médio)
 I - Corrente fornecida pela fonte de corrente (valor médio)
 P_a - Potência absorvida pela máquina de corrente contínua
 (valor médio)
 P_{FONTE} - Potência fornecida pela fonte de corrente (valor médio)
 R_a - Resistência de armadura
 R_f - Resistência de campo
 L_a - Indutância de armadura
 L_f - Indutância de campo
 L_{ext} - Indutância externa de filtragem
 C - Capacitores do pulsador de corrente
 ω_m - Velocidade de eixo da máquina
 K_e - Constante que engloba as dimensões do entreferro e o
 número de espiras da armadura: $e_a = K_e \omega_m$
 ρ - Razão cíclica da tensão ou da corrente
 θ - Ângulo de extinção dos tiristores

- T - Período
- t - Tempo
- t_{q1} - Tempo de aplicação de tensão inversa quando $E_a > 0$
- t_{q2} - Tempo de aplicação de tensão inversa quando $E_a < 0$
- J - Momento de inércia
- D - Perdas rotacionais
- T_e - Torque eletromagnético
- α - Coeficiente de amortecimento
- ω_n - Frequência natural não amortecida
- ξ - Razão de amortecimento
- τ_m - Constante de tempo mecânica
- τ_F - Constante de tempo do filtro da tensão proveniente do tacogerador

S U M Á R I O

SIMBOLOGIA.....	VII
INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 1 - ESTRUTURAS CLÁSSICAS PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA EM QUATRO QUA- DRANTES.	
1.1 - Introdução.....	03
1.2 - Diagrama tensão-corrente para uma máquina de cor- rente contínua.....	03
1.3 - Conversor dual.....	06
1.4 - Pulsador de tensão.....	08
1.5 - Conclusão.....	13
CAPÍTULO 2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA ESTRUTURA PRO- POSTA OPERANDO EM QUATRO QUADRANTES	
2.1 - Introdução.....	14
2.2 - Estudo do fluxo de potência entre a máquina de cor- rente contínua e a fonte de corrente.....	14
2.3 - Reversibilidade de tensão e corrente.....	17
2.4 - Configuração da fonte corrente e da estrutura pro- posta.....	19
2.4.1 - Fonte de corrente reversível em tensão...	19

2.4.2 - Estrutura proposta..... 22

2.4.3 - Associação da fonte de corrente com o pulsador
de corrente e a máquina de corrente contínua.. 23

2.5 - Conclusão..... 24

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DA COMUTAÇÃO DO PULSADOR DE CORRENTE

3.1 - Introdução..... 26

3.2 - Sequências de funcionamento..... 26

3.3 - Estudo analítico da comutação..... 33

3.4 - Influências das não idealidades - Ondulação da corrente de alimentação..... 44

3.5 - Dimensionamento dos capacitores..... 46

3.6 - Dimensionamento dos capacitores para um servomotor com parâmetros conhecidos..... 50

3.7 - Conclusão..... 52

CAPÍTULO 4 - ACIONAMENTO DE UM SERVOMOTOR NO 1º QUADRANTE - ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 - Introdução..... 53

4.2 - Variação da razão cíclica..... 53

4.2.1 - Circuito utilizado para variar a razão cíclica 54

4.2.2 - Desempenho do variador manual da razão cíclica 55

4.3 - Limitador de velocidade..... 56

4.3.1 - Circuito utilizado..... 59

4.3.2 - Desempenho do limitador de velocidade..... 59

4.4 - Resultados experimentais obtidos com o limitador de velocidade.....	59
4.4.1 - Curvas de tensão máxima e mínima nos capacitores em função da velocidade de eixo.....	60
4.4.2 - Curvas de tempo de aplicação de tensão inversa sobre os tiritores.....	62
4.5 - Principais formas de onda obtidas experimentalmente.....	65
4.5.1 - Razão cíclica igual a 0,5 e velocidade nula.....	65
4.5.2 - Razão cíclica diferente de 0,5 e velocidade nominal.....	69
4.6 - Conclusão.....	73

CAPÍTULO 5 - ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA EM QUATRO QUADRANTES - ESTUDO EXPERIMENTAL

5.1 - Introdução.....	74
5.2 - Fonte de alimentação de corrente contínua.....	74
5.3 - Controle de velocidade.....	75
5.3.1 - Controle proporcional.....	76
5.3.2 - Controle proporcional-integral.....	84
5.4 - Acionamento em quatro quadrante.....	89

5.5 - Característica torque-velocidade.....	91
5.6 - Resposta a uma perturbação no torque de carga.....	93
5.7 - Conclusão.....	96
CONCLUSÃO.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

I N T R O D U Ç Ã O

Existem muitas aplicações industriais que utilizam o controle de posição. Algumas destas utilizações são: pontes ro lantes, aplicações de precisão em máquinas operatrizes, robôs, etc.

O emprego destes controles de posição deve apresen tar: robustez, simplicidade, confiabilidade, além de um rendimen to elevado.

Ao longo do tempo, os pesquisadores têm procurado encontrar métodos de controle de precisão que reünam estas carac terísticas.

Soluções mais simples adotam interruptores mecâni cos.

Com o aparecimento dos tiristores, generalizou-se o uso do conversor dual. À medida que foram se aperfeiçoando as técnicas de comutação forçada, passou-se a utilizar os pulsado res de tensão.

Em seguida, com o surgimento dos transístores de potência, foi difundido o emprego dos pulsadores de tensão à tran sistor.

Este trabalho tem por objetivo o estudo de uma ou tra estrutura a tiristores, à comutação forçada, que permita o acionamento da máquina de corrente contínua em quatro quadran tes, com desempenho suficiente para aplicações de alta precisão, entre as quais, controle numérico.

Esta estrutura estudada, funciona como um pulsador

de corrente, diferente do pulsador clássico que alimenta a máquina em tensão.

CAPÍTULO 1

ESTRUTURAS CLÁSSICAS PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA EM QUATRO QUADRANTES

1.1 - Introdução

No presente capítulo serão apresentadas as estruturas clássicas para o acionamento da máquina de corrente contínua em quatro quadrantes, suas estruturas e suas principais características.

1.2 - Diagrama Tensão - corrente para uma Máquina de Corrente Contínua

O modelo geral de uma máquina de corrente contínua é dado pela Fig. 1.1, que é obtido a partir de:

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1.1)$$

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (1.2)$$

$$e_a = K_e \omega_m \quad (1.3)$$

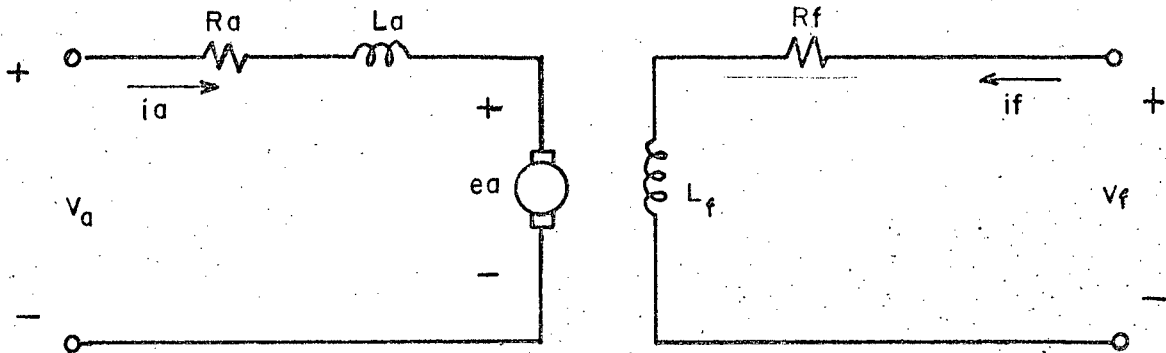


Figura 1.1 - Modelo geral de uma máquina de corrente contínua.

v_a e i_a = Tensão e corrente de armadura.

v_f e i_f = Tensão e corrente de campo

$e_a = K_e \omega_m$ = Força contra-eletromotriz induzida

R_a e L_a = Resistência e Indutância de armadura

R_f e L_f = Resistência e Indutância de campo

ω_m = Velocidade de eixo.

O comportamento da máquina, de acordo com f.c.e.m. média E_a e corrente de armadura média I_a , pode ser representado pelo diagrama de quatro quadrantes da Fig. 1.2.

Segundo a tabela da Fig. 1.3, a potência absorvida pela máquina $P_a = V_a I_a$ é positiva nos 1º e 3º quadrantes, e por isto funciona como motor, já que está absorvendo potência da rede. Em contrapartida, nos 2º e 4º quadrantes, a potência absorvida é negativa e a máquina comporta-se como gerador, fornecendo potência à rede.

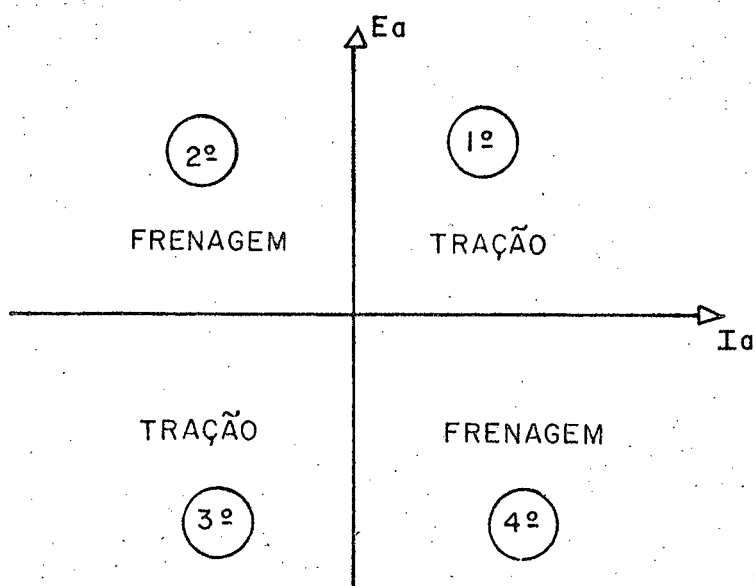


Figura 1.2 - Diagrama $E_a I_a$ para uma Máquina de Corrente Contínua.

QUADRANTE	TENSÃO E_a	CORRENTE I_a	POTENCIA $P_a = V_a \cdot I_a$	OPERAÇÃO
1º	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA	TRAÇÃO
2º	NEGATIVA	POSITIVA	NEGATIVA	FRENAGEM
3º	NEGATIVA	NEGATIVA	POSITIVA	TRAÇÃO
4º	POSITIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	FRENAGEM

Figura 1.3 - Tabela correspondente à Fig. 1.2.

Para a operação como motor, uma mudança de quadrantes indica que há inversão da polaridade da tensão de armadura V_a (para I_f constante) e conseqüentemente da f.c.e.m. $E_a = K_e \omega_m$, ou seja, há inversão da velocidade de eixo da máquina.

Com a máquina operando como gerador, uma inversão da velocidade de eixo ω_m (I_f constante) resulta em uma inversão da f.c.e.m. E_a e de uma necessária mudança de quadrantes no diagrama $E_a I_a$.

1.3 - Conversor Dual

O conversor dual [1] baseia-se no princípio de que o arranjo de dois conversores controlados (que funcionem cada um como uma fonte em dois quadrantes: 1º e 4º, 2º e 3º), pode funcionar como uma fonte em quatro quadrantes, ou seja, uma fonte que a partir de uma rede AC é capaz de fornecer tensões e correntes com ambas as polaridades.

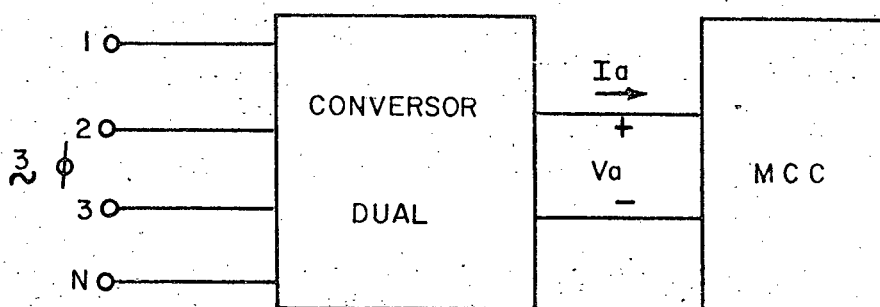


Figura 1.4 - Diagrama de blocos do arranjo: Conversor Dual - Máquina de Corrente Contínua.

Na Fig. 1.4 é possível ver sob a forma de diagrama de blocos o acoplamento de um conversor dual a uma máquina de corrente contínua.

Na Fig. 1.5, dois conversores controlados em dois quadrantes são combinados e formam um conversor dual, que alimen

ta uma máquina de corrente contínua em quatro quadrantes. Ambos são colocados em paralelo, mas com oposição de polaridade um em relação ao outro.

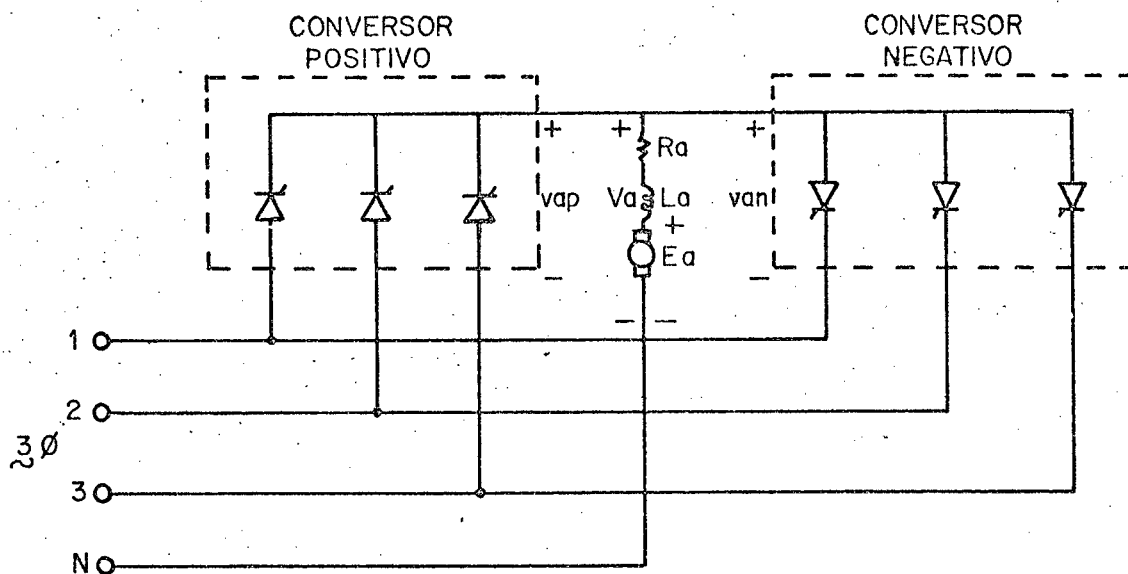


Figura 1.5 - Conversor dual de três pulsos e em ponto médio.

O princípio de controle de um conversor dual, é regular o ângulo de disparo dos tiristores de cada um dos conversores individuais, de modo que as tensões fornecidas sejam sempre iguais:

$$v_{ap} = v_{an}$$

Para isto é necessário que, toda vez que a corrente de armadura for positiva, os sinais de gatilho dos tiristores do conversor negativo sejam bloqueados e toda a vez que a corrente de armadura for negativa, os sinais de gatilho fornecidos ao conversor positivo também o sejam. Por este motivo, cada conversor apresenta teoricamente impedância infinita para a saída do outro e apenas um deles fornece potência, enquanto o outro é desativado.

Na prática, existem algumas dificuldades no contro

le do disparo dos tiristores, pois inevitavelmente aparecem desigualdades instantâneas entre v_{ap} e v_{an} , e devido a isto surgem picos de corrente elevados. Daí a impossibilidade prática da ligação direta entre os terminais DC dos dois conversores sem o correto método de ajuste. Este método, no entanto, implica na utilização de circuitos complexos que têm como objetivo impedir a condução simultânea.

Assim, normalmente a ligação entre os dois conversores é feita por intermédio de um reator de circulação, que absorve as desigualdades de tensão entre v_{ap} e v_{an} , limitando desta forma os picos da corrente de circulação.

No entanto, o emprego do reator de circulação apresenta alguns inconvenientes, tais como:

- a resposta do sistema torna-se mais lenta;
- há um aumento considerável do peso e do volume da montagem.

O conversor dual, além disto, apresenta dificuldade na obtenção de uma mesma resposta para diferentes pontos de operação com um mesmo regulador, devido às não linearidades introduzidas pela descontinuidade da corrente na máquina.

1.4 - Pulsador de Tensão

O pulsador de tensão [2], é utilizado quando se necessita converter uma tensão contínua em outra contínua de valor diferente. Na Fig. 1.6 está mostrado através de diagrama de blocos, o acoplamento de um pulsador a uma máquina de corrente con

tínua.

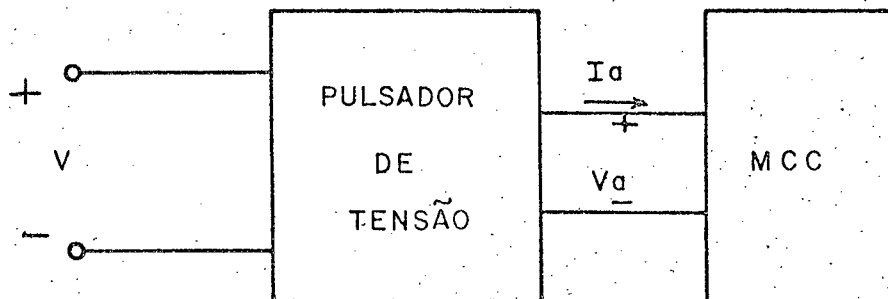


Figura 1.6 - Diagrama de blocos do acoplamento: Pulsador de Tensão - Máquina de Corrente Contínua.

Nos casos onde se deseja controlar a posição de máquinas de corrente contínua, utiliza-se os pulsadores quatro quadrantes.

Na Fig. 1.7 pode ser visto um pulsador de tensão clássico, com operação em quatro quadrantes.

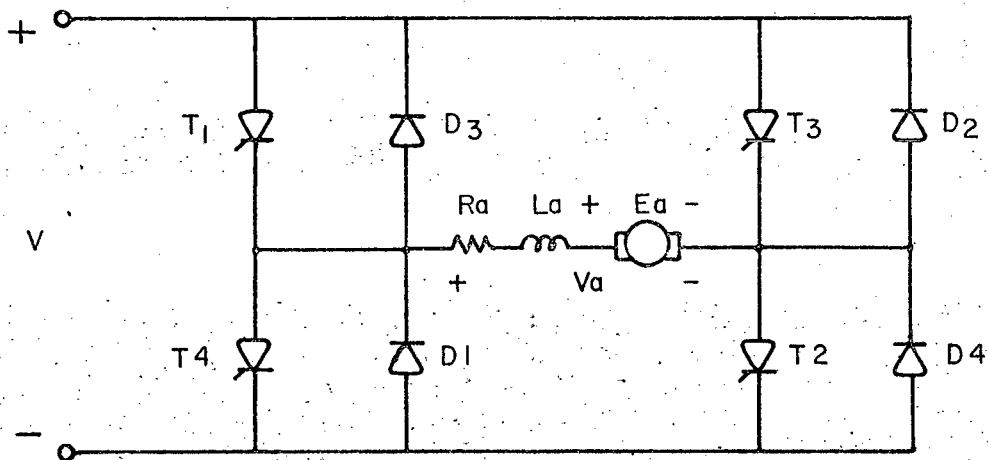


Figura 1.7 - Pulsador de tensão quatro quadrantes clássico associado à Máquina de Corrente Contínua,

Enquanto, por exemplo, os tiristores T_1 e T_2 condu

zem a corrente de armadura, T_3 e T_4 estão bloqueados. Quando T_1 e T_2 são bloqueados, os diodos de roda livre D_1 e D_2 conduzem a corrente, e a tensão V é aplicada inversamente sobre a máquina.

A tensão média V_a resultante, é regulada pela razão cíclica, que é dada pela relação entre o tempo que os tiristores conduzem e o período.

Na Fig. 1.8 pode-se observar o comportamento da tensão e corrente de armadura, quando T_1 , T_2 e D_1 , D_2 fazem o controle de posição da máquina. Neste caso, o pulsador atua como uma fonte em dois quadrantes (1ϕ e 4ϕ).

Um comportamento análogo pode ser conseguido quando se utiliza T_3 , T_4 e D_3 , D_4 . Neste caso, o pulsador funciona como uma fonte no 2ϕ e 3ϕ quadrantes.

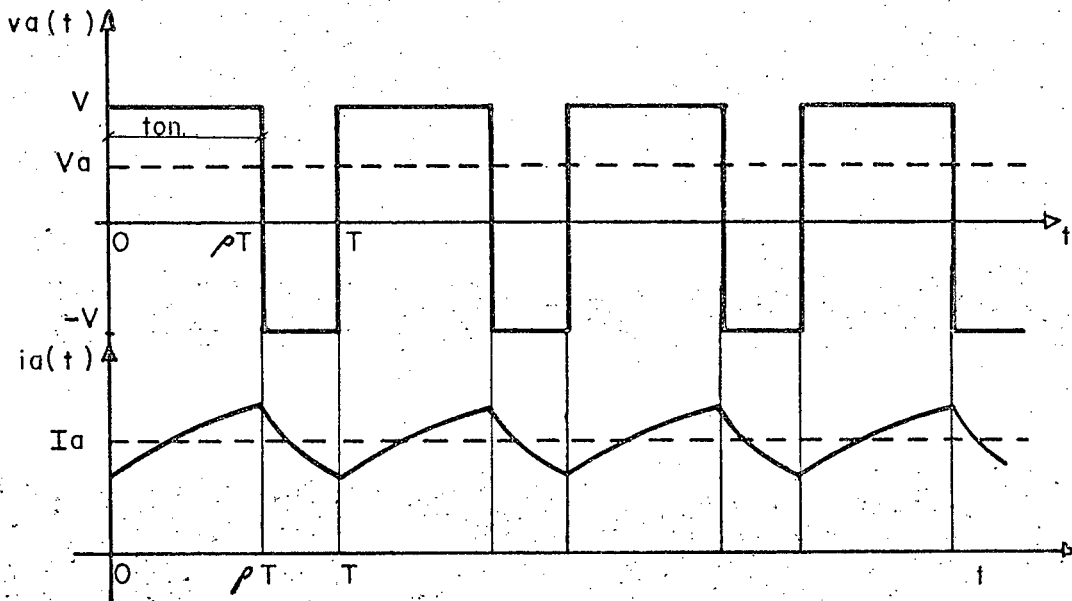


Figura 1.8 - Tensão e corrente de armadura. Caso em que a corrente é contínua.

$$\rho = \frac{\text{ton}}{T}$$

(1.4)

Nos casos onde existe descontinuidade da corrente, ou seja, corrente com valor instantâneo igual a zero, a tensão de armadura deixa de ser dada pela expressão 1.5, e passa a ser dada pela expressão 1.6.

$$V_a = \rho V \quad (1.5)$$

$$V_a = \rho V + (1 - \theta) E_a \quad (1.6)$$

A Fig. 1.9 mostra o caso em que a condução é descontínua, e é possível observar que quando $i_a(t) = 0$, a tensão $v_a(t) = E_a$, ou seja, igual a f.c.e.m. induzida. Durante este tempo (de θT a T), não é possível o controle da máquina pelo operador, pois a tensão não é imposta pelo mesmo, mas sim pela própria máquina, o que é uma desvantagem.

Assim sendo, os pulsadores de tensão a tiristores, além de utilizarem circuitos de comutação relativamente complicados, apresentam descontinuidade.

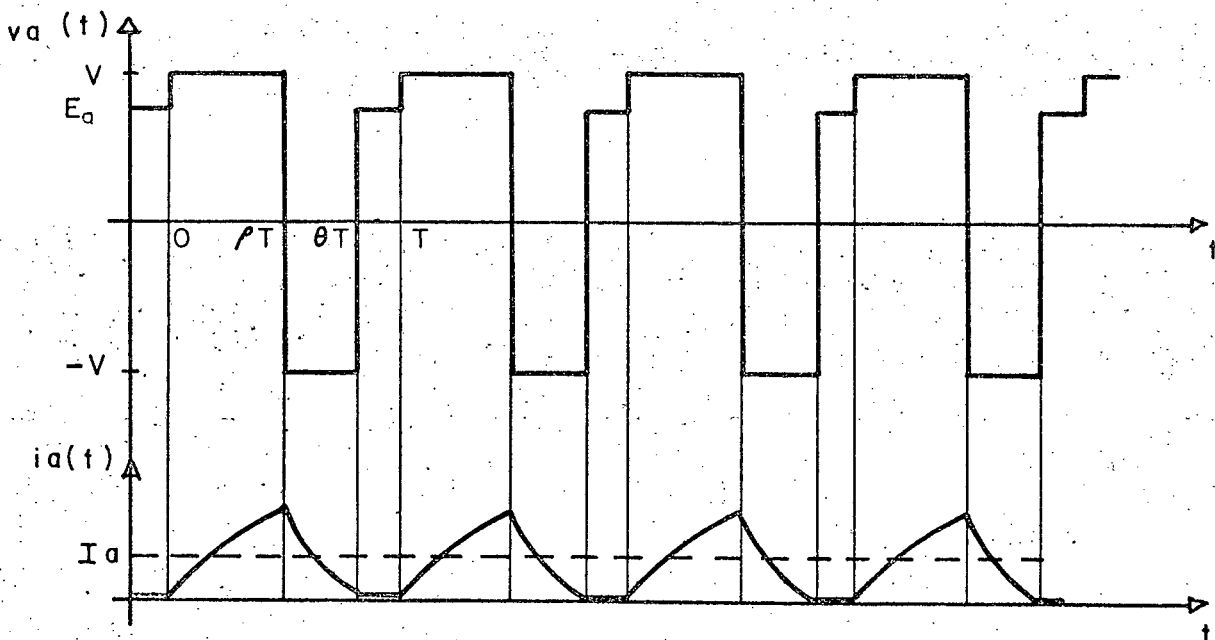


Figura 1.9 - Tensão e corrente de armadura. Caso em que a corrente é descontínua.

Os pulsadores de tensão a transistor, podem operar em frequências elevadas, e devido a isto não apresentam descontinuidades. Ver Fig. 1.10.

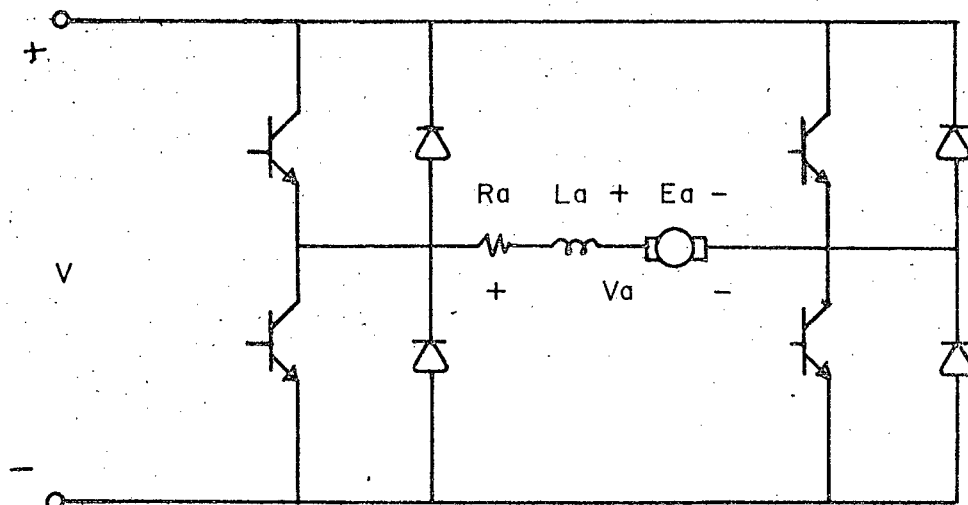


Figura 1.10 - Pulsador de Tensão a transistor.

A regeneração de potência para os dois tipos de pulsadores apresenta alguns problemas, pois não existe reversibilidade, já que a corrente no retificador não pode ser invertida.

Com isto, a frenagem deve ser dissipada sobre o resistor R (Fig.1.11), o que acarreta dois problemas principais:

- Dissipação local de calor, que deveria ser evacuado;
- Diminuição do rendimento.

CAPÍTULO 2

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA ESTRUTURA PROPOSTA OPERANDO EM QUATRO QUADRANTES

2.1 - Introdução

Neste capítulo será analisado o comportamento desta nova estrutura alimentada em corrente, sob o ponto de vista de reversibilidade de potência. Além disto, será apresentada a sua configuração e a da fonte de corrente.

2.2 - Estudo do Fluxo de Potência entre a Máquina de Corrente Contínua e a Fonte de Corrente

Na Fig. 2.1. pode ser vista a representação da associação entre a fonte de corrente, a estrutura proposta e a máquina de corrente contínua.

A potência média fornecida pela fonte de corrente é dada por:

$$P_{\text{FONTE}} = V_p I \quad (2.1)$$

A tensão média nos terminais da fonte de corrente V_p é dada por duas seqüências principais distintas, de acordo com

as Fig. 2.2 e Fig. 2.3.

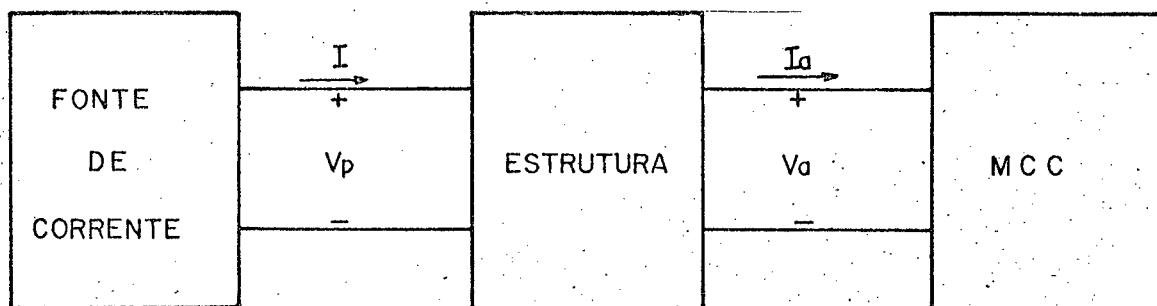


Figura 2.1 - Representação da associação: Fonte de corrente, estrutura proposta e a máquina de corrente contínua.

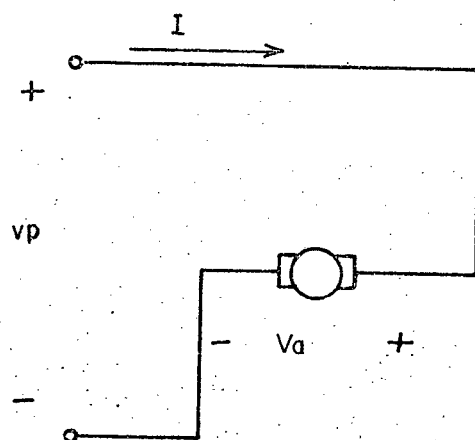


Figura 2.2 - Seqüência de funcionamento para o tempo compreendido $0 < t < \rho T$.

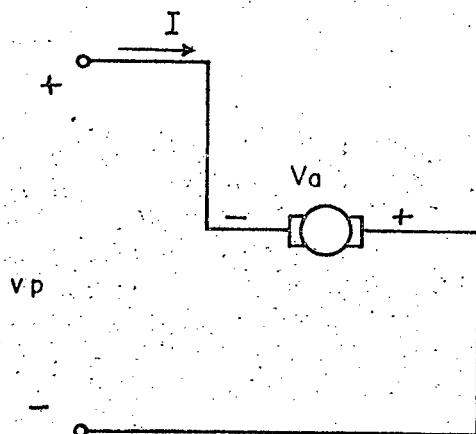


Figura 2.3 - Seqüência de funcionamento para o tempo compreendido $\rho T < t < T$.

Nas duas seqüências de funcionamento, a tensão média nos terminais da máquina de corrente contínua é aproximadamente V_a .

Destas figuras pode-se obter a tensão média V_p :

$$V_p = \frac{1}{T} [V_a (\rho T - 0) + (-V_a) (T - \rho T)]$$

$$V_p = V_a (2\rho - 1), \text{ ou então:}$$

$$\frac{V_p}{V_a} = 2\rho - 1 \quad (2.2)$$

A expressão 2.2 pode ser representada graficamente na Fig. 2.4.

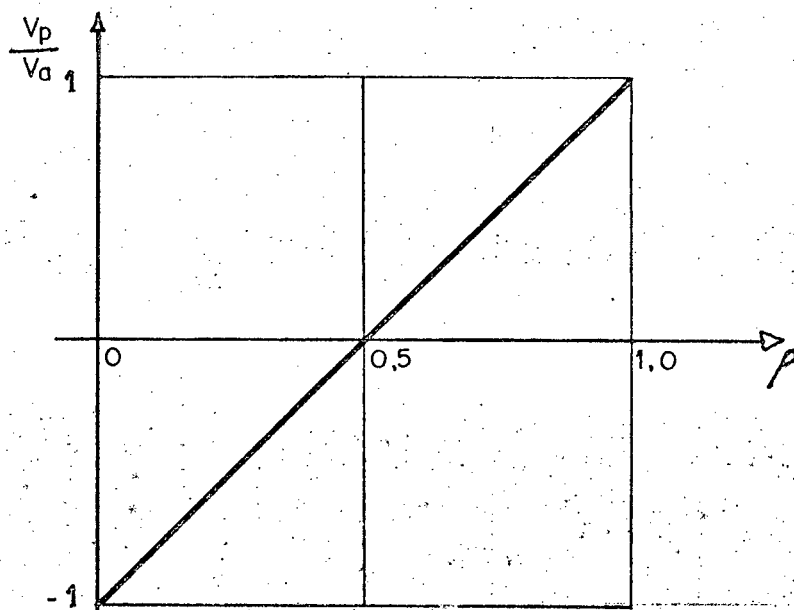


Figura 2.4 - Representação gráfica da expressão 2.2

Na Fig. 2.4 observa-se que a relação entre a tensão média fornecida pela fonte de corrente e a tensão média nos terminais da máquina de corrente contínua, é função da razão cíclica da corrente de armadura.

A operação em quatro quadrantes, em regime permanente, está representada na tabela da Fig. 2.5.

FONTE DE CORRENTE		FLUXO DE POTÊNCIA	MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA				
V_p	P_{fonte}		PMCC	V_a	I_a	RAZÃO CÍCLICA	QUADRANTE
> 0	F	\Rightarrow	A	< 0	< 0	$0 \leq \rho \leq 0,5$	3º
				> 0	> 0	$0,5 < \rho \leq 1,0$	1º
< 0	A	\Leftarrow	F	> 0	< 0	$0 \leq \rho < 0,5$	2º
				< 0	> 0	$0,5 < \rho \leq 1,0$	4º

Figura 2.5 - Funcionamento da máquina de corrente contínua em quatro quadrantes. F = Fornece, A = Absorve

2.3 - Reversibilidade de Tensão e Corrente

As formas de onda de tensão $v_a(t)$ e corrente $i_a(t)$ estão representadas na Fig. 2.6.

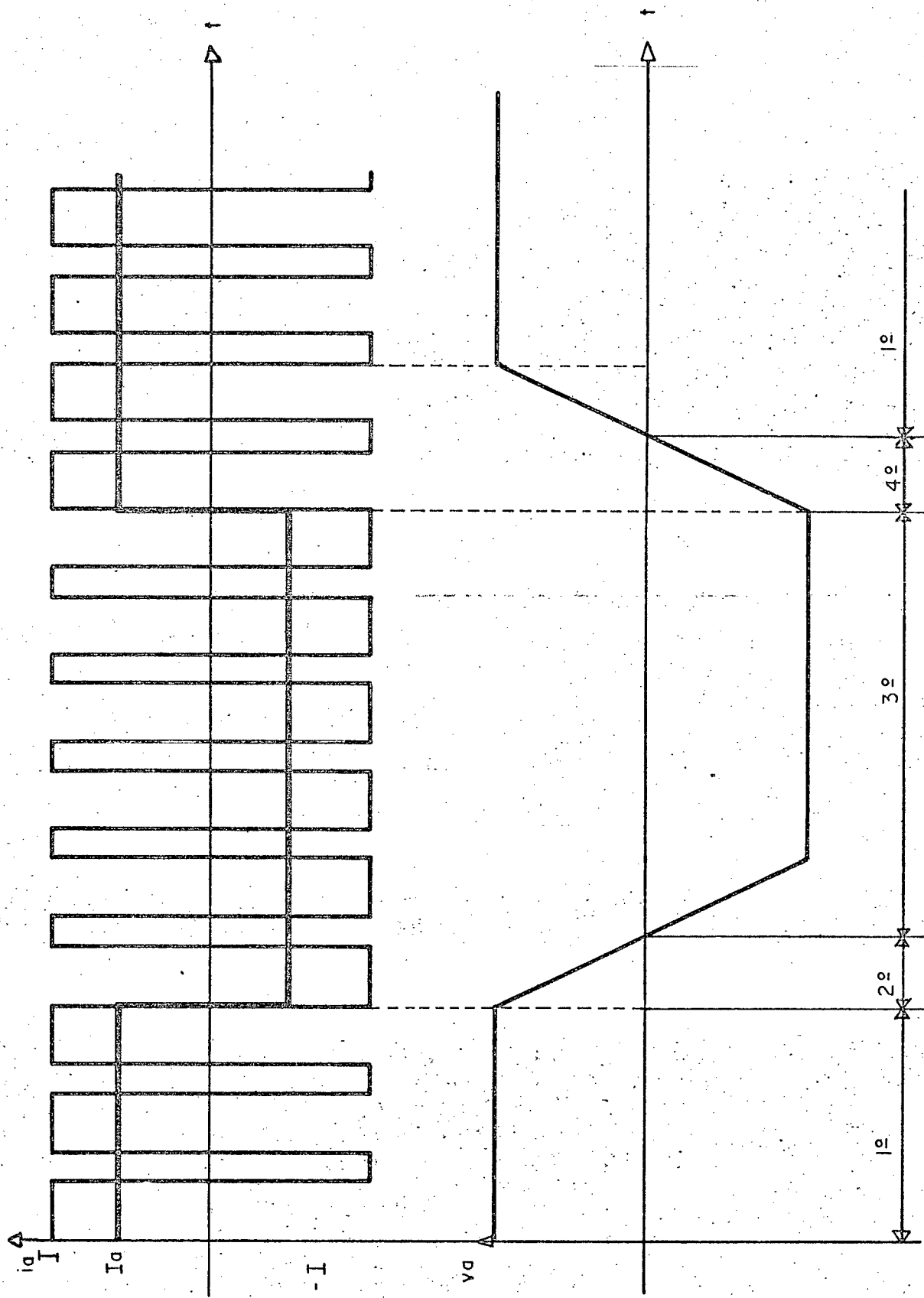


Figura 2.6 - Reversibilidade da tensão e da corrente.

Na Fig. 2.6 está mostrada a reversão de velocidade de uma máquina de corrente contínua, e na Fig. 2.7 estas seqüências estão mostradas em diagrama de blocos.

A mudança do 1º para o 3º quadrante é feita com a mudança da razão cíclica, a qual é executada em um tempo muito menor que o tempo que a velocidade leva para decrescer até zero. Este decréscimo de velocidade foi considerado linear, e neste intervalo de tempo, a tensão média é positiva e a corrente média é negativa. Isto indica que a máquina está operando no 2º quadrante, ou seja, está devolvendo à rede, a energia cinética armazenada em seu eixo.

Como a corrente I que é fornecida pela fonte de corrente possui sempre o mesmo sentido, a frenagem regenerativa é feita com inversão da tensão média V_p nos terminais da fonte. Por este motivo, a fonte de corrente deve ser reversível em tensão.

2.4 - Configuração da Fonte de Corrente e da Estrutura proposta

2.4.1 - Fonte de Corrente Reversível em Tensão

O conversor a ser utilizado para alimentar em corrente a estrutura proposta, pode possuir qualquer das configurações conhecidas, sendo necessário apenas que permita reversibilidade de tensão.

Neste trabalho será utilizada como fonte de corren

te a configuração mostrada na Fig. 2.8, que é constituída por uma ponte retificadora de onda completa com quatro tiristores, um indutor externo de filtragem, e uma malha de regulação de corrente, que regula o ângulo de disparo dos tiristores.

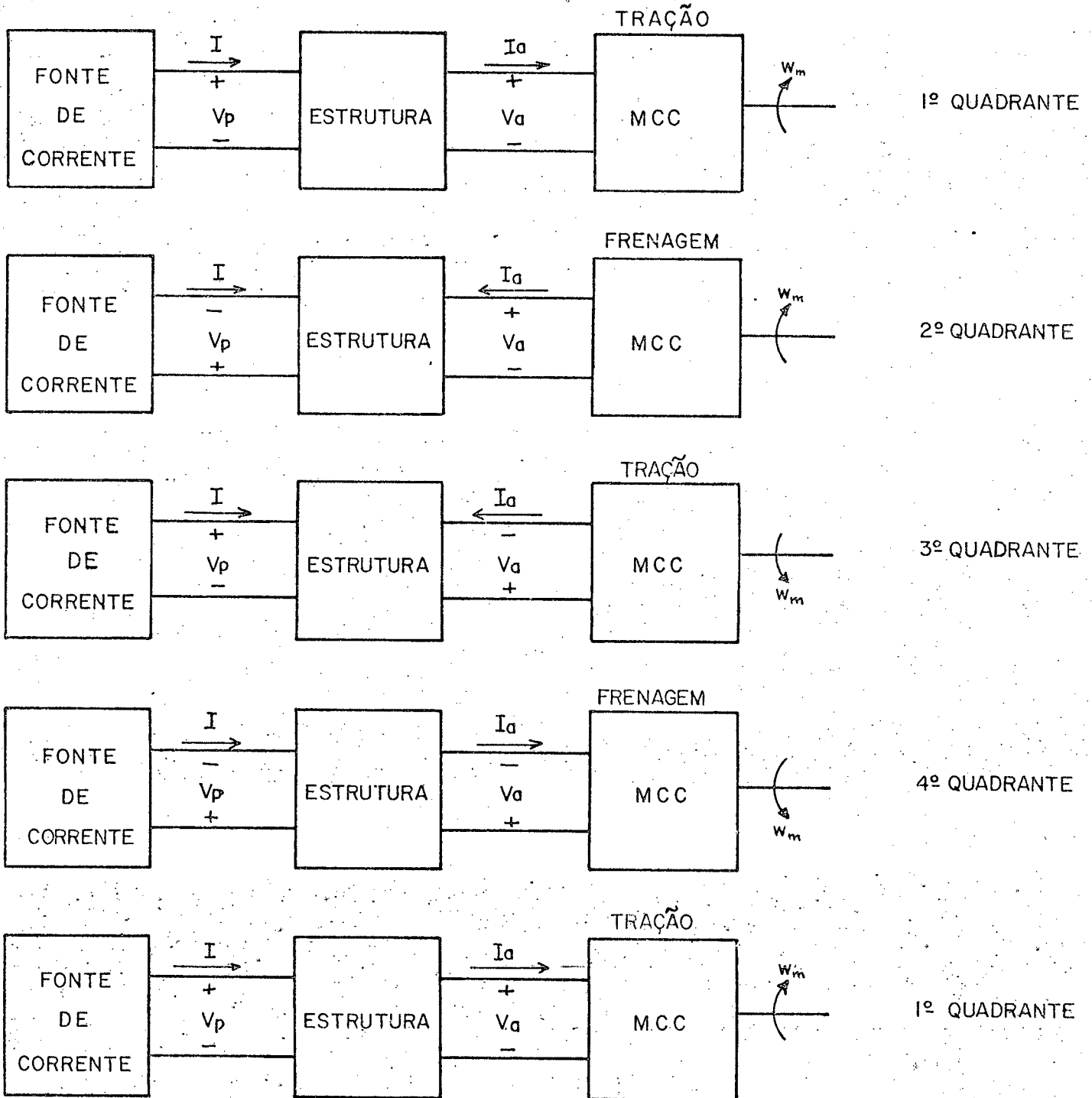


Figura 2.7 - Diagrama de blocos referente à Fig. 2.6

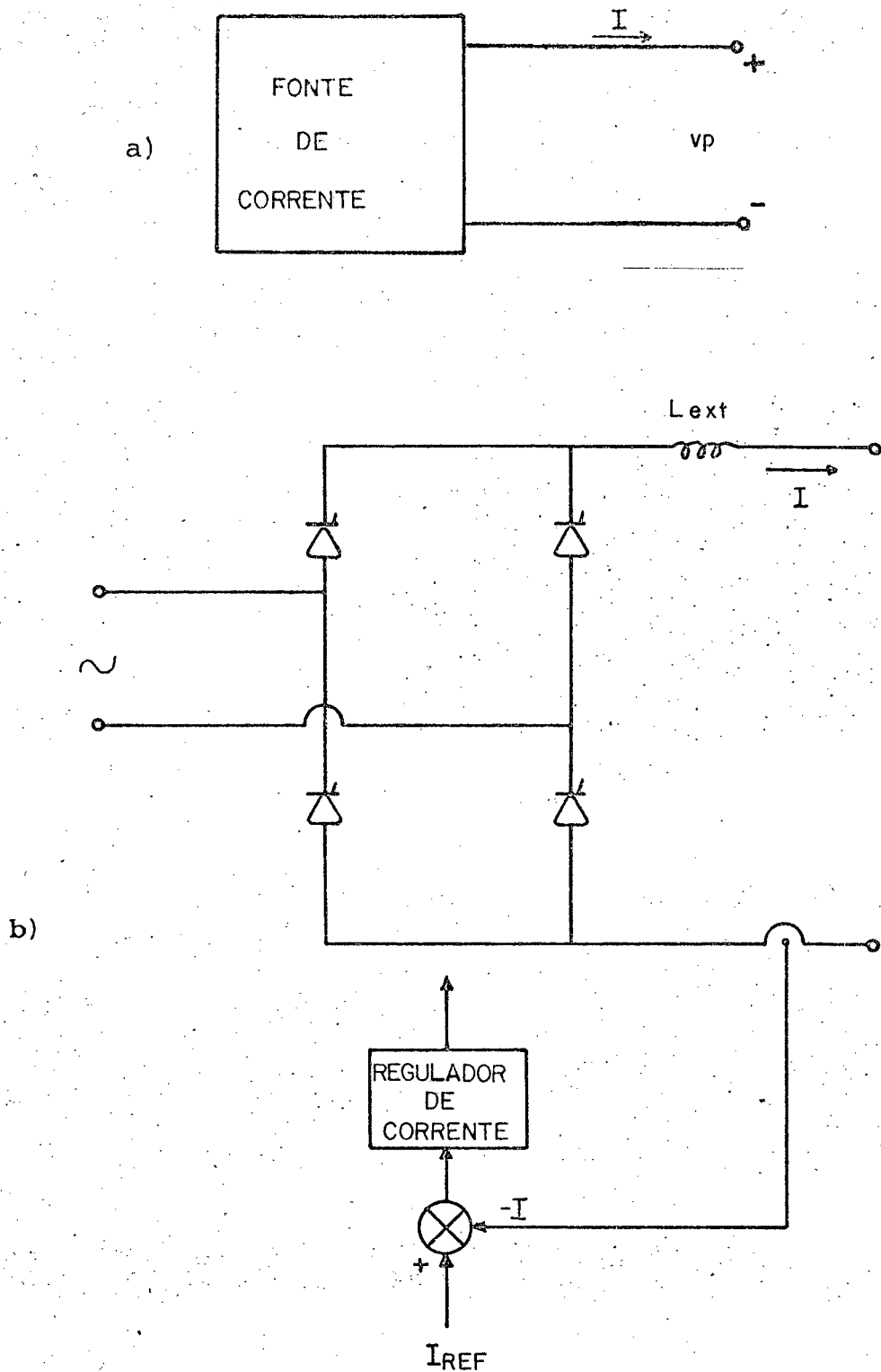


Figura 2.8 - Fonte de corrente reversível em tensão

- a - Diagrama de blocos;
- b - Configuração do circuito.

A malha de regulação de corrente se torna necessária para assegurar o valor da corrente.

2.4.2 - Estrutura proposta

Esta estrutura alimentada em corrente, é capaz de fornecer corrente contínua nos dois sentidos, a partir da regulação da razão cíclica.

Foi concebida a partir do pulsador de tensão utilizando a propriedade da dualidade. E por fornecer uma forma de onda de corrente semelhante à forma de onda de tensão fornecida pelo pulsador de tensão, será tratado a partir deste capítulo como PULSADOR DE CORRENTE. Ver Fig. 2.9.

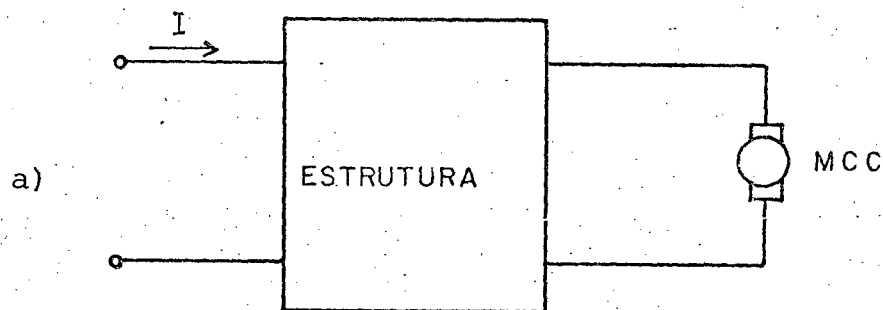


Figura 2.9 - Estrutura proposta associada à máquina de corrente contínua.

a - Diagrama de blocos.

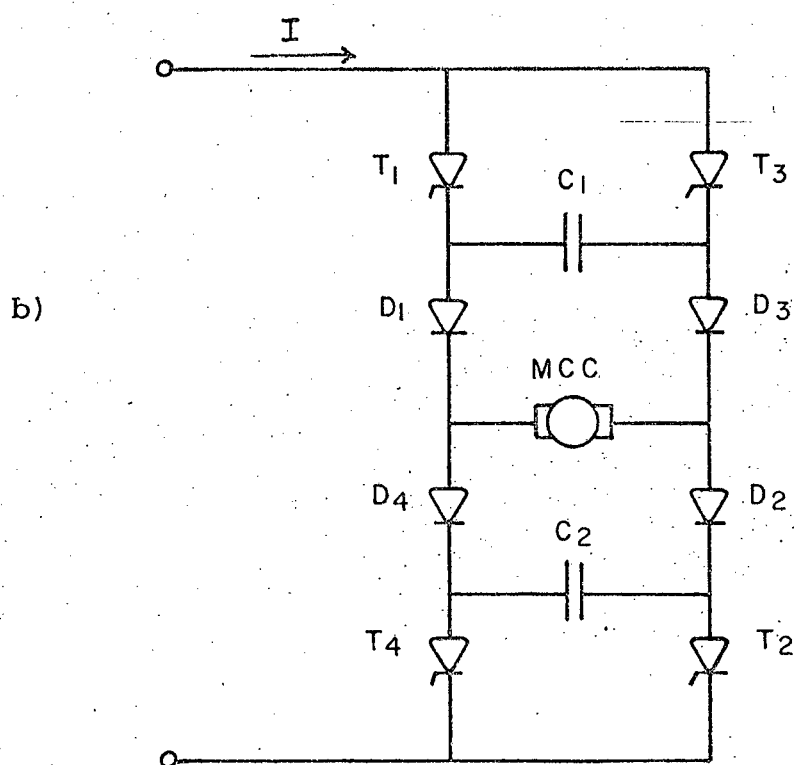


Figura 2.9 - Estrutura proposta associada à máquina de corrente contínua.

b - Configuração do Circuito.

2.4.3 - Associação da Fonte de Corrente com o Pulsador de Corrente e a Máquina de Corrente Contínua

Associando as duas configurações mostradas anteriormente resulta a registrada na Fig. 2.10, que foi a utilizada neste trabalho.

A alimentação é feita a partir da rede.

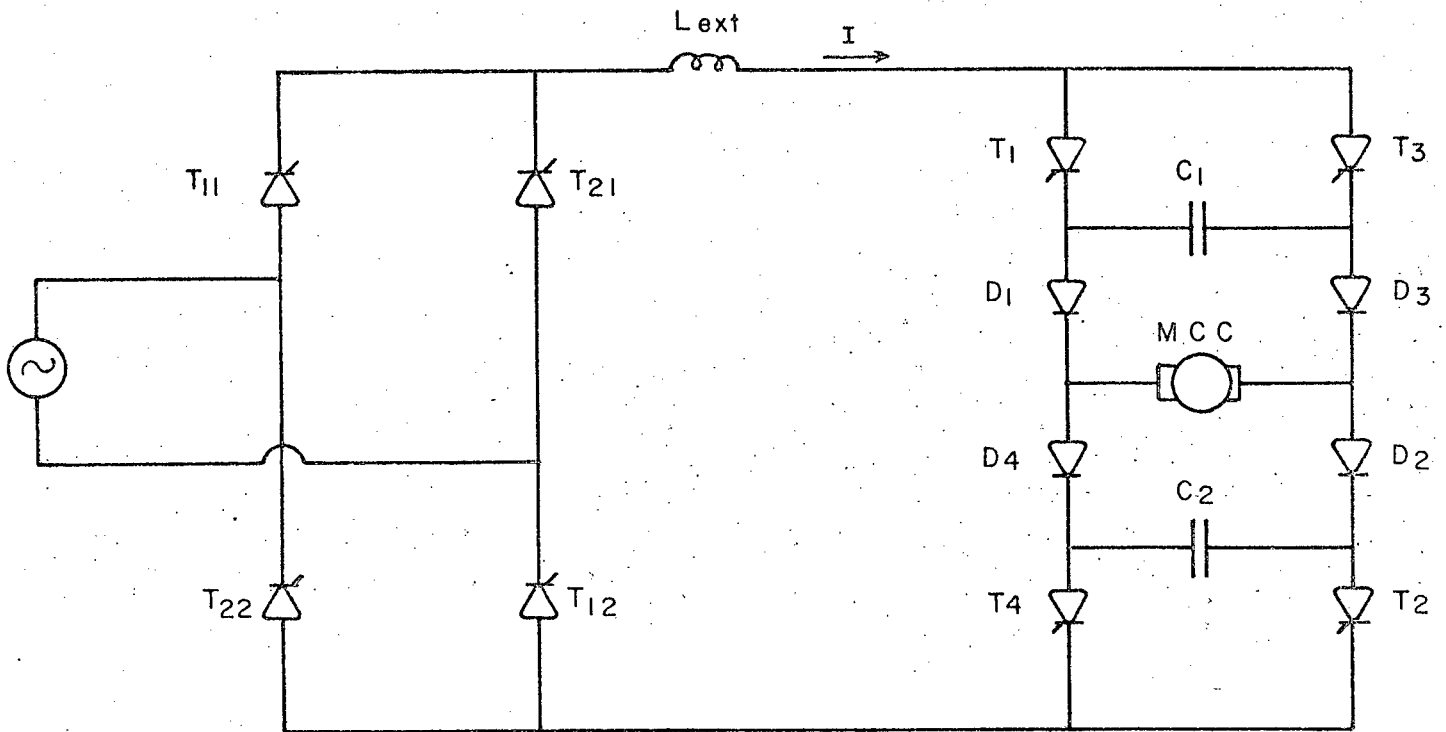


Figura 2.10 - Associação da fonte de corrente com o pulsador de corrente e a máquina de corrente contínua.

2.5 - Conclusão

Neste capítulo comprovou-se:

- que existe uma relação linear entre (V_p/V_a) e a razão cíclica ρ ;
- como se processa o fluxo de potência numa reversão de velocidade;
- a capacidade que o pulsador possui de enviar à rede, a característica do que está acontecendo com a máquina de corrente contínua;
- que existe a necessidade de se utilizar uma fonte de cor

rente reversível em tensão;

- e que a associação pulsador de corrente-máquina de corrente contínua possui reversibilidade em quatro quadrantes.

CAPÍTULO 3

ESTUDO DA COMUTAÇÃO DO PULSADOR DE CORRENTE

3.1 - Introdução

Para um perfeito funcionamento do pulsador de corrente deve-se garantir a comutação. Por este motivo, neste capítulo será feito um estudo das seqüências de funcionamento e as correspondentes deduções analíticas.

Ainda, serão levantados âbacos para o dimensionamento dos capacitores do pulsador. Âbacos estes, obtidos a partir dos dados da máquina, já que na associação pulsador de corrente-máquina de corrente contínua, os parâmetros de um influenciam no comportamento do outro.

3.2 - Seqüências de funcionamento

O pulsador está representado na Fig. 3.1, e é constituído por:

T_1, T_2, T_3, T_4 - Tiristores

D_1, D_2, D_3, D_4 - Diodos de isolamento

C_1, C_2 - Capacitores com a mesma capacitância

$$C = C_1 = C_2$$

I - Fonte de corrente ideal.

Os diodos recebem esta denominação porque impedem a descarga dos capacitores.

Os capacitores permitem a aplicação de tensão inversa nos tiristores, causando o bloqueio.

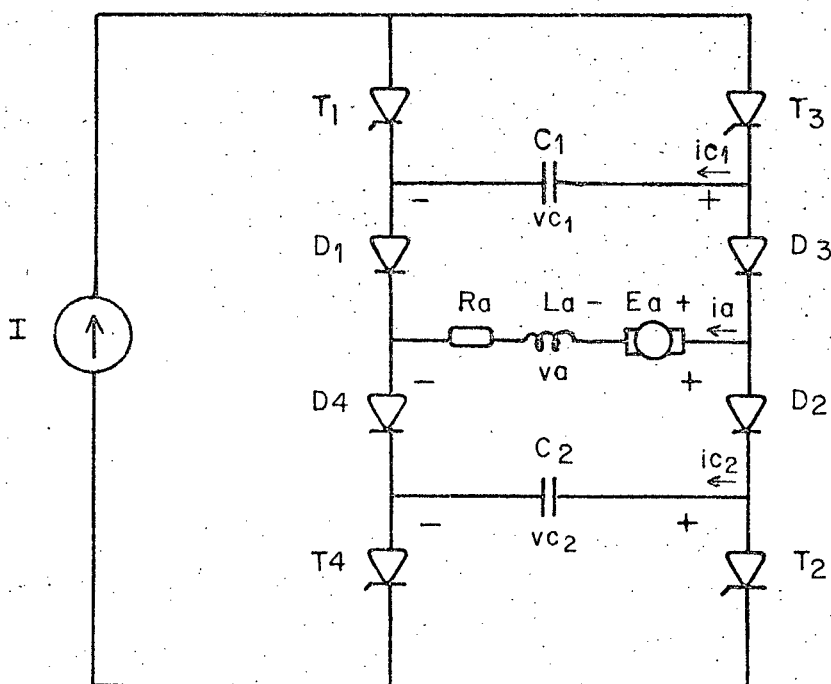


Figura 3.1 - Pulsador de corrente associado à máquina de corrente contínua.

1ª Sequência (t_0, t_1):

A corrente de carga é conduzida pelos tiristores T_1, T_2 e pelos diodos D_1, D_2 .

Os capacitores C encontram-se carregados com a tensão V_{c01} .

A Fig. 3.2 ilustra a 1^a seqüência.

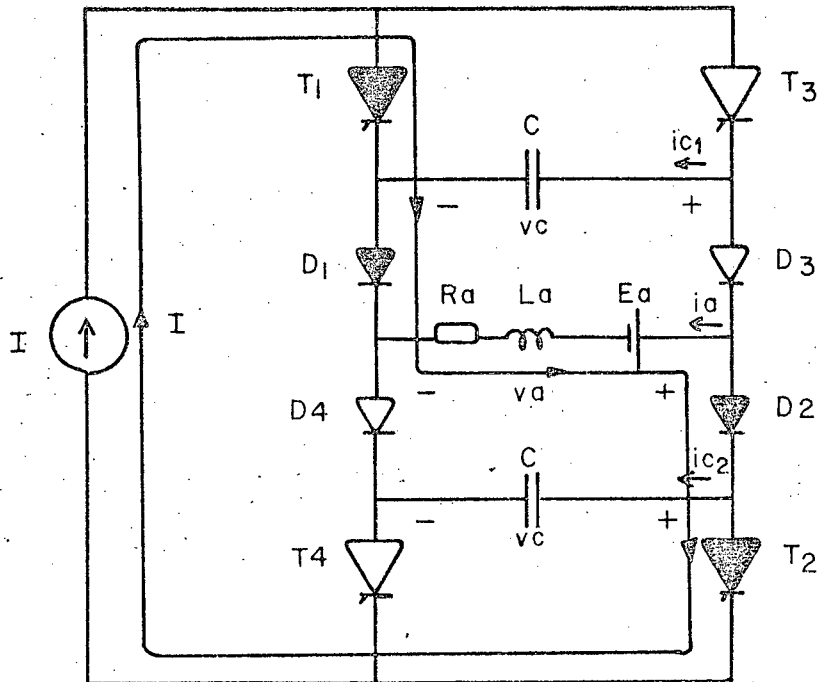


Figura 3.2 - 1^a Seqüência de funcionamento.

2^a Seqüência (t_1, t_2):

No início desta seqüência os tiristores T_3 e T_4 são disparados, enquanto os tiristores T_1 e T_2 são bloqueados pela aplicação da tensão inversa armazenada nos capacitores.

Os diodos D_3 e D_4 permanecem bloqueados.

Os capacitores C descarregam com corrente constante.

A circulação de corrente pode ser vista na Fig.

3.3.

Os diodos D_3 e D_4 entram em condução quando $v_c(t) = v_a(t)$, instante em que inicia-se a 3^a seqüência.

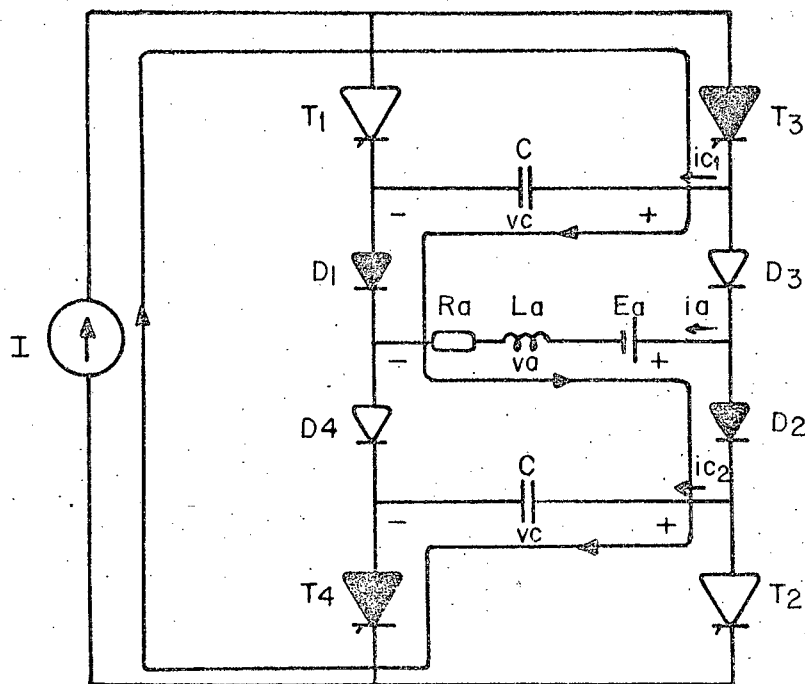


Figura 3.3 - 2^a Seqüência de funcionamento.

3^a Seqüência (t_2, t_3):

Os tiristores T_3 e T_4 continuam conduzindo, enquanto os tiristores T_1 e T_2 permanecem bloqueados.

Todos os diodos conduzem, e neste instante tem-se a comutação na sua etapa principal.

A corrente pelos diodos D_1 e D_2 decresce até zero, e neste momento são bloqueados, dando início à 4^a Seqüência.

Esta seqüência é mostrada na Fig. 3.4.

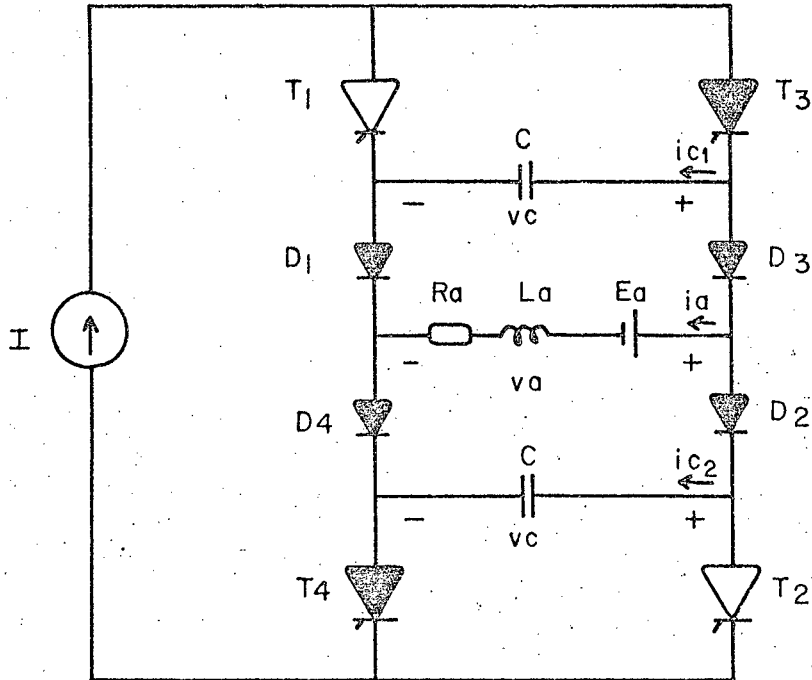


Figura 3.4 - 3^a. Seqüência de funcionamento.

4^a Seqüência (t_3, t_4):

Os componentes T_3, D_3, T_4, D_4 conduzem a corrente de carga.

Os capacitores C encontram-se carregados com tensão V_{co2} .

A Fig. 3.5 ilustra a 4^a seqüência.

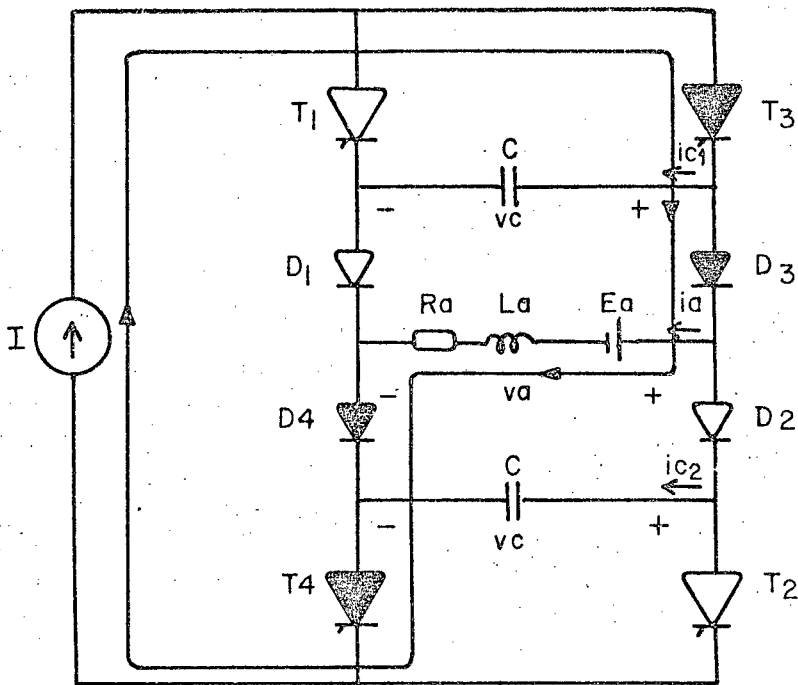


Figura 3.5 - 4^a Seqüência de funcionamento.

5^a Seqüência (t_4, t_5):

Os tiristores T_1 e T_2 são disparados, e os tiristores T_3 e T_4 são bloqueados pela tensão inversa aplicada pelos capacitores.

D_1 e D_2 continuam bloqueados.

Os capacitores descarregam com corrente constante.

A Fig. 3.6 mostra esta seqüência.

A seqüência finaliza quando $v_c(t) = v_a(t)$ com a condução dos diodos D_1, D_2 .

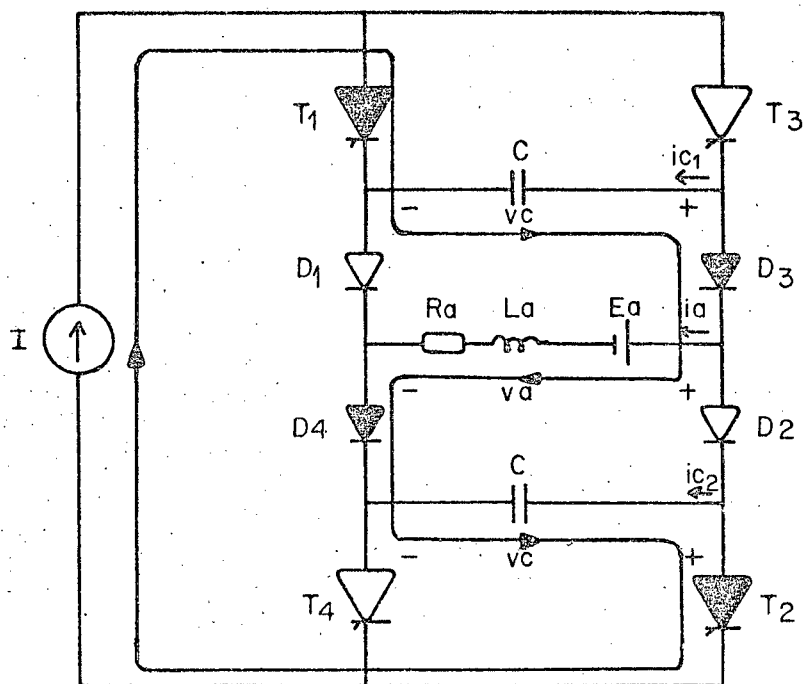


Figura 3.6 - 5^a Seqüência de funcionamento.

6^a Seqüência (t_5, t_6):

Os tiristores T_1 e T_2 continuam conduzindo, enquanto os tiristores T_3 e T_4 permanecem bloqueados.

Os diodos D_1, D_2, D_3 e D_4 conduzem, e a comutação é realizada. Ver Fig. 3.7.

A corrente que circula pelos diodos D_3 e D_4 diminui até zero, e estes são bloqueados. Assim sendo, um período é completado e a próxima seqüência volta a ser a 1^a novamente.

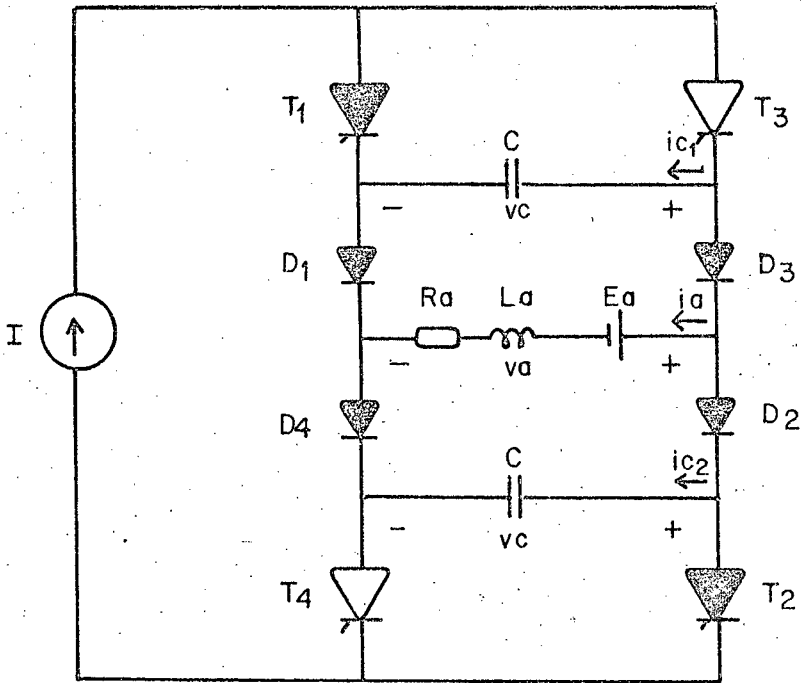


Figura 3.7 - 6^a Sequência de funcionamento.

3.3 - Estudo Analítico da Comutação

1^a Sequência (t_0, t_1):

A corrente i_a da máquina é dada por:

$$i_a = -I \quad (3.1)$$

A tensão armazenada no capacitor é:

$$v_c = V_{c01} < 0 \quad (3.2)$$

A tensão nos terminais da máquina é dada por:

$$v_a = E_a - R_a I \quad (3.3)$$

2ª Seqüência (t_1, t_2):

Os capacitores descarregam com corrente constante I , e a tensão em seus terminais é dada por:

$$v_c = V_{co1} + \frac{I}{C} t \quad (3.4)$$

A seqüência finaliza quando $v_c = v_a$:

$$v_c = E_a - R_a I \quad (3.5)$$

O tempo de aplicação de tensão inversa nos tiris tores T_1 e T_2 quando $E_a > 0$, pode ser obtido a partir da expres são (3.4):

$$V_{co1} + \frac{I}{C} t_{q1} = 0$$

Logo:

$$t_{q1} \Big|_{E_a > 0} = \left| \frac{V_{co1} C}{I} \right| \quad (3.6)$$

Quando $E_a < 0$ o tempo de aplicação de tensão inversa crítico não acontece nos tiristores T_1 e T_2 , mas sim nos ti ristöres T_3 e T_4 , e é dado por uma expressão diferente da expres

são (3.6).

3ª Seqüência (t_2, t_3):

A corrente i_a que circula pela máquina pode ser obtida a partir da resolução do circuito formado nesta seqüência.

Ver Fig. 3.8.

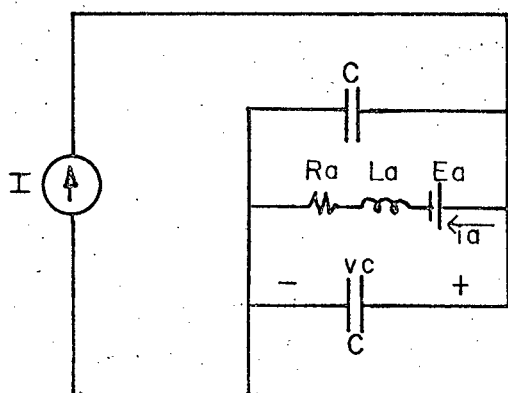


Figura 3.8 - Simplificação do circuito formado pelo pulsador de corrente nesta seqüência.

O circuito da Fig. 3.8 pode ainda ser dado pelo circuito da Fig. 3.9.

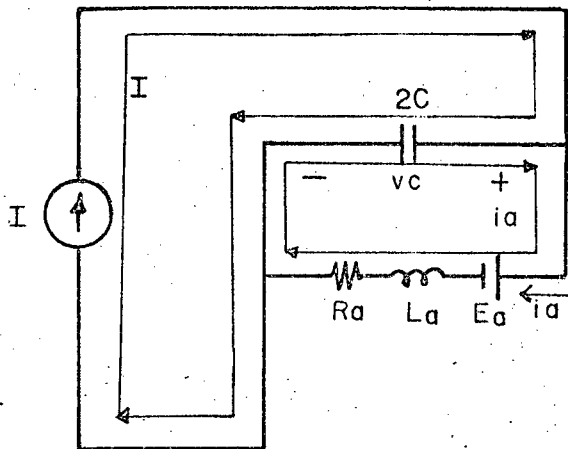


Figura 3.9 - Simplificação do circuito da Fig. 3.8.

Resolvendo a malha da corrente i_a , temos:

$$-v_c(0) - \frac{I}{2C}t + \frac{1}{2C} \int_0^t i_a(t) dt + E_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = 0 \quad (3.7)$$

Como:

$$v_c(0) = E_a - R_a I \quad (3.8)$$

Logo, utilizando a transformada de Laplace:

$$\frac{R_a I}{s} - \frac{I}{2Cs^2} + \frac{I_a(s)}{2Cs} + L_a [I_a(s) - i_a(0)] + R_a I_a(s) = 0 \quad (3.9)$$

$$i_a(0) = -I \quad (3.10)$$

Resolvendo:

$$I_a(S) = I \left[\frac{-\left(S + \frac{R_a}{2L_a}\right)}{\left(S + \frac{R_a}{2L_a}\right)^2 + \omega_0^2} - \frac{R_a}{2L_a \omega_0} \frac{\omega_0}{\left(S + \frac{R_a}{2L_a}\right)^2 + \omega_0^2} + \frac{1}{2CL_a \omega_0} \frac{1}{S} \frac{\omega_0}{\left(S + \frac{R_a}{2L_a}\right)^2 + \omega_0^2} \right] \quad (3.11)$$

onde:

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{2L_a C} - \frac{R_a^2}{4L_a^2}\right)} \quad (3.12)$$

Utilizando a transformada inversa de Laplace te
mos:

$$i_a(t) = I \left[1 - 2 \left(\cos \omega_0 t + \frac{R_a}{2L_a \omega_0} \operatorname{sen} \omega_0 t \right) \exp\left(-\frac{R_a t}{2L_a}\right) \right] \quad (3.13)$$

A tensão nos terminais dos capacitores pode ser ob
tida a partir de:

$$v_c(t) = \frac{1}{2C} \int_0^t \left[I - i_a(t) \right] dt + v_c(0) \quad (3.14)$$

que resulta:

$$v_c(t) = E_a + R_a I - I \left[2R_a \cos \omega_0 t + \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{R_a^2}{L_a} - \frac{1}{C} \right) \operatorname{sen} \omega_0 t \right] \exp\left(-\frac{R_a t}{2L_a}\right) \quad (3.15)$$

A tensão máxima é alcançada no final desta seqüência quando as correntes nos diodos D_1 e D_2 se anulam. Assim $v_{c\text{máx}} =$

$v_{\text{co2}}:$

$$V_{\text{co2}} = E_a + R_a I + \sqrt{\frac{2L_a}{C}} I \exp \left[-R_a \sqrt{\frac{C}{2L_a - R_a^2 C}} \phi \right] \quad (3.16)$$

onde:

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left[-\sqrt{\frac{2L_a}{CR_a^2} - 1} \right] \quad (3.17)$$

em radianos, referido ao 2º quadrante.

4ª Seqüência (t_3, t_4):

A corrente i_a da máquina é dada por:

$$i_a = I \quad (3.18)$$

A tensão armazenada no capacitor é:

$$v_c = v_{\text{co2}} > 0 \quad (3.19)$$

A tensão nos terminais da máquina:

$$v_a = E_a + R_a I \quad (3.20)$$

5ª Sequência (t_4, t_5):

Nesta seqüência os capacitores descarregam linearmente com corrente constante I:

$$v_c = V_{co2} - \frac{I}{C} t \quad (3.21)$$

No final da seqüência a tensão nos capacitores é dada por:

$$v_c = E_a - R_a I \quad (3.22)$$

O tempo de aplicação de tensão inversa t_{q2} sobre os tiristores T_3 e T_4 quando $E_a < 0$ pode ser obtido pela expressão (3.21) quando $v_c(t) = 0$, então:

$$t_{q2} \Big|_{E_a < 0} = \frac{V_{co2} C}{I} \quad (3.23)$$

No caso em que $E_a > 0$, o tempo de aplicação de tensão inversa crítico ocorre nos tiristores T_1 e T_2 durante a 2ª seqüência, e o t_{q2} da 5ª seqüência é maior.

6ª Sequência (t_5, t_6):

A corrente de armadura $i_a(t)$ pode ser obtida pelo circuito formado pelo pulsador nesta seqüência. Ver Fig. 3.10.

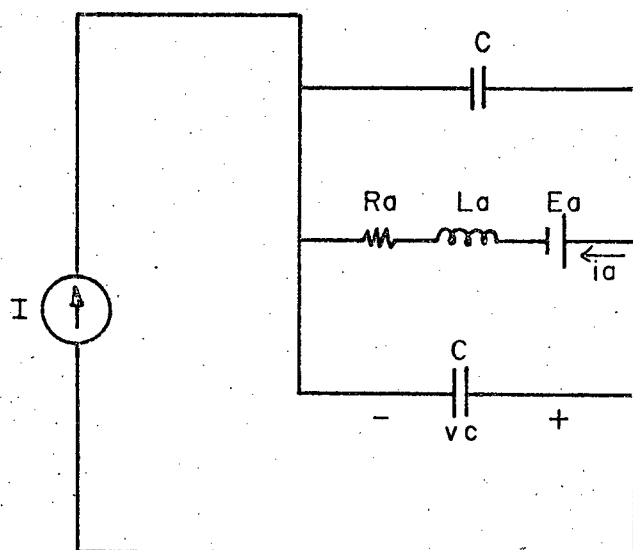


Figura 3.10 - Configuração tomada pelo pulsador na 6^a seqüência.

O circuito pode ainda ser reduzido à Fig. 3.11.

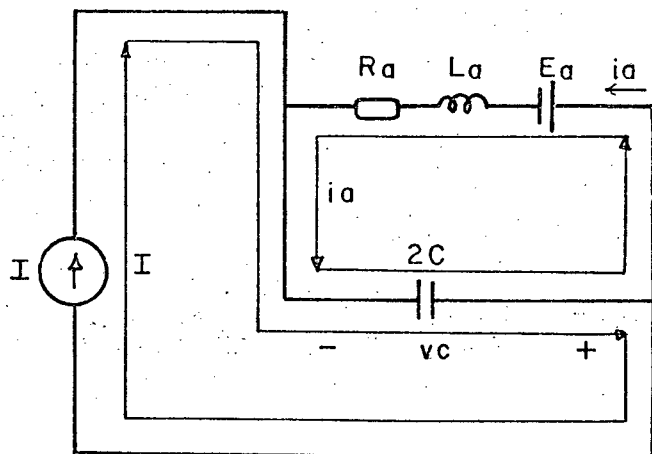


Figura 3.11 - Simplificação da Fig. 3.10.

A tensão inicial no capacitor é dada por:

$$v_c(0) = E_a + R_a I \quad (3.24)$$

A corrente inicial na máquina é:

$$i_a(0) = I \quad (3.25)$$

A expressão resultante da malha da corrente i_a :

$$E_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + \frac{1}{2C} \int_0^t i_a(t) dt + \frac{I}{2C} t - v_c(0) = 0 \quad (3.26)$$

Aplicando a transformada de Laplace, resulta:

$$L_a \left[I_a(S) \cdot i_a(0) \right] + R_a I_a(S) + \frac{I_a(S)}{2CS} + \frac{I}{2CS^2} - \frac{R_a I}{S} = 0 \quad (3.27)$$

o que resulta:

$$I_a(S) = I \left[\frac{\left(S + \frac{R}{2L_a} \right)}{\left(S + \frac{R}{2L_a} \right)^2 + \omega_0^2} + \frac{R}{2L_a \omega_0} \frac{\omega_0}{\left(S + \frac{R}{2L_a} \right)^2 + \omega_0^2} - \frac{1}{2CL_a \omega_0} \frac{1}{S} \frac{\omega_0}{\left(S + \frac{R}{2L_a} \right)^2 + \omega_0^2} \right] \quad (3.28)$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace:

$$i_a(t) = -I \left[1 - 2 \left(\cos \omega_0 t + \frac{R_a}{2L_a \omega_0} \operatorname{sen} \omega_0 t \right) \exp \left(- \frac{R t}{2L_a} \right) \right] \quad (3.29)$$

Sendo que:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{2L_a C} - \frac{R_a^2}{4L_a^2}} \quad (3.30)$$

E a tensão nos terminais dos capacitores será dada pela expressão:

$$v_c(t) = -\frac{1}{2C} \int_0^t [I + i_a(t)] dt + v_c(0) \quad (3.31)$$

Resultando:

$$v_c(t) = E_a - R_a I + I \left[2R_a \cos\omega_0 t + \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{R_a^2}{L_a} - \frac{1}{C} \right) \sin\omega_0 t \right] \exp\left(-\frac{R_a t}{2L_a}\right) \quad (3.32)$$

A tensão mínima V_{col} acontecerá quando as correntes em D_3 e D_4 forem nulas.

$$V_{\text{col}} = E_a - R_a I - \sqrt{\frac{2L_a}{C}} I \exp\left[-R_a \sqrt{\frac{C}{2L_a - R_a^2 C}} \phi\right] \quad (3.33)$$

Sendo que:

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left[-\sqrt{\frac{2L_a}{CR_a^2} - 1} \right] \quad (3.34)$$

em radianos, referido ao 2º quadrante.

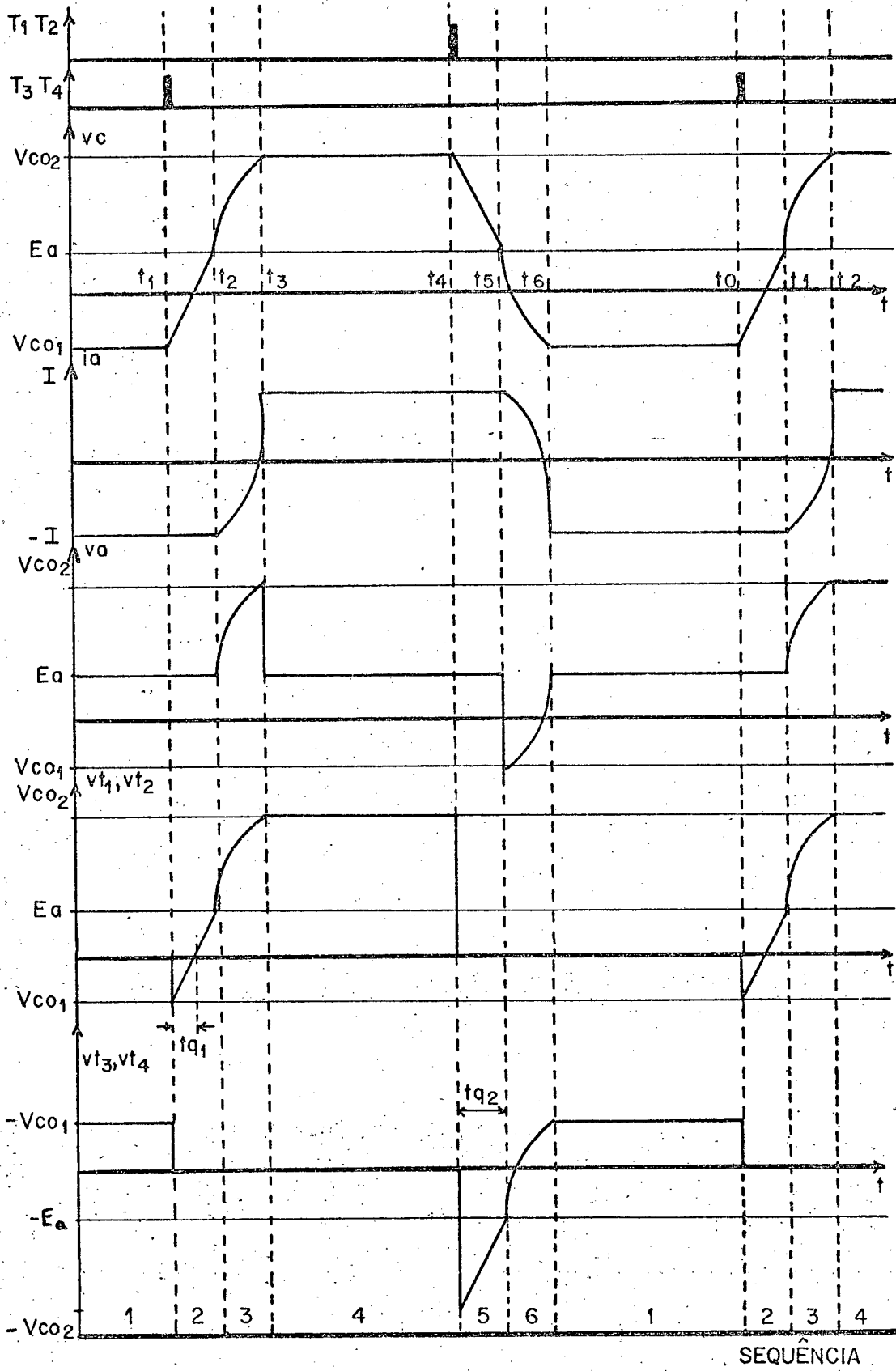


Figura 3.12 - Principais formas de onda nos componentes.

3.4 - Influências das não idealidades - ondulação da Corrente de Alimentação

Para que o modelo teórico deduzido anteriormente possa ser utilizado na descrição dos fenômenos que ocorrem no acionamento de uma máquina de corrente contínua, seria necessário que se levasse em consideração as não idealidades que aparecem ao longo de todo o sistema. Isto, evidentemente, acarretaria um longo trabalho, talvez não compensado, pois muitas destas não idealidades pouco influenciariam nos resultados finais.

No entanto, existe uma delas que em projeto deve necessariamente ser considerada: a ondulação da corrente de alimentação, a qual atua diretamente sobre o valor do tempo de aplicação de tensão inversa dos tiristores do pulsador, e sobre valores máximo e mínimo de tensão nos capacitores.

Esta ondulação de corrente existe mesmo que se utilizem grandes filtros de corrente, pois a tensão sobre estes filtros é bastante irregular. Por este motivo, e dependendo da magnitude da ondulação de corrente ΔI , as expressões analíticas podem fornecer resultados bastante diferenciados da experimentação.

Para efeito de projeto alguns cuidados necessitam serem tomados, pois a ondulação de corrente ΔI pode levar a associação pulsador-máquina a valores críticos, tais como: tempo de aplicação de tensão inversa nos tiristores do pulsador menor que o permitido pelos próprios tiristores, causando falha de comutação, além de elevados níveis de tensão nos capacitores.

Se a ondulação da corrente ΔI puder ser estimada,

então:

$$I_{\min} \cong I_{\text{med}} - \frac{\Delta I}{2} \quad (3.35)$$

$$I_{\max} \cong I_{\text{med}} + \frac{\Delta I}{2} \quad (3.36)$$

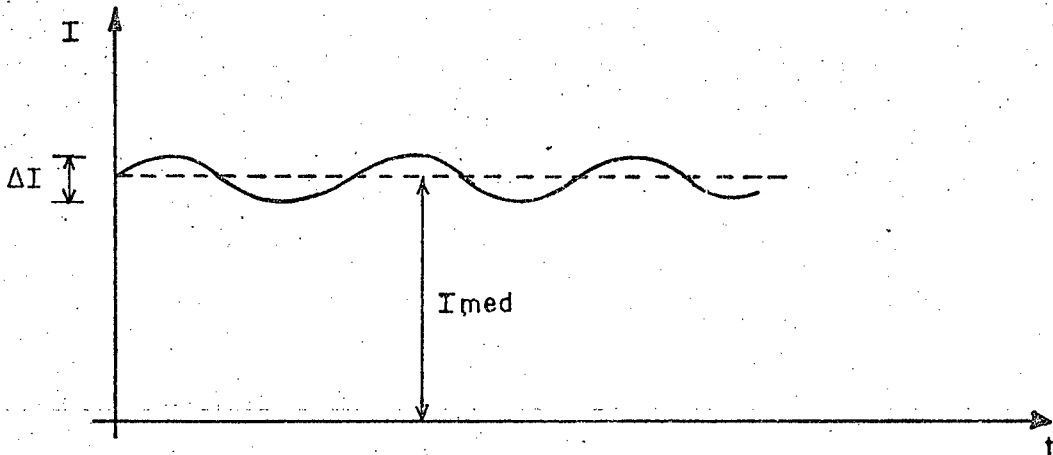


Figura 3.13 - Forma de onda aproximada da corrente de alimentação.

E os valores críticos de tensão serão dados por:

$$V_{\text{col}} = E_a - R_a I_{\max} - \sqrt{\frac{2L_a}{C}} I_{\max} \exp \left[-R_a \sqrt{\frac{C}{2L_a - R_a^2 C}} \phi \right] \quad (3.37)$$

$$V_{\text{co2}} = E_a + R_a I_{\max} + \sqrt{\frac{2L_a}{C}} I_{\max} \exp \left[-R_a \sqrt{\frac{C}{2L_a - R_a^2 C}} \phi \right] \quad (3.38)$$

O tempo de aplicação de tensão inversa:

$$t_{q1} \Big|_{E_a > 0} = -\frac{E_a C}{I_{\min}} + R_a C + \sqrt{2L_a C} \exp \left[-R_a \sqrt{\frac{C}{2L_a - R_a^2 C}} \phi \right] \quad (3.39)$$

$$t_{q2} \Big|_{E_a < 0} = \frac{E_a C}{I_{\min}} + R_a C + \sqrt{2L_a C} \exp \left[-R_a \sqrt{\frac{C}{2L_a - R_a^2 C}} \phi \right] \quad (3.40)$$

onde:

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left[-\sqrt{\frac{2L_a}{CR_a^2}} - 1 \right] \quad (3.41)$$

em radianos, referido ao 2º quadrante.

3.5 - Dimensionamento dos Capacitores

O dimensionamento dos capacitores utilizados no pulsador de corrente, é feito a partir de limitações impostas pelo projetista e pelas limitações impostas pelos parâmetros da máquina ao qual será acoplado.

As limitações impostas pelo projetista são: a capacitância máxima para estes capacitores, tensão máxima nos capacitores e faixa de tempo de aplicação de tensão inversa.

Para efeito de projeto, geralmente a resistência de armadura R_a pode ser desprezada, e os valores de tensão máxima e tempo de aplicação de tensão inversa são dados por:

- para $E_a > 0$ (das expressões 3.38 e 3.39)

$$V_{cm\acute{a}x} = E_a + \sqrt{\frac{2L_a}{C}} I \quad (3.42)$$

$$t_q = -\frac{E_a C}{I} + \sqrt{2L_a C} \quad (3.43)$$

- para $E_a < 0$ (das expressões 3.37 e 3.40)

$$v_{cm\acute{a}x} = \left[E_a - \sqrt{\frac{2L_a}{C}} I \right] \quad (3.44)$$

$$t_q = \frac{E_a C}{I} + \sqrt{2L_a C} \quad (3.45)$$

As condições de comutação serão extremas quando $|E_a|$ for máximo e t_q for mínimo.

A corrente I absorvida da fonte deve, no entanto, ser igual à corrente nominal da máquina, para que seja possível atingir o torque máximo.

A partir das expressões (3.42) e (3.43), ou (3.44) e (3.45), pode-se chegar às seguintes expressões:

$$\left| \frac{v_{cm\acute{a}x}}{2L_a I} \right| = \frac{1}{t_q} \left[\frac{1 - 2K}{(1 - K)^2} \right] \quad (3.46)$$

$$2L_a C = t_q^2 \left(\frac{1 - K}{1 - 2K} \right)^2 \quad (3.47)$$

onde:

$$K = \left| \frac{E_a}{v_{cm\acute{a}x}} \right| \quad (3.48)$$

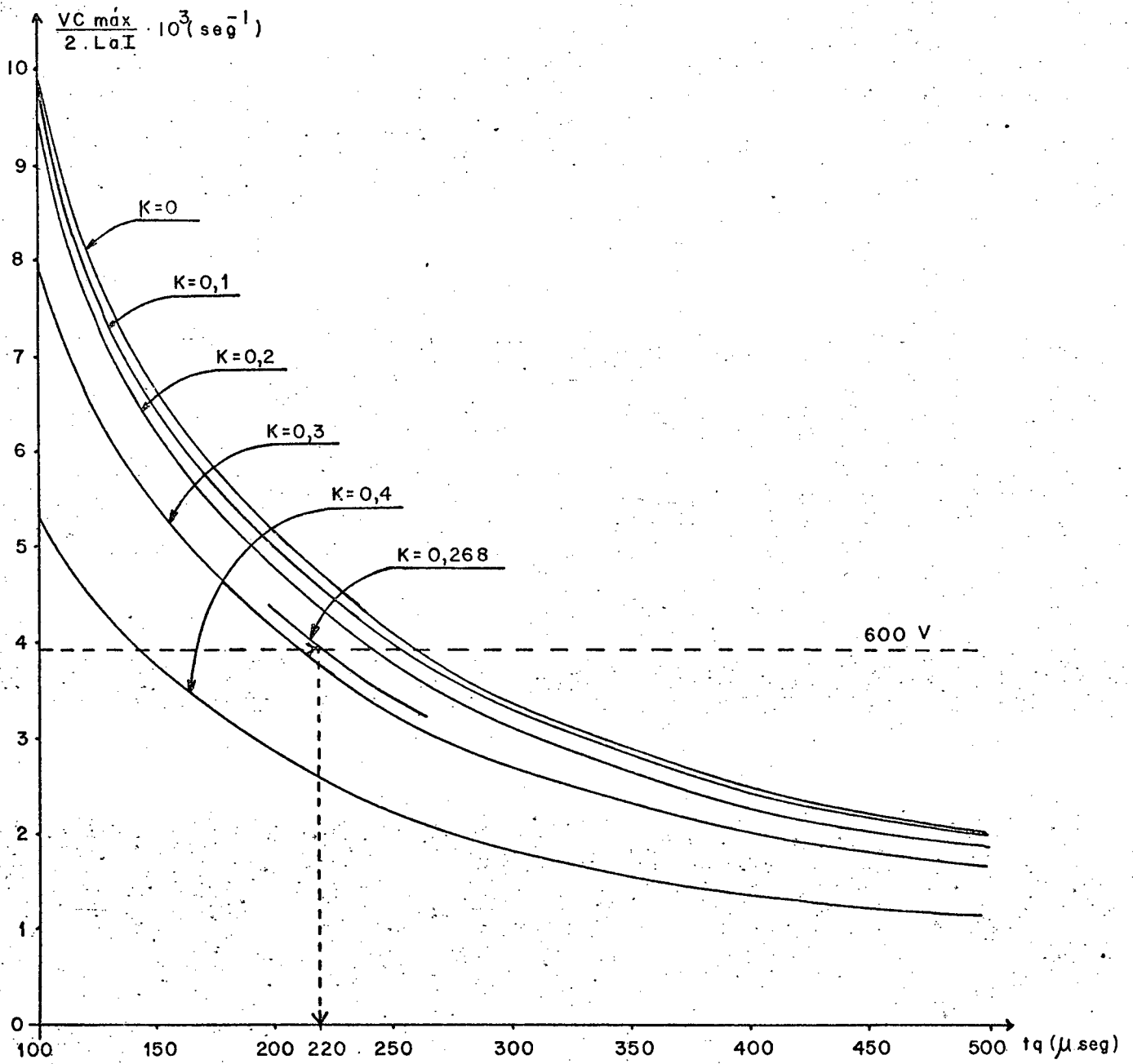


Figura 3.14 - Ábaco $(\frac{v_{\text{cmáx}}}{2L_a I}) = f(t_q)$.

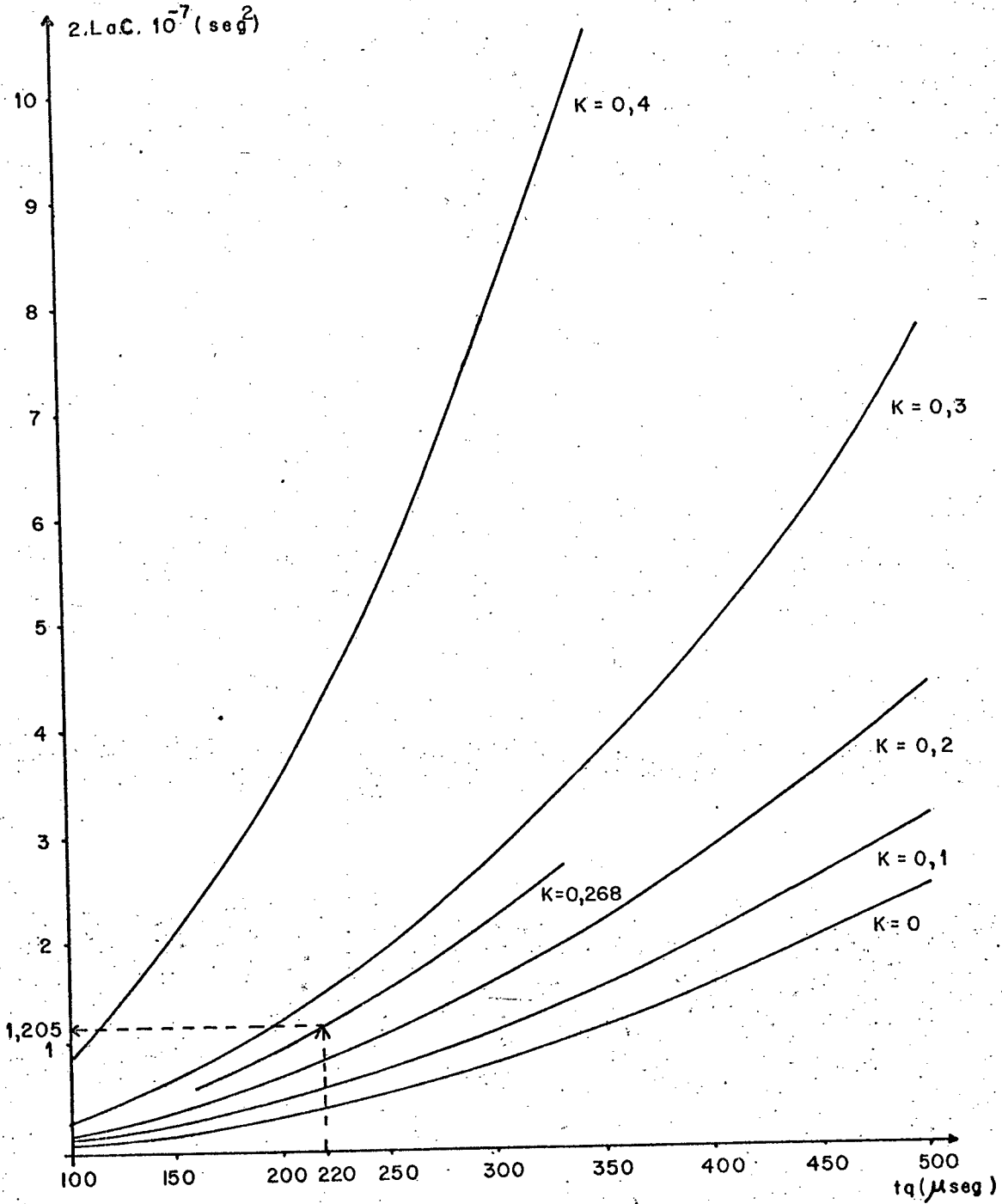


Figura 3.15 - Abaco $(2L_a C) = f(t_q)$.

Com estas expressões pode-se construir ábacos, para serem utilizados em quaisquer situações. Ver Fig. 3.14 e 3.15.

A partir do conhecimento do parâmetro K e de $(v_{c\text{máx}}/2L_a I)$, no ábaco $(v_{c\text{máx}}/2L_a I) = f(t_q)$ pode-se obter o tempo de comutação t_q .

Conhecendo-se K e o tempo t_q , no ábaco $(2L_a C) = f(t_q)$ consegue-se o valor de $2L_a C$ e conseqüentemente do capacitor C .

Este valor de capacitância é o mínimo valor que garante a tensão limite. Aumentando seu valor, a tensão máxima diminui, assim como o tempo de comutação.

3.6 - Dimensionamento dos Capacitores para um Servomotor com Parâmetros conhecidos

Utilizando, por exemplo, um servomotor com imã permanente, 2090 RPM, $I_{\text{nom}} = 6,0$ A. Com os seguintes parâmetros:

$$R_a = 0,804\Omega$$

$$L_a = 6,1\text{ mH}$$

$$K_e = 0,735\text{ V/rad/seg}$$

Sendo determinado pelo projetista:

$$v_{c\text{máx}} = 600\text{V}$$

$$t_{q\text{máx}} = 300\mu\text{ség.}$$

$$C_{\text{máx}} = 20\mu\text{F}$$

Pode-se obter:

$$K = 0,268$$

$$\frac{v_{cm\acute{a}x}}{2L_a I} = 8197$$

Supondo que a corrente de trabalho seja $I = 6A$.

No \acute{a}baco $(v_{cm\acute{a}x} / 2L_a I) = f(t_q)$. Pode-se obter:

$$t_q = 106\mu\text{seg}$$

Agora com o conhecimento de t_q e K , no \acute{a}baco $(2L_a C) =$

$f(t_q)$, encontra-se:

$$2L_a C = 27,78 \cdot 10^{-9}$$

Como L_a \acute{e} conhecido, ent\~{a}o:

$$C \cong 2,3\mu\text{F}$$

Este \acute{e} o limite inferior de capacit\~{a}ncia que pode ser utilizado para garantir:

$$v_{cm\acute{a}x} < 600 \text{ V}$$

$$t_q < 300\mu\text{seg}$$

$$C_{m\acute{a}x} < 20\mu\text{F}$$

que são as condições impostas pelo projetista.

Os resultados experimentais que comprovam este projeto serão apresentados no próximo capítulo.

3.7 - Conclusão

Neste capítulo foi estudado o pulsador de corrente associado à máquina de corrente contínua, sob o ponto de vista da comutação.

Este estudo possibilitou, que as expressões de tensão máxima nos capacitores e o tempo de aplicação de tensão inversa sobre os tiristores fossem encontrados, permitindo assim, o conhecimento dos valores extremos que ocorrem durante a comutação.

O dimensionamento dos capacitores foi proposto a partir de condições pré-estabelecidas pelo projetista, que por meio de dois âbacos fica em condições de limitar a faixa de capacitância adequada à sua utilização.

Os circuitos de comando dos tiristores do pulsador de corrente podem ser encontrados em [3].

C A P Í T U L O 4

ACIONAMENTO DE UM SERVOMOTOR NO 1º

QUADRANTE - ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 - Introdução

Neste capítulo será realizado um estudo experimental da máquina de corrente contínua, acionada pelo pulsador de corrente no primeiro quadrante.

Serão apresentados os circuitos utilizados no controle de velocidade, e também fotografias das principais formas de onda.

4.2 - Variação manual da razão cíclica

A razão cíclica da corrente de armadura é controlada pela relação de tempo de condução de um par de tiristores do pulsador de corrente pelo período de cada ciclo.

A Fig. 4.1 mostra por meio de diagrama de blocos, como pode ser feita a variação manual da razão cíclica.

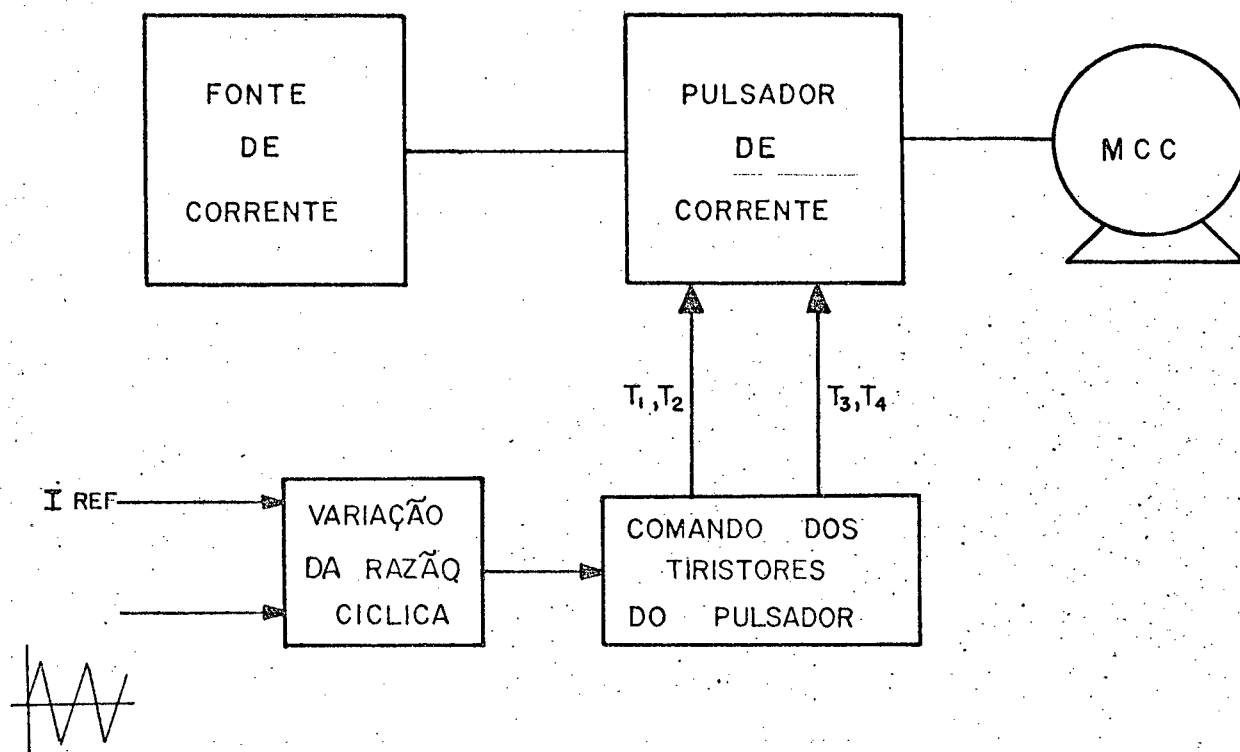


Figura 4.1 - Diagrama de blocos geral utilizando um variador manual da razão cíclica.

4.2.1 - Circuito utilizado para variar a razão cíclica

Este circuito utiliza apenas um comparador, que com para uma forma de onda triangular com outra contínua regulável de acordo com a Fig. 4.2.

Com a variação do potenciômetro que impõe a corrente de referência (I_{REF}), haverá uma variação do nível de tensão contínua, o qual será comparado com a triangular permitindo que o sinal enviado ao circuito de comando dos tiristores do pulsador tenha um período constante, mas uma razão cíclica variável entre $0,1 < \rho < 0,9$.

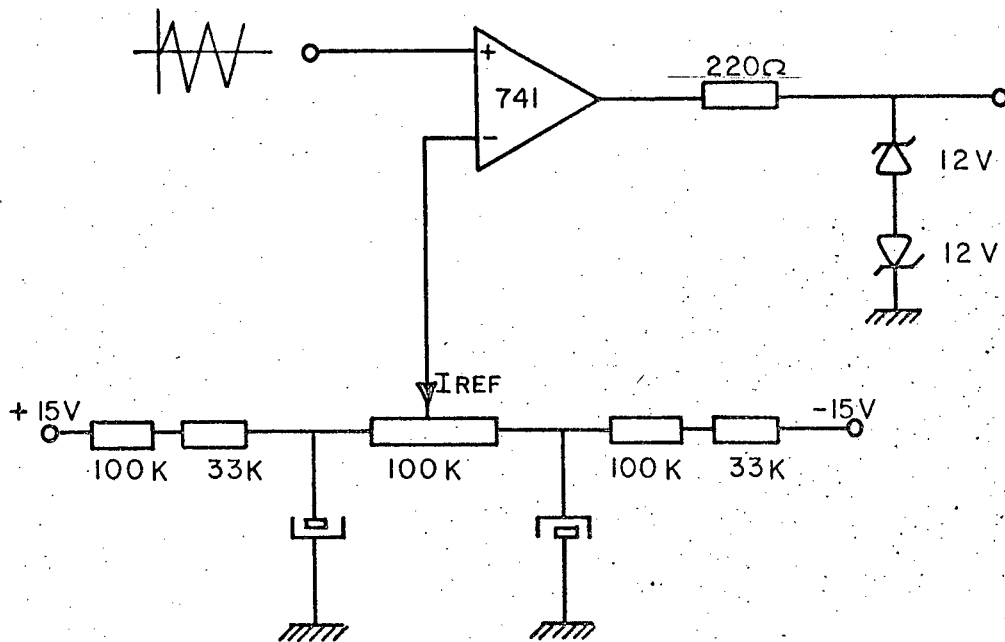


Figura 4.2 - Circuito empregado para variar a razão cíclica.

4.2.2 - Desempenho do variador manual da razão cíclica

Com o circuito mostrado na Fig. 4.2, e utilizando o servomotor citado no item 3.6 do capítulo anterior, foi possível a variação da velocidade no 1º e no 3º quadrante.

Para o referido servomotor, foi possível variar a velocidade desde zero até a velocidade nominal, nos dois sentidos de rotação do eixo, com a particularidade de se conseguir um rigoroso controle mesmo em baixas velocidades.

4.3 - Limitador de Velocidade

Com a utilização do circuito mostrado no item anterior, a variação da razão cíclica é feita manualmente. Assim, o torque elétrico médio produzido no eixo da máquina é constante, mas a velocidade dependerá do torque de carga, o que na maioria das vezes não é interessante. Por este motivo faz-se necessário o controle automático da velocidade, variando a razão cíclica da corrente de armadura (torque elétrico médio) de acordo com a diferença resultante entre o valor da velocidade de eixo e o valor de referência.

Na Fig. 4.3, após o regulador de velocidade, foi utilizada uma porta lógica OU, que permite também o controle de torque manual, estabelecendo em sua saída o mais baixo nível de tensão entre I_1 e I_2 , além de impedir que a velocidade ultrapasse $\omega_{REF\ MAX}$.

Cada bloco apresenta a seguinte função:

- Regulador de Velocidade (Somador - Inversor) - Fornece um valor de erro proporcional à diferença entre a velocidade de eixo e a velocidade de referência;
- Porta Lógica OU - Impõe na saída o sinal de entrada que estiver em mais baixo nível de tensão.
- Comparador - Pela comparação entre um nível contínuo e uma onda triangular estabelece a razão cíclica do pulsador.

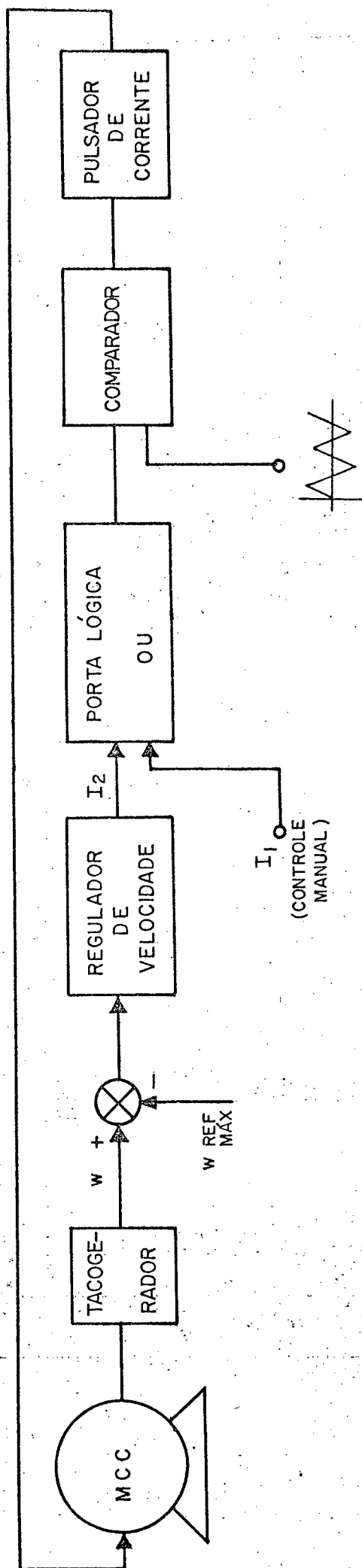


Figura 4.3 - Diagrama de blocos do limitador de velocidade.

4.3.1 - Circuito utilizado

O circuito mostrado na Fig. 4.4 foi implementado em laboratório e corresponde ao diagrama de blocos da Fig. 4.3.

4.3.2 - Desempenho do Limitador de Velocidade

O desempenho da associação entre um servomotor e o limitador de velocidade foi observado apenas no 1º quadrante. O servomotor possui as características de placa citadas no item 3.6.

Como resultado obteve-se uma faixa de variação de velocidade bastante ampla: desde próxima a zero até a velocidade nominal. Além disto, constância na resposta em regime permanente e rapidez de resposta em situações transitórias, já que o limitador acrescenta apenas um pólo (filtro de tensão do tacogerador).

4.4 - Resultados experimentais obtidos com o Limitador de Velocidade

Utilizando o servomotor citado, foram levantadas as curvas de tensão máxima e mínima nos capacitores, e do tempo de aplicação de tensão inversa nos tiristores do pulsador em função da velocidade de eixo, com o mesmo sem carga.

Também foram realizadas fotografias das principais formas de onda, com o rotor da máquina parado e com velocidade nominal.

4.4.1 - Curvas de Tensão máxima e mínima nos Capacitores em função da Velocidade de Eixo

As medidas de tensão foram feitas em osciloscópio ligado aos terminais dos capacitores do pulsador. Utilizou-se dois capacitores ($15\mu\text{F}$, $9\mu\text{F}$) em série, resultando em um capacitor equivalente de $5,6\mu\text{F}(\pm 10\%)$.

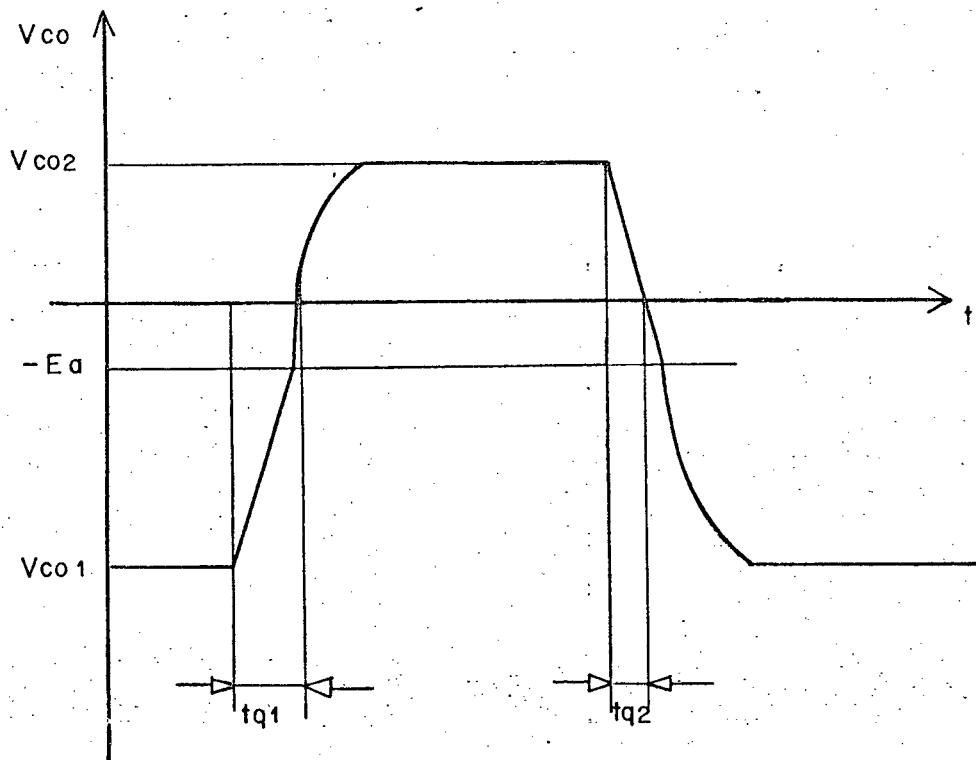


Figura 4.5 - Tensão nos capacitores do pulsador.

Na Fig. 4.5 está representada a forma de onda nos capacitores do pulsador, de onde se levantou as curvas da Fig. 4.6.

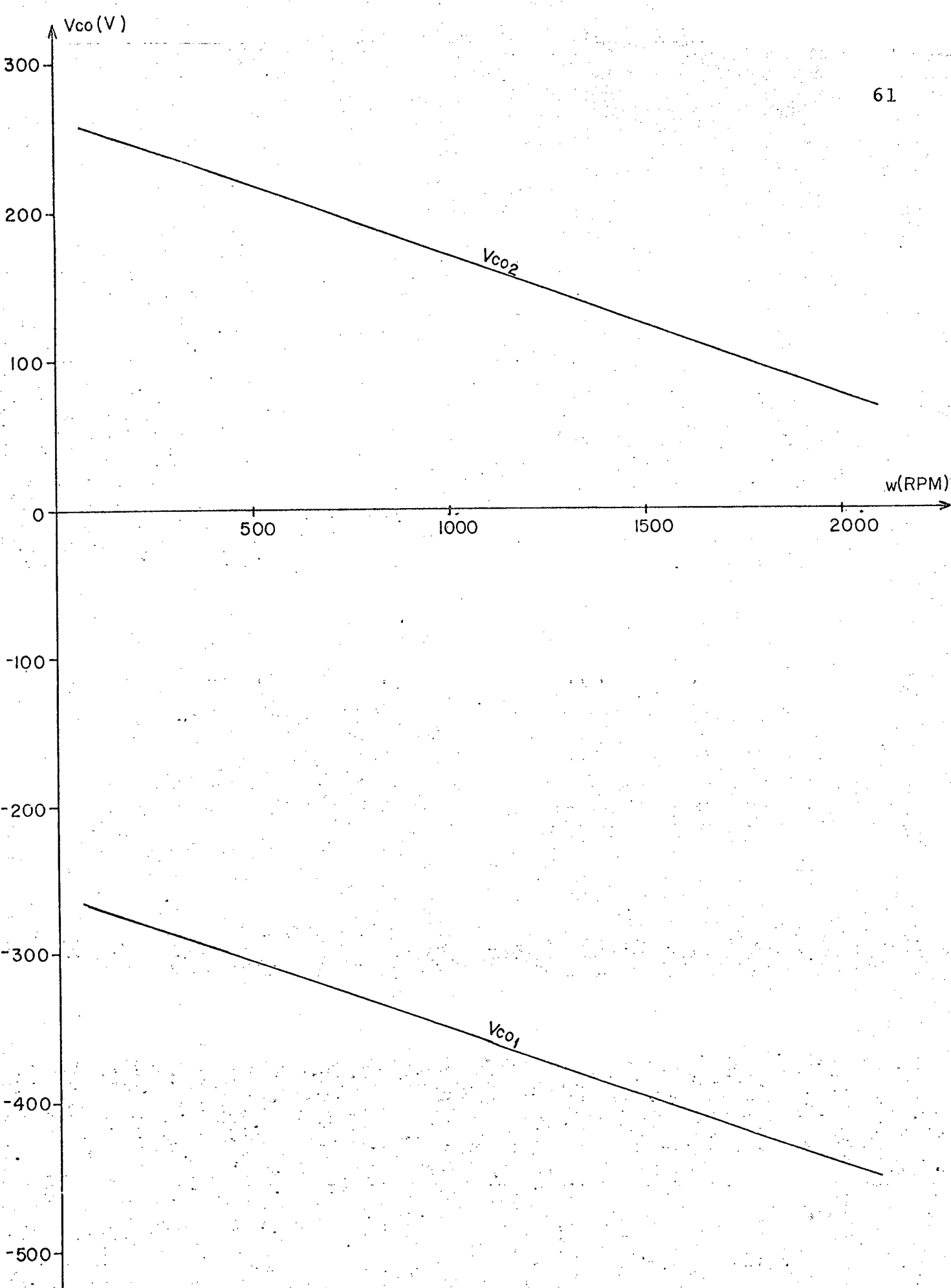


Figura 4.6 - Tensão máxima e mínima nos capacitores.

Nestas curvas observa-se que à medida que a velocidade aumenta, a tensão máxima (V_{co2}) e a mínima (V_{co1}) nos capacitores diminui, sendo esta diminuição proporcional ao aumento da f.c.e.m. E_a , que por sua vez é proporcional à velocidade de eixo ω_m ($E_a = K_e \omega_m$). Ver Fig. 4.6.

Este ensaio foi realizado com uma corrente $I = 6A$, com o servomotor à vazio, e com uma indutância externa de filtração de 800 mH.

4.4.2 - Curvas de tempo de aplicação de tensão inversa sobre os Tiristores

Estas curvas foram obtidas sob as mesmas condições com a qual se realizou o ensaio anterior.

As formas de onda são as apresentadas na Fig. 4.7.

Na Fig. 4.8 estão representadas as curvas do tempo de aplicação de tensão inversa (t_{q1} e t_{q2}) em função da velocidade rotórica. Considerando que a corrente contínua I que alimenta o pulsador apresenta ondulações (conforme foi visto no Capítulo 3), então o tempo t_q também sofre variações. Devido a isto, as curvas da Fig. 4.8 mostram as faixas que limitam estas variações.

Para altas velocidades o tempo t_{q2} tende a ficar cada vez menor, e em 2000 RPM, $t_{q2} \cong 50\mu\text{seg}$. Por este motivo, existe a necessidade da utilização de tiristores rápidos (com $t_q = 15\mu\text{seg}$).

Surge aí a principal importância em se considerar a ondulação da corrente I , pois trabalhando com uma corrente de

$I = 6A$, as expressões analíticas indicam que t_{q2} (2090RPM) = $111\mu\text{seg}$, fato não confirmado experimentalmente. Na realidade o tempo que se obtém para esta velocidade é $50\mu\text{seg} < t_q < 60\mu\text{seg}$, que teoricamente corresponderia a uma corrente de $I = 4,5A$.

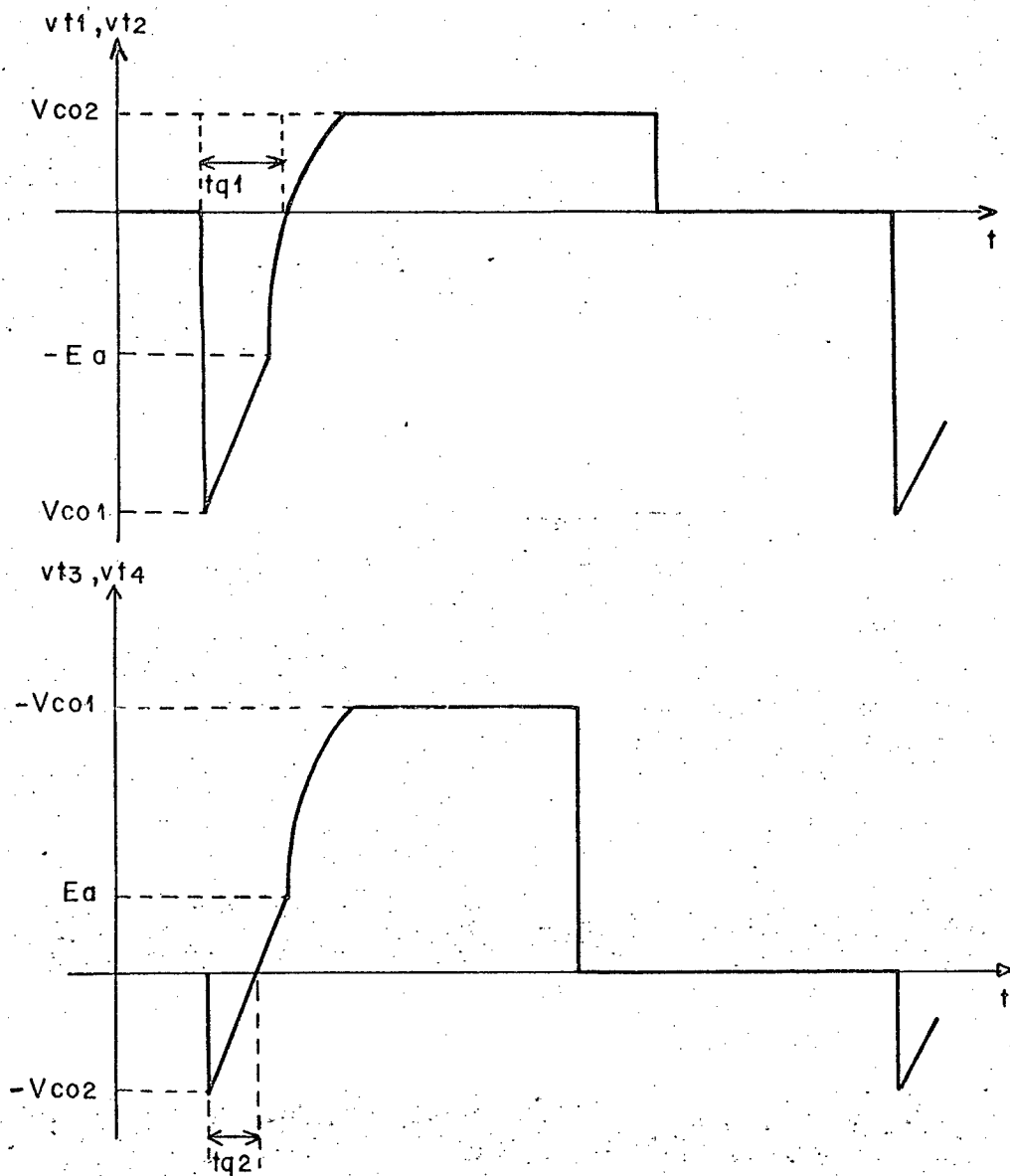


Figura 4.7 - Tensão sobre os tiristores do pulsador.

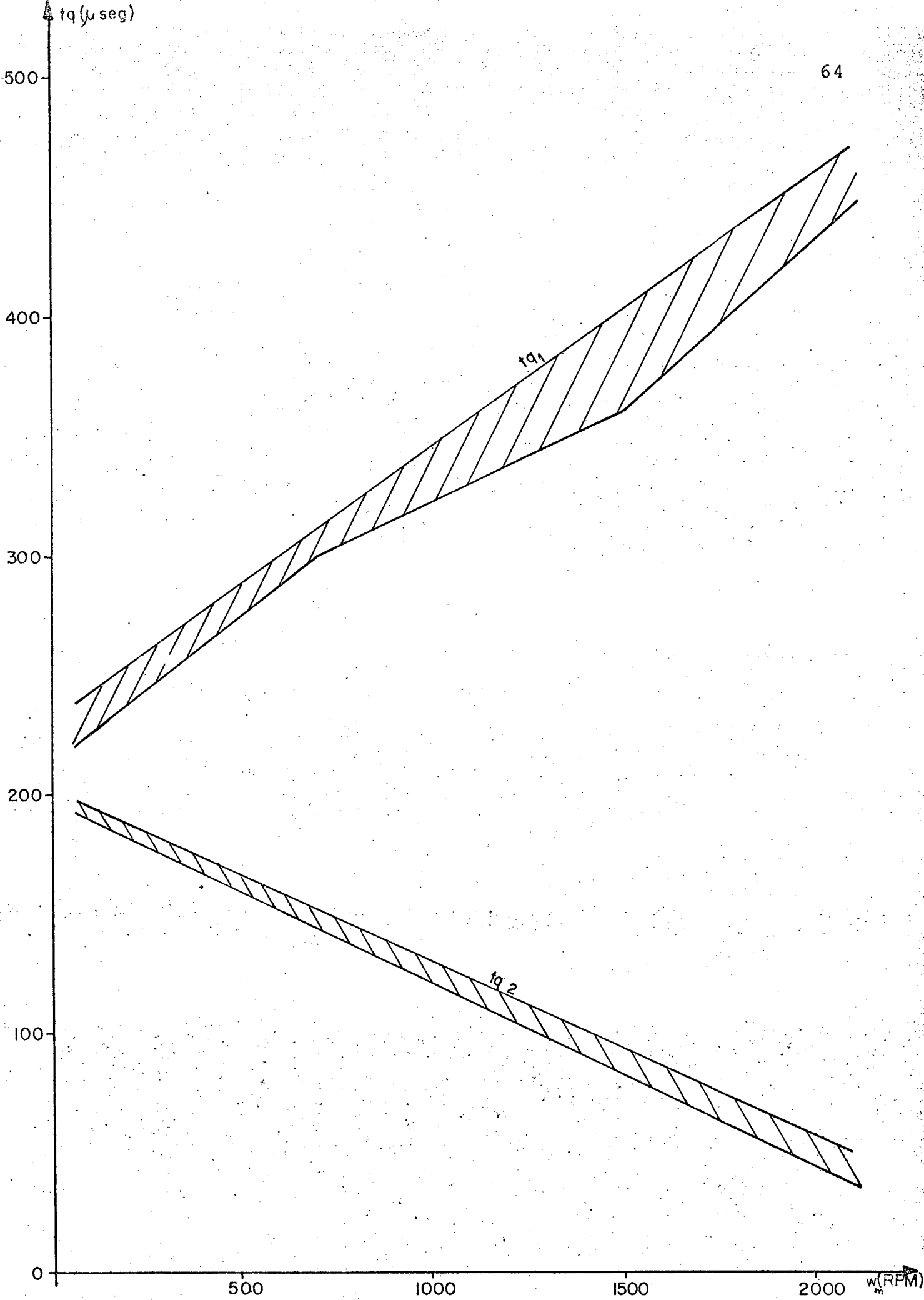


Figura 4.8 - Tempo de aplicação de tensão inversa sobre os tiristores do pulsador de corrente.

Assim sendo, a ondulação da corrente da fonte de alimentação está diretamente relacionada com o dimensionamento dos tiristores, pois interfere no tempo mínimo de aplicação de tensão inversa (t_q), fator importante a ser considerado em projetos.

Em baixas velocidades existe uma maior influência da queda de tensão nas escovas do servomotor. Isto pode ser visto na curva de t_{q1} , onde para valores de velocidades menores que 500 RPM, E_a é menor que a variação de tensão provocada pelas escovas ($E_a < 40$). Por este motivo t_{q1} é menor que $\sqrt{2LC}$.

4.5 - Principais Formas de Onda obtidas experimentalmente

Estas formas de onda correspondem a duas situações diferentes de velocidade: com razão cíclica $\rho = 0,5$, $\omega_m = 0$; e com $\rho \neq 0,5$, $\omega_m = \omega_{\text{nominal}}$. Foram obtidas por meio de um osciloscópio. $I = 6A$, $C = 5,6\mu F$ e $L_{\text{ext}} = 800 \text{ mH}$.

4.5.1 - Razão cíclica $\rho = 0,5$ e $\omega_m = 0$

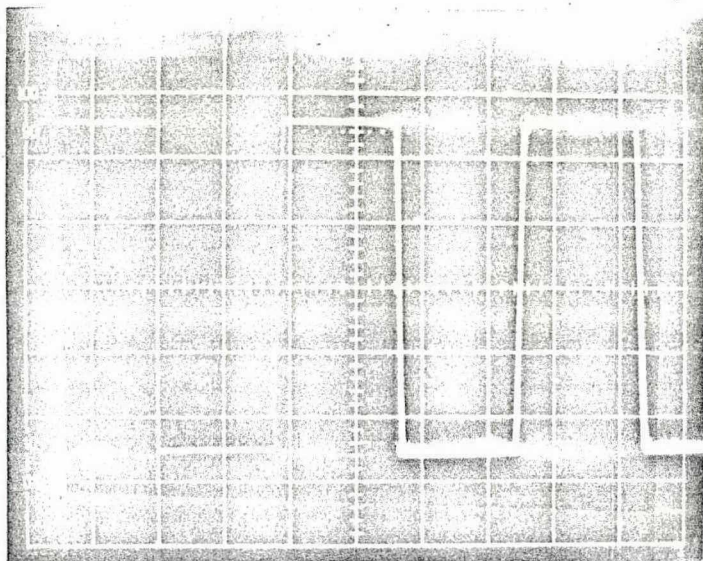
Por ser a razão cíclica $\rho = 0,5$ a f.c.e.m. $E_a = 0$, e V_{co1} possui a mesma amplitude que V_{co2} .

Na foto da Fig. 4.9 pode-se ver as seqüências de funcionamento. Na primeira seqüência o capacitor está carregado com uma tensão V_{co1} , que na segunda seqüência cresce linearmente até zero, senoidalmente até V_{co2} , permanecendo neste valor durante toda a quarta seqüência. Decresce linearmente até zero, senoi

dalmente até V_{co1} , completando assim um período completo.

Com esta foto existe a confirmação da forma de on da prevista teoricamente.

- Tensão nos capacitores:



ESCALAS

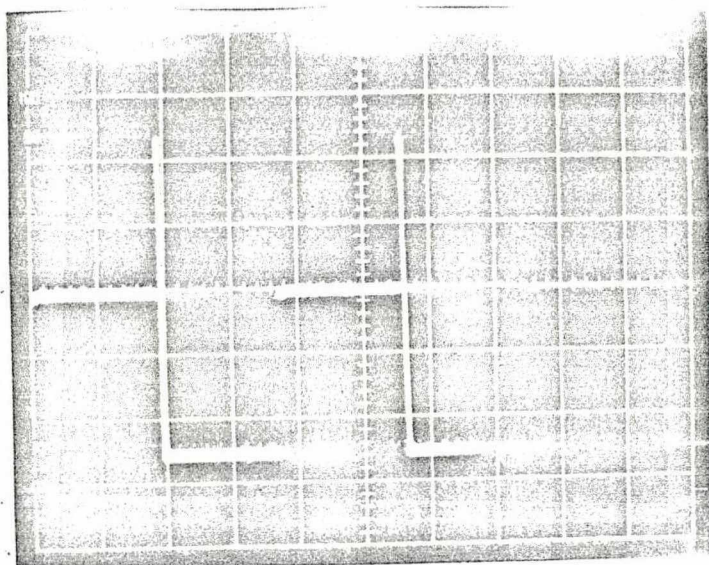
TEMPO: 5mseg/div

AMPLITUDE: 100V/div

Figura 4.9 - Tensão nos capacitores do pulsador.

- Tensão nos tiristores do pulsador e tempo de aplicação de tensão inversa:

Como a razão cíclica é $\rho = 0,5$, a forma de onda em todos os tiristores é a mesma, e isto está registrado na foto da Fig. 4.10.



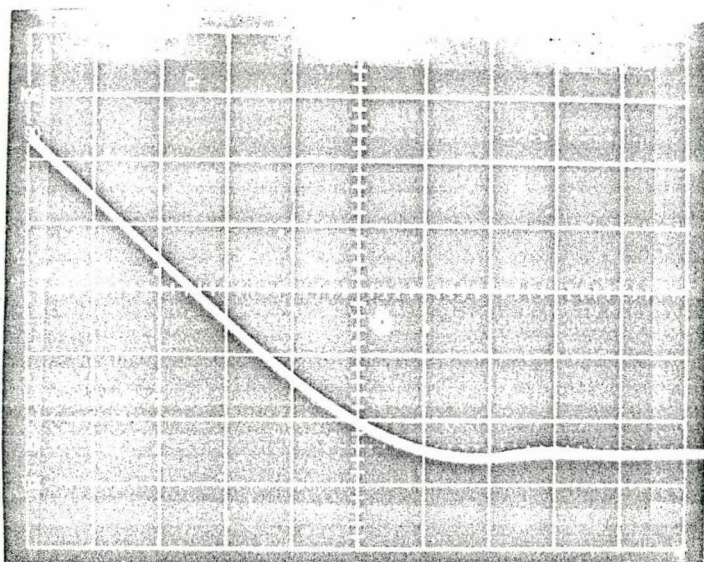
ESCALAS

TEMPO: 5 mseg/div

AMPLITUDE: 100V/div

Figura 4.10 - Tensão nos tiristores do pulsador.

Inicialmente, enquanto os tiristores T_1 e T_2 estão conduzindo, a tensão em seus terminais é próxima a zero. Quando tiristores T_3 e T_4 são disparados, a tensão dos capacitores é aplicada inversamente em seus terminais, até que T_1 e T_2 sejam disparados novamente.



ESCALAS

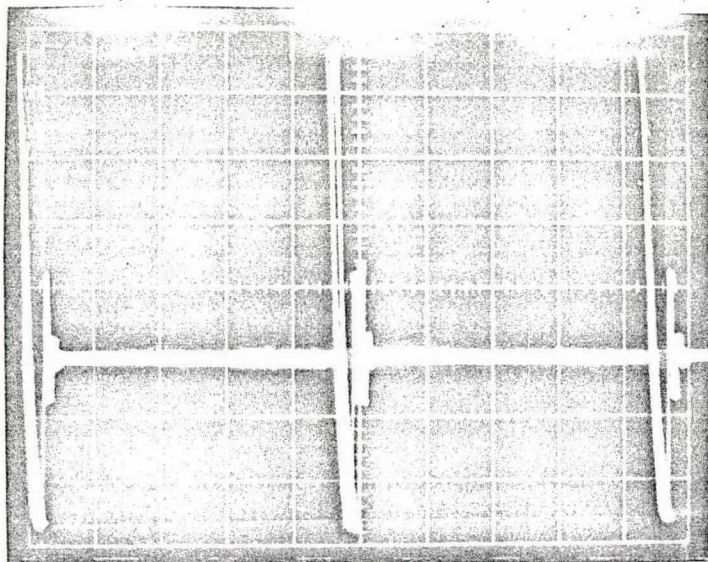
TEMPO: 0,1 mseg/div

AMPLITUDE: 100V/div

Figura 4.11 - Tempo de aplicação de tensão inversa t_q .

Na Fig. 4.11 a escala de tempo da Fig. 4.10 foi ampliada e o tempo de aplicação de tensão inversa pode ser observado com mais detalhes. É o tempo compreendido entre o valor máximo da curva e o ponto por onde passa pela abcissa zero.

- Tensão nos terminais de entrada do pulsador:



ESCALA

TEMPO: 2mseg/div

AMPLITUDE: 100V/div

OBS: Abcissa deslocada 1 divisão para baixo.

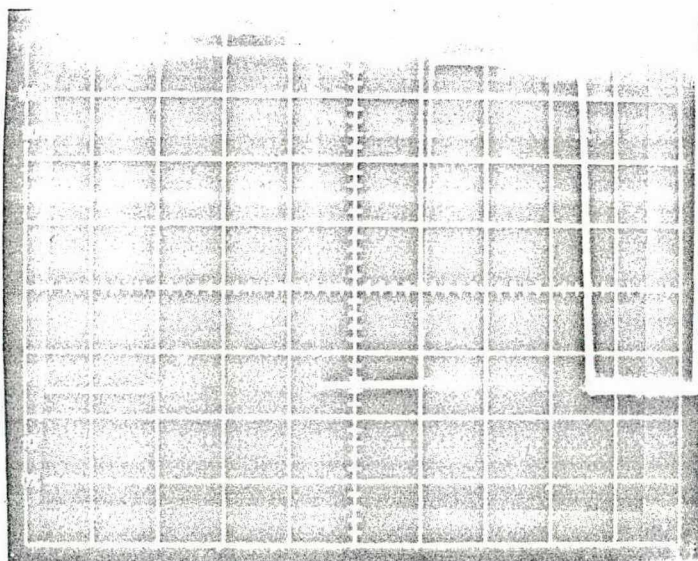
Figura 4.12 - Tensão na entrada do pulsador.

Como a velocidade do servomotor é nula, a f.c.e.m. $E_a = 0$. A tensão decresce linearmente desde $-2V_{co1}$ até zero, depois decresce senoidalmente até $-V_{co2}$. Retorna a zero e permanece até que haja a mudança da quarta para a quinta seqüência. Neste instante a tensão assume o valor de $2V_{co2}$, decresce linearmente até zero, depois senoidalmente até V_{co1} . Quando atinge este valor cai a zero, passando por um período transitório, completando assim um período completo.

4.5.2 - Razão cíclica $\rho \neq 0,5$ e $\omega_m = \text{nominal}$

Nesta situação, a regulagem do limitador de velocidade foi variada a fim de se conseguir uma velocidade de eixo da máquina igual à nominal. Com isto depois de entrar em regime permanente, sem carga, observa-se que a razão cíclica é $\rho \neq 0,5$, já que é necessário haver um torque suficiente para suprir as perdas mecânicas rotacionais. No caso em que exista um torque de carga T_c aplicado ao eixo, a razão cíclica tenderá a ser maior, de modo que a corrente média fornecida à máquina seja ainda maior, e o torque elétrico também.

- Tensão nos capacitores:



ESCALA

TEMPO: 5mseg/div

AMPLITUDE: 100V/div

OBS: Abcissa deslocada 1 divisão para baixo.

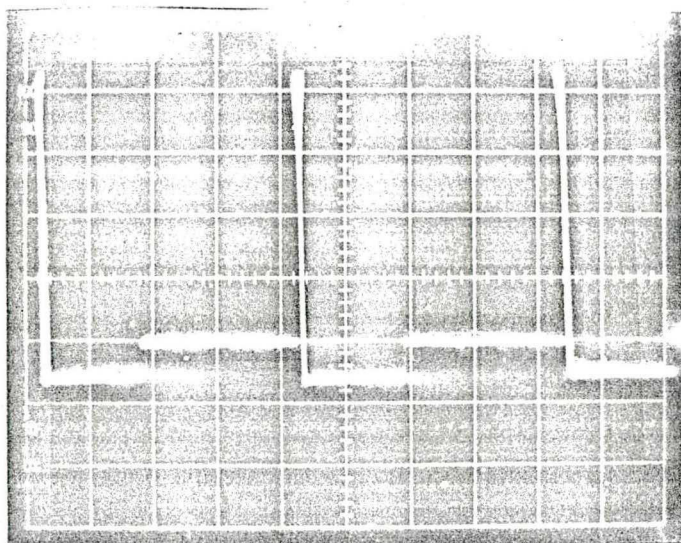
Figura 4.13 - Tensão nos capacitores do pulsador.
($\omega_m = 2090\text{RPM}$)

Comparando a forma de onda de tensão deste caso com a forma de onda da Fig. 4.9, nota-se que a razão cíclica foi va

riada, e que a amplitude de V_{co1} é diferente da amplitude de V_{co2} , pois a tensão está acrescida da f.c.e.m. E_a , que neste caso vale $E_a \approx 162V$ - correspondente a 2090 RPM.

- Tensão nos tiristores e tempo de aplicação de tensão inversa:

Estando a velocidade em seu valor nominal, e com o aumento da f.c.e.m. E_a , haverá também uma variação nos tempos de aplicação de tensão inversa sobre os tiristores. Em um par deles a comutação se dará com facilidade (Fig. 4.14), enquanto que no outro par (Fig. 4.15) isto tenderá a deixar a comutação cada vez mais crítica, ou seja, com um t_q cada vez menor. Por este motivo, a velocidade máxima deve ser observada.



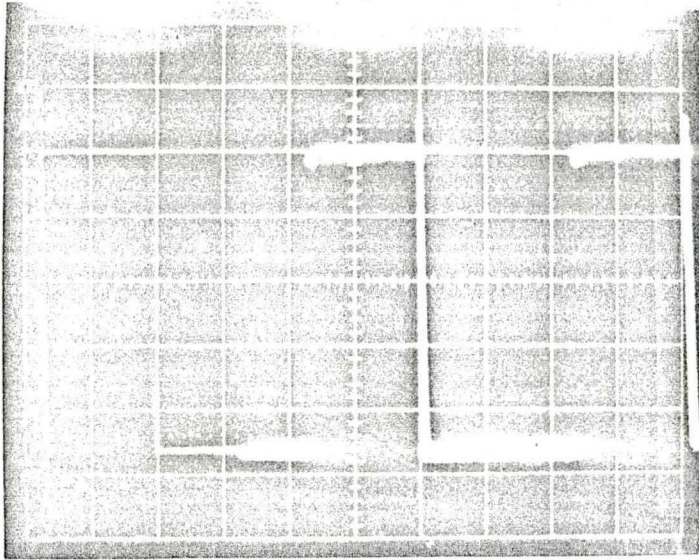
ESCALA

TEMPO: 5 mseg/div

AMPLITUDE: 100V/div

OBS: Abcissa deslocada 1 divisão para baixo.

Figura 4.14 - Tensão em um par de tiristores do pulsador.

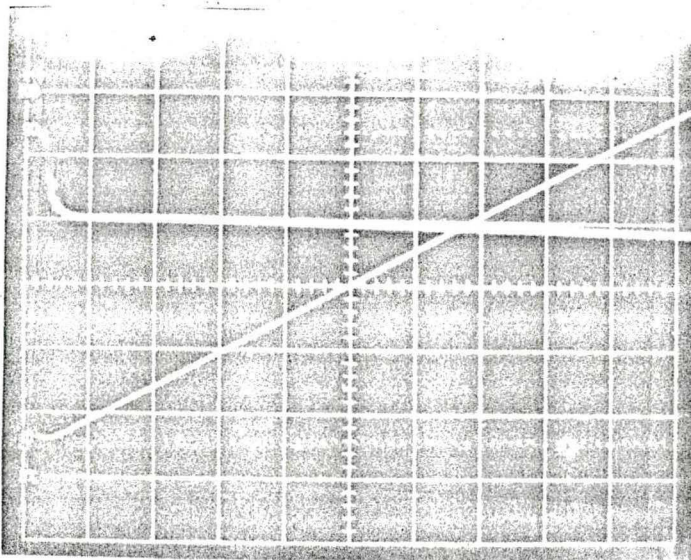
ESCALA

TEMPO: 5mseg/div
 AMPLITUDE: 100V/div

OBS: Abcissa deslocada 2 divisões para cima.

Figura 4.15 - Tensão no outro par de tiristores do pulsador.

Para o caso da Fig. 4.15, o tempo de aplicação de tensão inversa é ampliado e registrado na foto da Fig. 4.16, e pode ser identificado como o tempo transcorrido desde o instante em que a tensão é -44 V até o instante em que é aproximadamente zero.

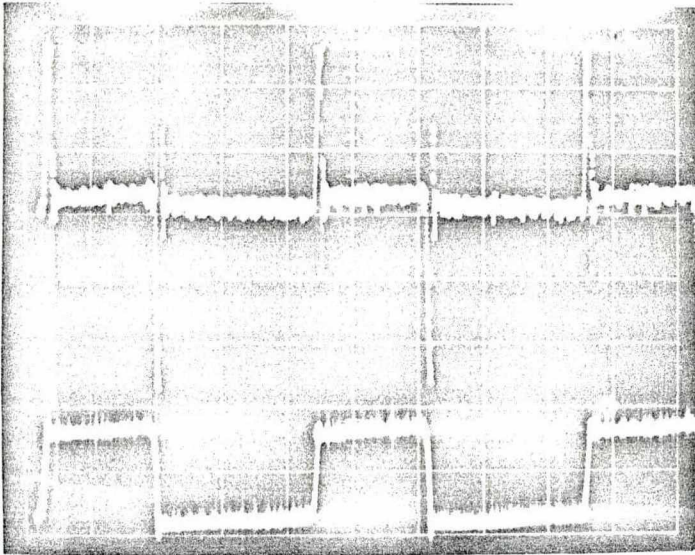
ESCALA

TEMPO: 10μseg/div
 AMPLITUDE: 20V/div

Figura 4.16 - Tempo de aplicação de tensão inversa.

- Tensão de armadura v_a e corrente de armadura i_a :

Na foto representada na Fig. 4.17 pode ser vista a forma de onda de tensão obtida nos terminais do servomotor e da forma de onda da corrente sobre uma resistência de $0,012\Omega$.



ESCALA

TEMPO: 5mseg/div

v_a AMPLITUDE: 100V/div

TEMPO: 5mseg/div

i_a AMPLITUDE: 100mV/div

Figura 4.17 - Tensão de armadura (Abcissa deslocada 3 divisões para cima).
Corrente de armadura (Abcissa deslocada 3 divisões para baixo).

A tensão de armadura possui neste caso um valor médio de aproximadamente $-160V$. Pode-se observar a influência da resistência de armadura, dos picos de tensão provenientes das variações bruscas de correntes sobre o indutor de armadura L_a , e ainda, a queda de tensão nas escovas, que variam intensamente de acordo com a velocidade rotórica (aproximadamente $40V$ neste caso).

A forma de onda da corrente de armadura produzida pelo pulsador de corrente apresenta razão cíclica diferente de $0,5$ e deste modo corrente média I_a diferente de zero.

4.6 - Conclusão

Neste capítulo desenvolveu-se a parte experimental com a qual se pretendia observar o comportamento do servomotor alimentado pelo pulsador de corrente. Para tanto, foi necessária a implementação de um circuito que permitisse a variação da razão cíclica da corrente de armadura. Primeiramente elaborou-se um circuito com controle manual, e posteriormente outro com controle automático, de modo que o acoplamento destes ao conversor resultou na criação de um pulsador de corrente.

A partir disto, verificou-se o desempenho da associação entre o pulsador e um servomotor, e como resultado obteve-se a confirmação do princípio fundamental ao qual se propõe este trabalho.

A frequência de operação do pulsador de corrente é 57 Hz.

CAPÍTULO 5

ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA EM QUATRO QUADRANTES - ESTUDO EXPERIMENTAL

5.1 - Introdução

A partir dos conhecimentos obtidos no capítulo anterior, onde foi estudada a associação entre o pulsador de corrente e a máquina de corrente contínua no 1º quadrante, será possível neste capítulo, ampliar este estudo aos quatro quadrantes do plano $T_e \times \omega_m$.

Serão utilizados novos circuitos de controle de velocidade, e com eles levantadas curvas que evidenciam o funcionamento em regime permanente e transitório nos referidos quadrantes.

5.2 - Fonte de Alimentação de Corrente Contínua

Para que se possa realizar a operação nos quatro quadrantes, faz-se necessário utilizar como fonte de alimentação um conversor que permita o fluxo de potência nos dois sentidos entre a rede e a carga, isto é, que seja reversível em tensão.

Assim sendo, utilizou-se uma ponte retificadora monofásica com quatro tiristores.

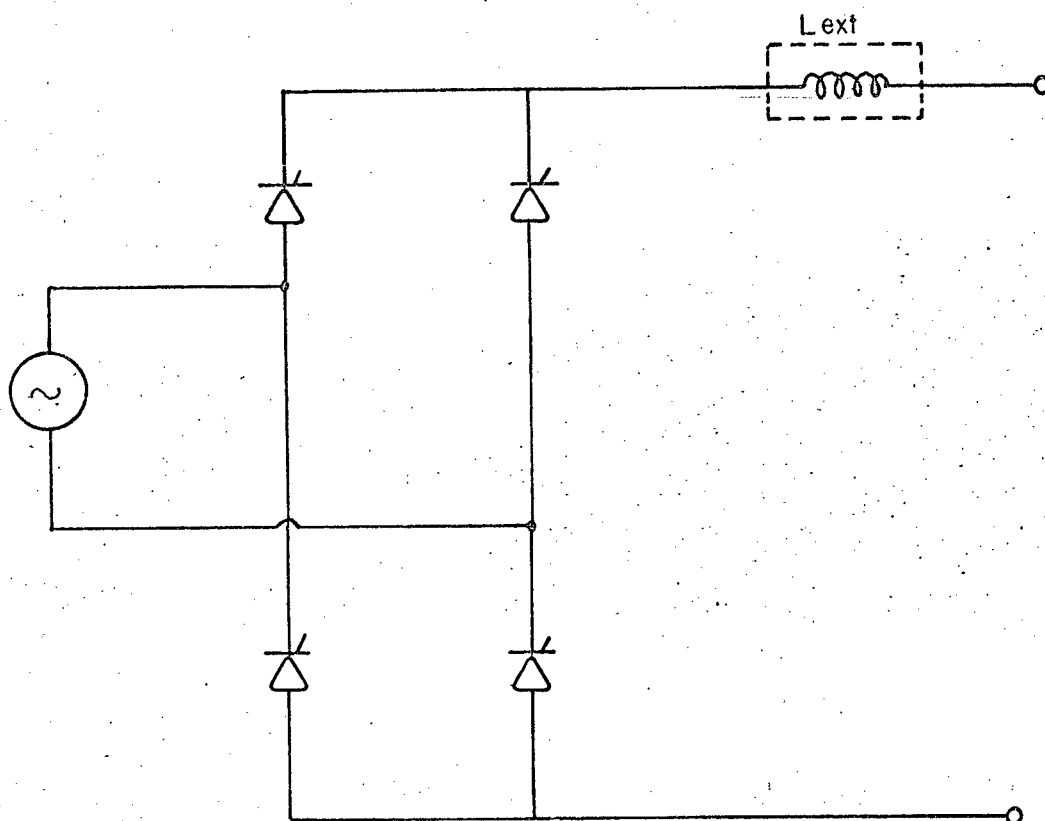


Figura 5.1 - Ponte retificadora monofásica com quatro tiristores.

5.3 - Controle da Velocidade

O controle da velocidade será feito a partir da comparação entre o valor de tensão de referência, imposto externamente e um valor de tensão proporcional à velocidade mecânica do eixo, conseguido através do uso de tacogerador.

Esta tensão produzida pelo tacogerador, necessita normalmente passar por um filtro que retire os ruídos provenientes da comutação.

Devido a isto, primeiramente será observada a influência da utilização deste filtro de tensão na malha de reali

mentação de velocidade, sendo que a regulação da mesma será feita por meio de um controlador proporcional.

A máquina de corrente contínua a ser utilizada neste ensaio possui como características:

$$\begin{array}{lll}
 V_a = 240V; & \omega_{\text{nom}} = 3500\text{RPM}; & 3\text{HP} \\
 I_a = 11,5A; & I_f = 0,54A; & K_e = 0,562 \\
 R_a = 3,14\Omega; & R_f = 348\Omega; & L_a = 16,7\text{mH} \\
 J = 0,024\text{Nmseg}^2; & D = 0,0020\text{Nmseg}; &
 \end{array}$$

5.3.1 - Controle proporcional

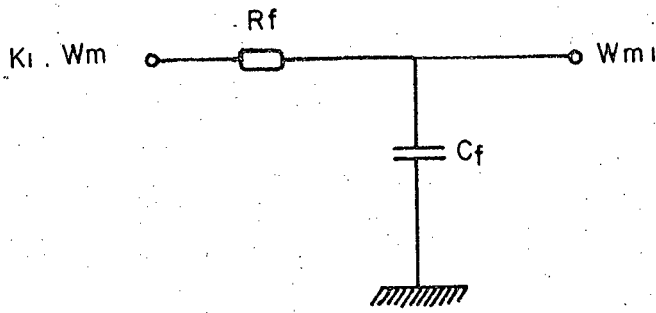
a - Diagrama de Blocos - Estudo Analítico:

A malha de realimentação pode ser modelada através do diagrama de blocos da Fig. 5.2

O sistema mecânico pode ser representado por:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m = T_e \quad (5.1)$$

O filtro será aproximado por um sistema de 1ª ordem:



$$A \frac{d\omega_{m1}}{dt} + B \omega_{m1} = K_1 \omega_m \quad (5.2)$$

onde:
 $A = R_f C_f$
 $B = 1$

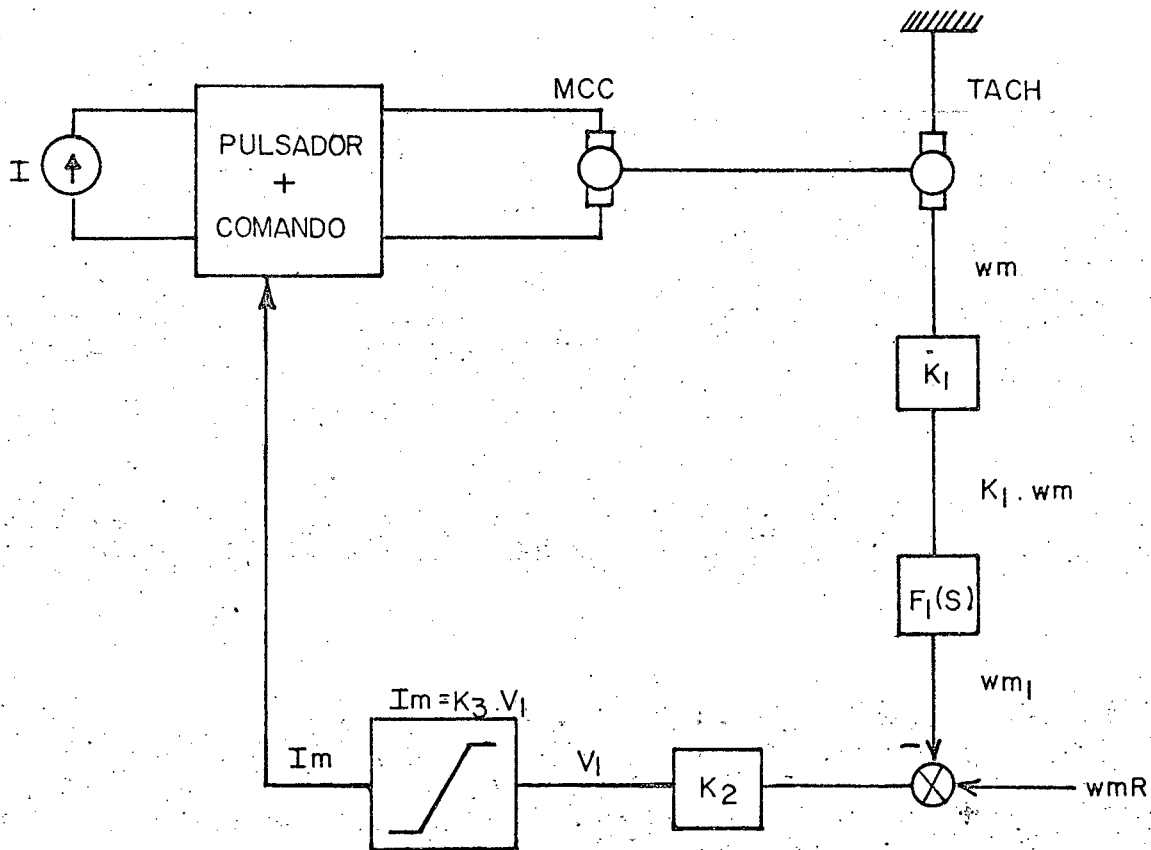


Figura 5.2 - Diagrama de Blocos da malha de realimentação de velocidade.

O torque elétrico é dado por:

$$T_e = K I_m \quad (5.3)$$

Sendo:

$$V_1 = K_2 \varepsilon \quad (5.4)$$

$$I_m = K_3 V_1 \quad (5.5)$$

A combinação das expressões anteriores resulta na expressão (5.6) que descreve a malha de realimentação.

$$\frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + K_4 \frac{d\omega_m}{dt} + K_5 \omega_m = K_6 \frac{d\omega_{mR}}{dt} + K_7 \omega_{mR} \quad (5.6)$$

$$K_4 = \frac{D}{J} + \frac{B}{A} \quad ; \quad K_6 = \frac{K K_2 K_3}{J}$$

onde:

$$K_5 = \frac{BD + K K_1 K_2 K_3}{AJ} \quad ; \quad K_7 = \frac{B K K_2 K_3}{AJ}$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\alpha \frac{dy}{dt} + \omega_n y = 0 \quad (5.7)$$

Comparando a expressão 5.6 com a expressão 5.7 resulta:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tau_F} + \frac{1}{\tau_m} \right] \quad (5.8)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{\tau_m} \left(\frac{K K_1 K_2 K_3}{AD} + \frac{1}{\tau_F} \right)} \quad (5.9)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tau_F} + \frac{1}{\tau_m} \right] \sqrt{\frac{AD \tau_F \tau_m}{AD + K K_1 K_2 K_3 \tau_F}} \quad (5.10)$$

onde:

$$\tau_m = \frac{J}{D} = \text{Constante de tempo mecânica}$$

$$\tau_F = \frac{A}{B} = \text{Constante de tempo do filtro}$$

$$\alpha = \text{Coeficiente de amortecimento}$$

$$\omega_n = \text{Frequência natural não amortecida}$$

$$\xi = \text{Razão de amortecimento}$$

Das expressões (5.9) e (5.10) pode-se obter:

$$K_2 = \frac{A J \omega_n^2 - B D}{K K_1 K_3} \quad (5.11)$$

$$K_2 = \frac{1}{K K_1 K_3} \left[\frac{(B J + A D)^2}{4 A J \xi^2} - B D \right] \quad (5.12)$$

Estas expressões têm por objetivo dimensionar os resistores do regulador de velocidade.

A expressão (5.11) fornece K_2 em função de ω_n , e a expressão (5.12) fornece K_2 em função de ξ .

Assim sendo, se o projetista escolher uma frequência natural ω_n , a constante K_2 pode ser obtida a partir da expressão (5.11). Como ξ é dependente de K_2 , será obtido pela expressão (5.10).

Situação análoga acontece se o projetista escolher a razão de amortecimento como ponto de partida. E o projeto finaliza quando for determinado um K_2 que forneça ω_n e ξ dentro de limites aceitáveis.

b - Circuito implementado:

Na Fig. 5.3 está representado o circuito implementado em laboratório.

A regulação de velocidade é feita por um controlador proporcional.

O filtro da tensão proveniente do tacogerador é constituído de duas unidades de filtragem: uma que filtra os ruídos de alta frequência e outra que filtra os ruídos de baixa frequência.

c - Resultados experimentais:

Este ensaio será realizado a partir da aplicação de um degrau de velocidade de referência, e com o auxílio de um registrador gráfico será obtida a resposta de velocidade da máquina.

Através deste ensaio poder-se-á determinar o grau de influência do filtro na resposta dinâmica do sistema.

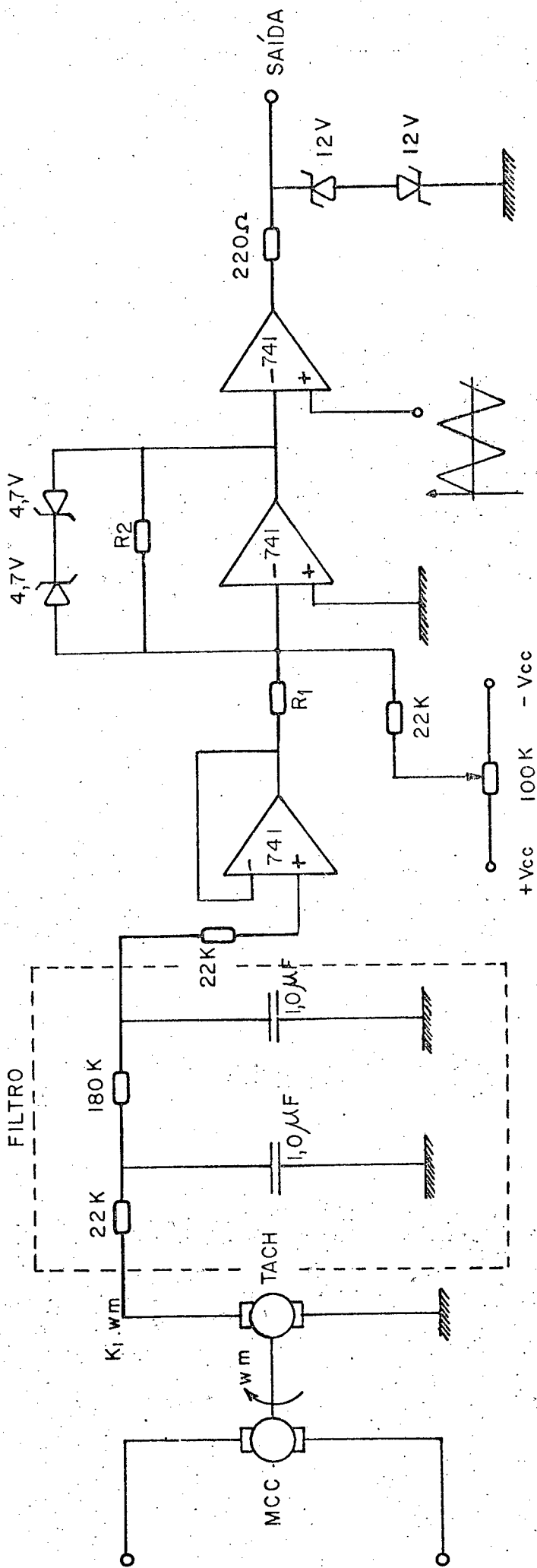
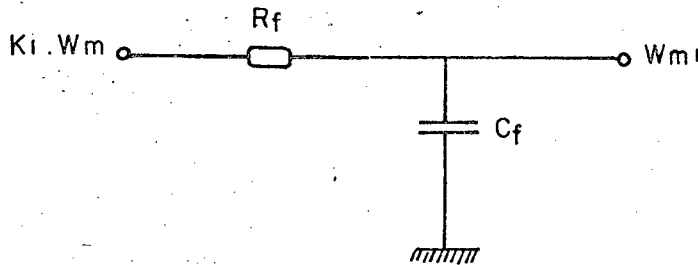


Figura 5.3 - Circuito com controlador proporcional.

São constantes pré-estabelecidas:

$$\begin{aligned} K &= 0,655 & J &= 0,024 \\ K_1 &= \frac{1}{38,75} & D &= 0,0020 \\ K_3 &= 1,17 & B &= 1 \end{aligned}$$

O filtro será aproximado por:



Sendo $R_f = 22\text{k}\Omega$ e $C_f = 1,0\mu\text{F}$, logo $A = 0,022$.

Para a determinação de K_2 , escolhe-se como ponto de partida $\omega_n = 16$. Utilizando a expressão (5.11) resulta:

$$K_2 = 6,73$$

Conseqüentemente, ξ é dado pela expressão (5.10):

$$\xi = 1,42$$

Como:

$$K_2 = \frac{R_2}{R_1} \tag{5.13}$$

Logo se $R_1 = 10\text{k}\Omega$, então $R_2 \cong 68\text{k}\Omega$.

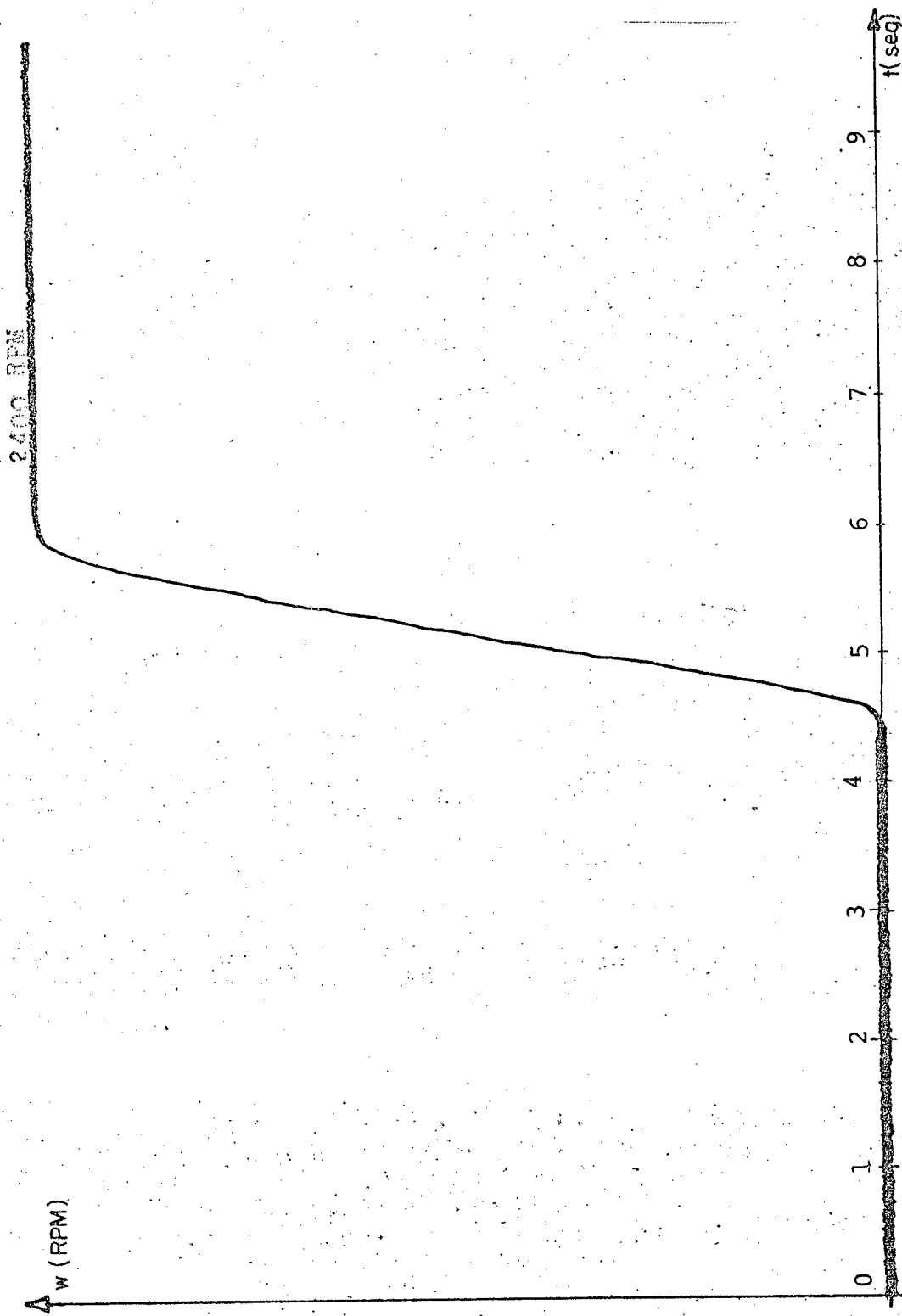


Figura 5.4 - Resposta a um degrau de velocidade, obtido com um registrador gráfico.

$$R_1 = 10k\Omega \text{ e } R_2 = 68k\Omega.$$

Pela Fig. 5.4, observa-se que o sistema comporta-se aproximadamente como um sistema de 1^a ordem, sendo mínima a influência do filtro. Por este motivo será estudado um regulador de velocidade com controle proporcional-integral admitindo que este possa ser aproximado por um sistema de 2^a ordem.

5.3.2 - Controle proporcional-integral

a - Diagrama de blocos - Estudo analítico:

Substituindo o controlador proporcional por um controlador proporcional-integral, e desconsiderando a influência do filtro de tensão do tacogerador resulta na malha de realimentação mostrada na Fig. 5.5.

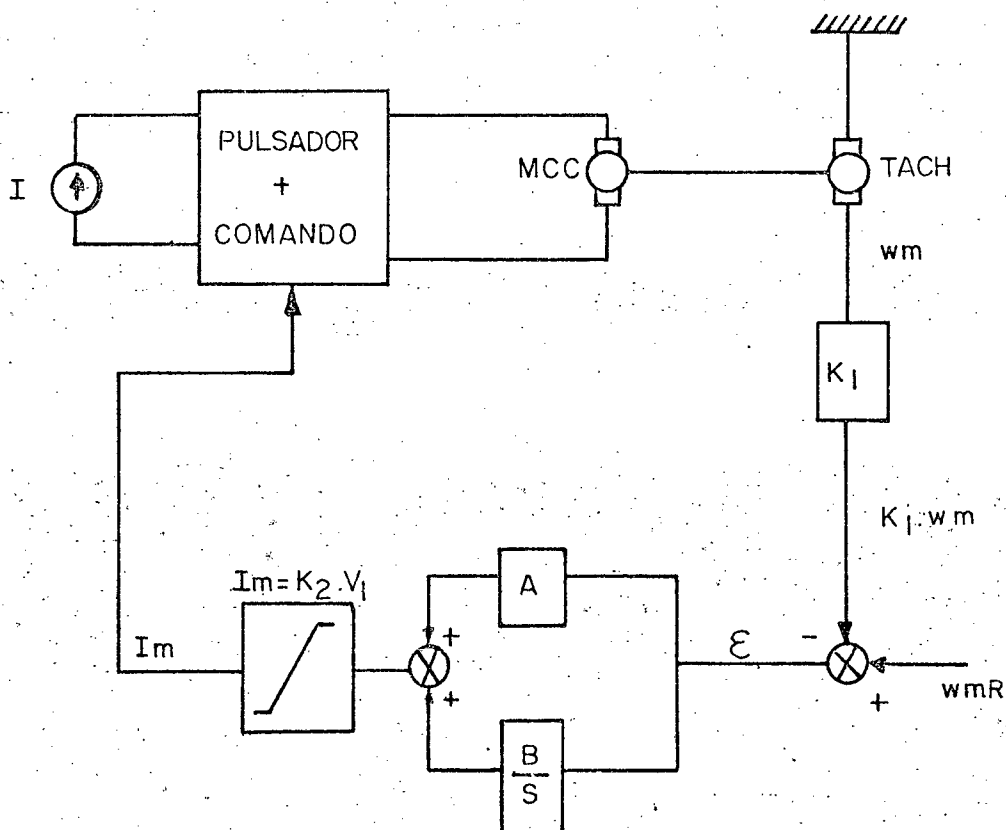


Figura 5.5 - Diagrama de blocos da malha de realimentação de velocidade com controle proporcional-integral.

O sistema mecânico pode ser representado por:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m = T_e \quad (5.14)$$

O filtro não será modelado pois apresentada pouca influência na resposta dinâmica.

O torque elétrico é dado por:

$$T_e = K I_m \quad (5.15)$$

A saída do regulador:

$$V_i = A \epsilon + B \int_0^t \epsilon dt \quad (5.16)$$

A combinação das expressões anteriores fornece a expressão que representa a malha de realimentação.

$$\frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + K_3 \frac{d\omega_m}{dt} + K_4 \omega_m = K_5 \frac{d\omega_{mR}}{dt} + K_6 \omega_{mR} \quad (5.17)$$

$$K_3 = \frac{D + K K_1 K_2 A}{J} ; \quad K_5 = \frac{K K_2 A}{J}$$

onde:

$$K_4 = \frac{K K_1 K_2 B}{J} ; \quad K_6 = \frac{K K_2 B}{J}$$

Comparando com:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\alpha \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 = 0 \quad (5.18)$$

Logo:

$$\alpha = \frac{D + K K_1 K_2 A}{2J} \quad (5.19)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K K_1 K_2 B}{J}} \quad (5.20)$$

$$\xi = \frac{D + K K_1 K_2 A}{\sqrt{4 K K_1 K_2 B J}} \quad (5.21)$$

Sendo que:

$$A = \frac{R_2}{R_1} \quad (5.22)$$

$$B = \frac{1}{R_1 C} \quad (5.23)$$

Assim sendo, o regulador proporcional-integral de velocidade pode ser projetado a partir da escolha pelo usuário, da frequência natural ω_n e da razão de amortecimento ξ que deseje trabalhar, utilizando:

$$R_1 = \frac{1}{C} \frac{K K_1 K_2}{J \omega_n^2} \quad (5.24)$$

$$R_2 = \frac{1}{C} \left[\frac{2\xi}{\omega_n} - \frac{D}{J \omega_n^2} \right] \quad (5.25)$$

desde que o capacitor C seja previamente determinado.

b - Circuito implementado:

Acrescentando o capacitor C na malha de realimentação do regulador de velocidade do circuito da Fig. 5.3 resulta no circuito apresentado na Fig. 5.6. Com este circuito consegue-se implementar o controle proporcional-integral de velocidade.

c - Resultados Experimentais:

Utilizando a mesma máquina de corrente contínua, mas agora com o controle proporcional-integral, e sendo:

$$\begin{aligned} K &= 0,655 & J &= 0,024 \text{ Nm seg}^2 \\ K_1 &= \frac{1}{38,75} & D &= 0,0020 \text{ Nm seg} \\ K_2 &= 1,17 \end{aligned}$$

Escolhendo:

$$\begin{aligned} \omega_n &= 2,2 \\ \xi &= 1,0 \\ C &= 11 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Pelas expressões 5.24 e 5.25, obtém-se:

$$\begin{aligned} R_1 &\cong 15 \text{ k}\Omega \\ R_2 &\cong 82 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

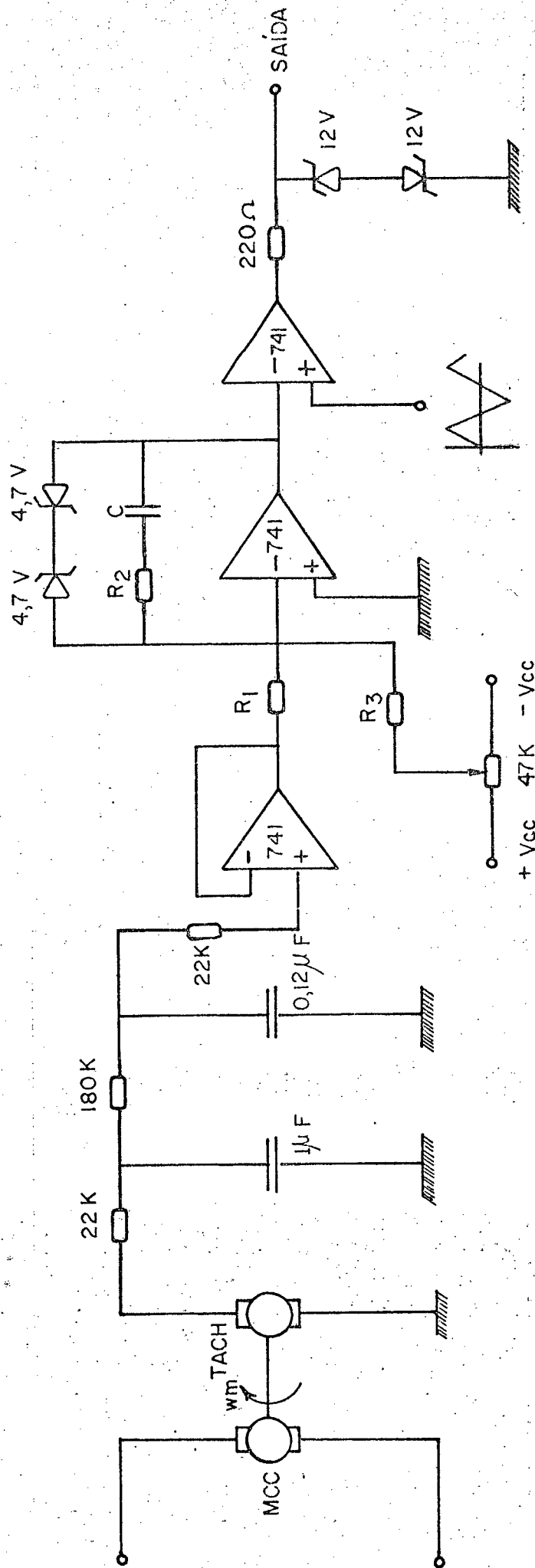


Figura 5.6 - Malha de realimentação de velocidade com um controlador proporcional-integral.

Na Figura 5.7 está representada a resposta do sistema a uma entrada de degrau de tensão.

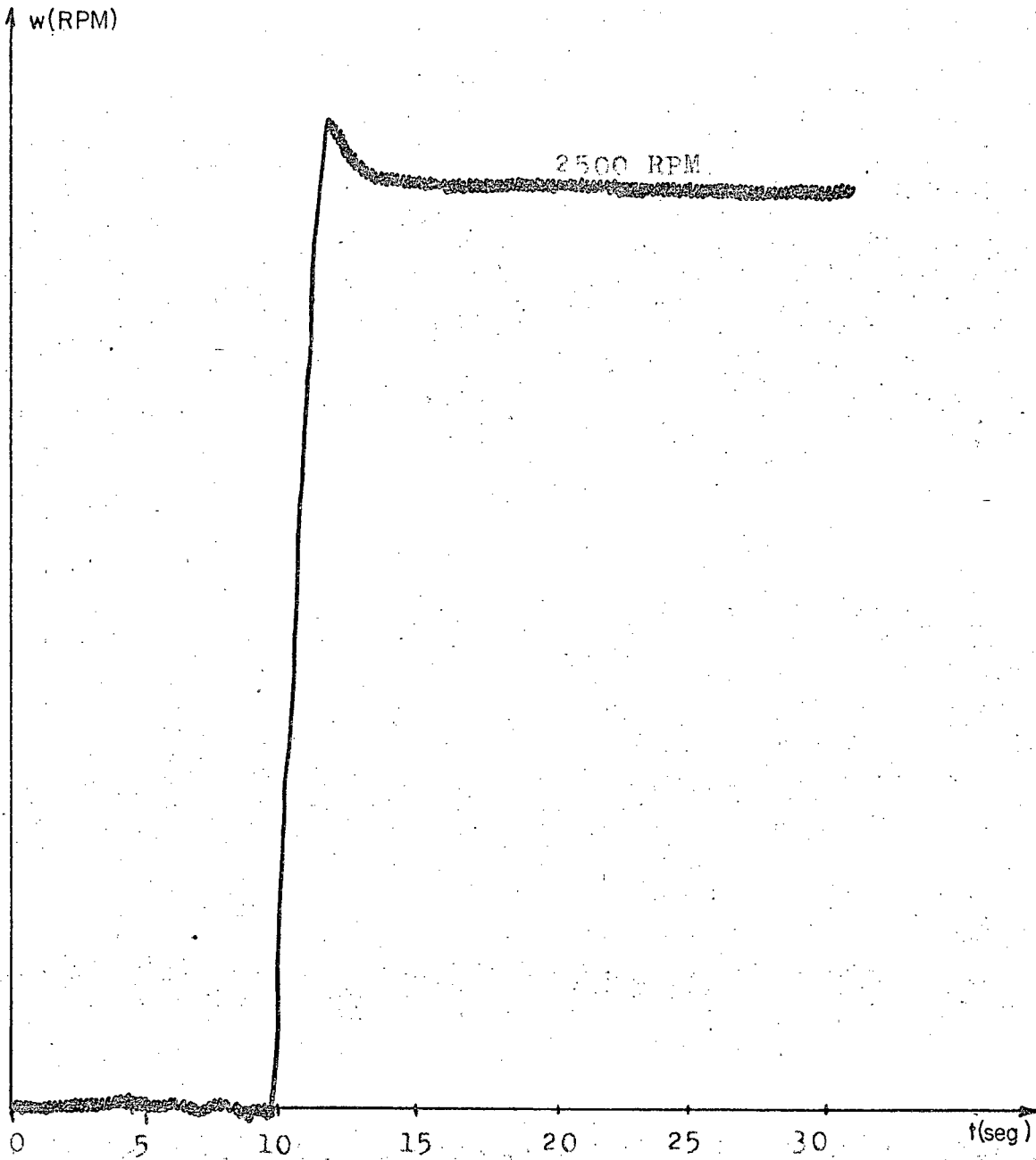


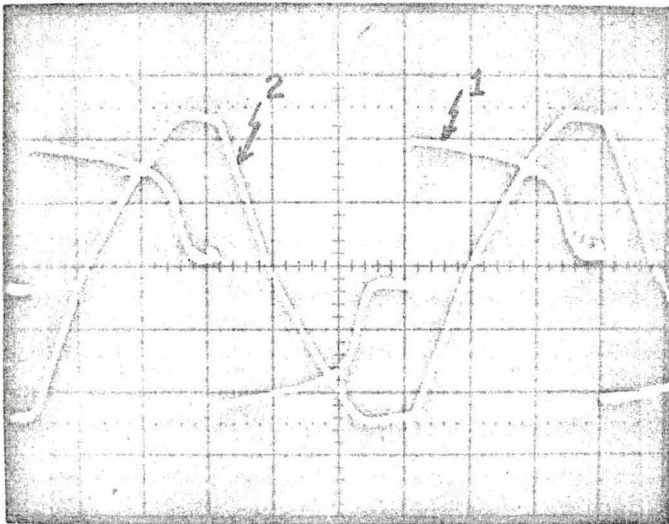
Figura 5.7 - Resposta a um degrau de tensão em uma malha com controle proporcional-integral.

5.4 - Acionamento em quatro quadrantes

Utilizando a malha de realimentação com o controla

dor proporcional-integral do item anterior, mas tendo um gerador de onda quadrada com frequência fixa ligado ao terminal da tensão de referência ω_{mR} , foi registrado através de fotografia o comportamento em quatro quadrantes da máquina.

Para isto foi necessária a utilização de um osciloscópio com memória e a foto obtida está representada na Fig. 5.8.



ESCALA

TEMPO: 1seg/div

AMPLITUDE: $\left\{ \begin{array}{l} \text{N}^\circ 1: 2,3 \text{ A/div} \\ \text{N}^\circ 2: 740\text{RPM/div} \end{array} \right.$

Figura 5.8 - Acionamento em quatro quadrantes.

Curva n^o 1 - Corrente de armadura média I_a .

Curva n^o 2 - Velocidade ω_m .

A corrente da alimentação neste ensaio foi de $I = 7A$.

Na tabela da Fig. 5.9 está resumido o funcionamento em quatro quadrantes, tendo como referência a escala de tempo.

Em funcionamento no 2^o ou 4^o quadrante a máquina de corrente contínua devolve à rede a energia cinética armazenada no eixo, e a ponte retificadora com quatro tiristores funciona como inversor.

TEMPO (seg)	CORRENTE Fa	VELOCIDADE wm	QUADRANTE
0,3 a 1,2	POSITIVA	NEGATIVA	4º
1,2 a 3,2	POSITIVA	POSITIVA	1º
3,2 a 3,9	NEGATIVA	POSITIVA	2º
3,9 a 6,1	NEGATIVA	NEGATIVA	3º
6,1 a 7,0	POSITIVA	NEGATIVA	4º
7,0 a 9,0	POSITIVA	POSITIVA	1º
9,0 a 9,8	NEGATIVA	POSITIVA	2º

Figura 5.9 - Tabela correspondente à Fig. 5.8.

5.5 - Característica Torque-Velocidade

Sendo que o pulsador de corrente permite, com a variação da razão cíclica da corrente de armadura, a monitoração direta do torque elétrico,

$$T_e = K_e I_a \text{ é proporcional } \rho$$

então o pulsador deve apresentar uma característica torque-velocidade linear, mesmo em baixas velocidades, já que o torque independe da velocidade.

Para comprovar a afirmativa acima, realizou-se um teste onde a corrente de campo foi mantida constante, e a malha de realimentação foi aberta. A razão cíclica foi variada, proporcionando diversos valores de corrente de armadura média I_a . E para cada valor de ρ a máquina foi submetida a torques de carga que permitissem a excursão da velocidade desde zero até próxima à nominal.

Com isto foram levantadas as curvas da Fig. 5.10.

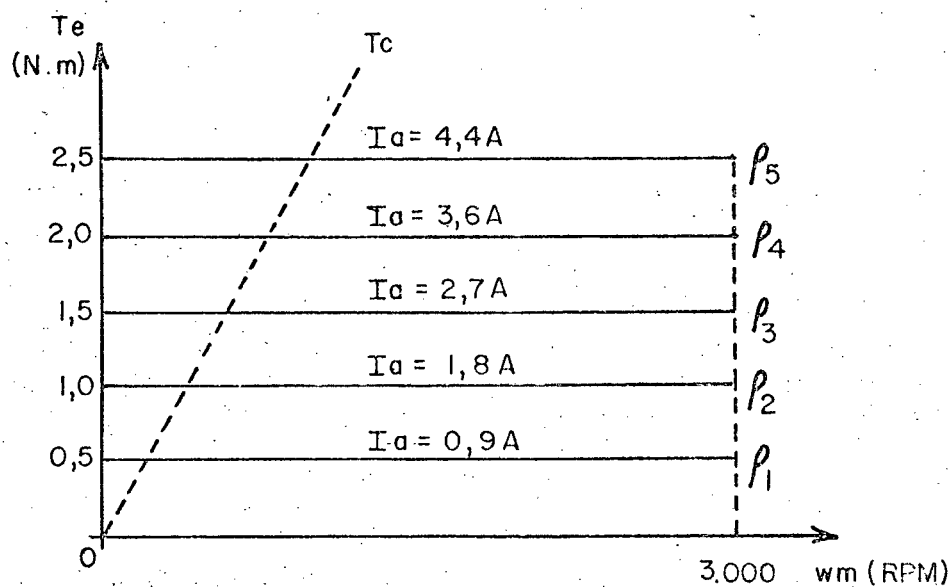


Figura 5.10 - Característica torque x velocidade ($I_f = 0,56A$).

Estas curvas representam os dados obtidos experimentalmente, e vêm confirmar a linearidade existente na característica torque-velocidade da máquina de corrente contínua associada ao pulsador de corrente, mesmo para velocidades reduzidas.

5.6 - Resposta a uma perturbação no Torque de Car- ga

Este estudo foi realizado visando mostrar a linearidade de resposta que, a associação do pulsador de corrente, a máquina de corrente contínua e a realimentação com controlador proporcional-integral possuem. Para isto foi acoplada mecânicamente, no mesmo eixo, uma máquina secundária que fornecesse de graus de torque de carga, de acordo com a variação do reostato mostrado na Fig. 5.11.

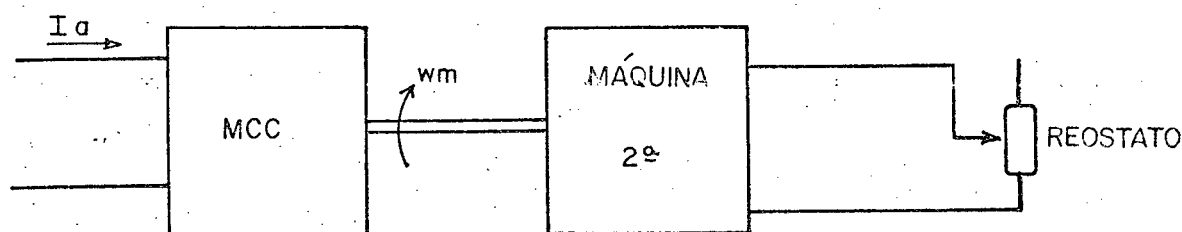


Figura 5.11 - Diagrama de blocos do ensaio com a aplicação de degraus de torque.

Este ensaio consistiu no registro da resposta de velocidade a cada variação do torque de carga.

Foram escolhidos velocidades que caracterizassem faixas de velocidades diversas, e os torques foram aplicados e retirados, visando que o regime permanente de velocidade fosse sempre atingido. Ver Fig. 5.12.

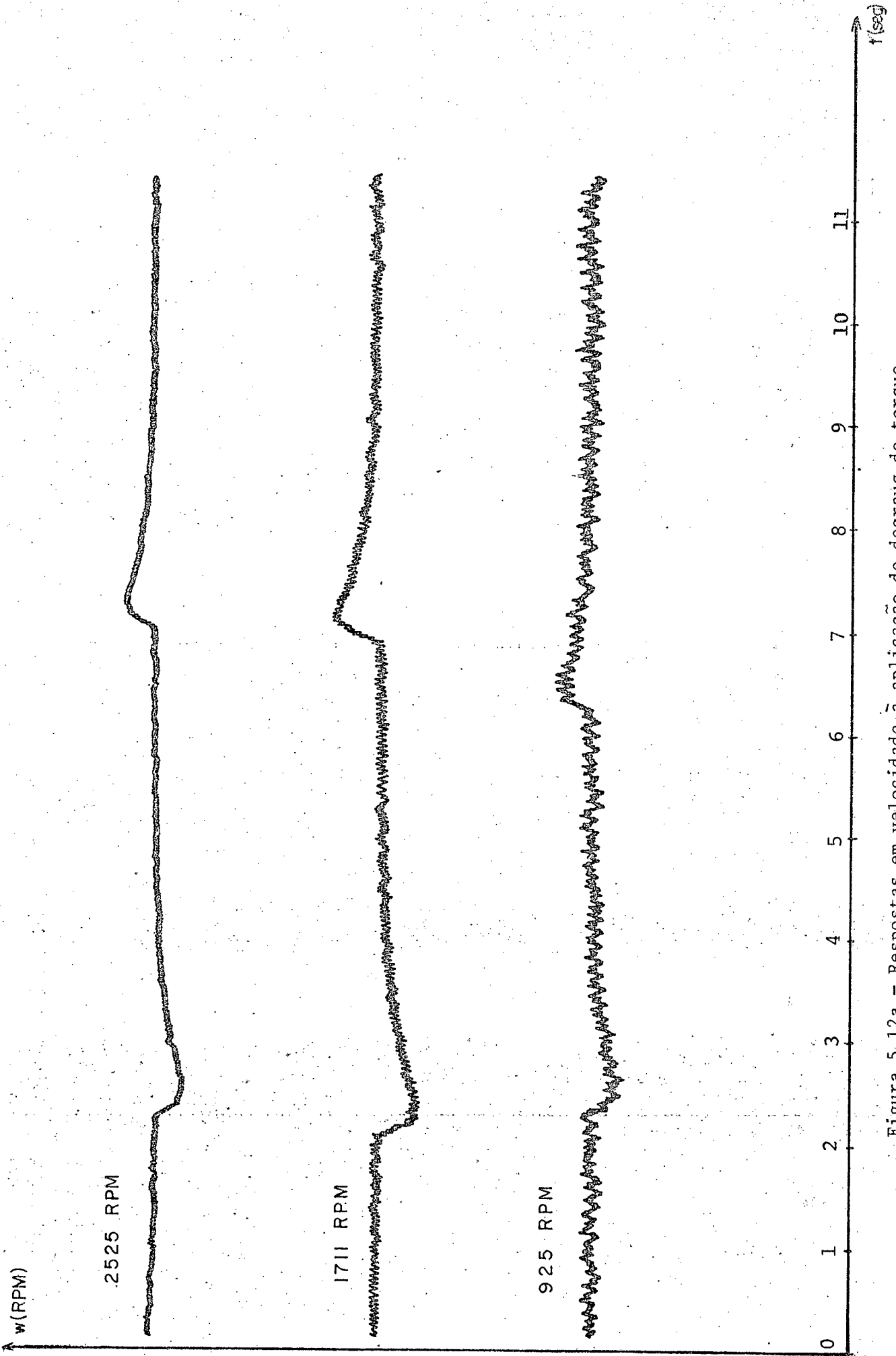


Figura 5.12a - Respostas em velocidade à aplicação de degraus de torque.

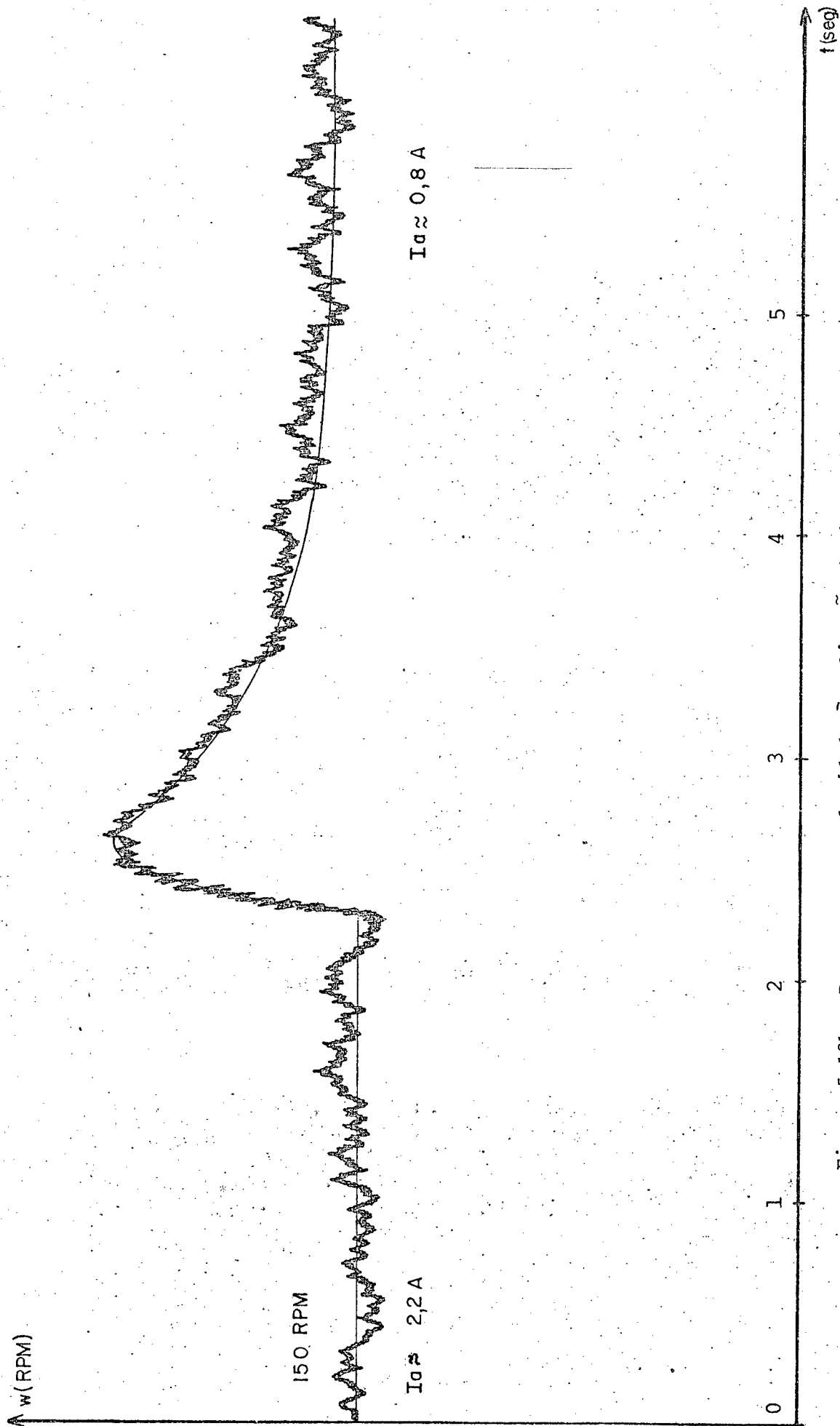


Figura 5.12b - Respostas em velocidade à aplicação de degraus de torque.

Observar que mesmo com a utilização de filtro da tensão proveniente do tacogerador, o sinal em baixas velocidades apresenta elevado nível de ruídos. Daí a necessidade de se utilizar tacogeradores de boa qualidade.

Pelas Fig. 5.12 a e b, fica comprovado que o sistema apresenta o mesmo comportamento quando sujeito a variações bruscas de torque de carga, independentemente da velocidade que a máquina esteja operando.

Pode-se portanto concluir que o sistema estudado comporta-se linearmente, desde que os amplificadores que compõem os circuitos de controle não estejam saturados.

5.7 - Conclusão

Neste capítulo ficou evidenciado:

- o acionamento em quatro quadrantes de uma máquina de corrente contínua alimentada pelo pulsador de corrente;
- a necessidade da utilização de uma ponte retificadora que permita o fluxo de potência entre a rede e a máquina, e vice-versa;
- a possibilidade do controle de velocidade com erro nulo, através da utilização de uma realimentação de velocidade com controle proporcional-integral;
- a necessidade da utilização de um tacogerador de boa qualidade;
- que o pulsador de corrente possibilita às cargas com caracte

terística torque - velocidade retilínea um comportamento linear, mesmo em baixas velocidades; e

- o desempenho do conjunto formado pela máquina de corrente contínua, o pulsador de corrente e a realimentação de velocidade para variações bruscas de torque de carga é linear independente da velocidade.

CONCLUSÃO

A partir dos estudos teóricos e experimentais realizados, descritos neste trabalho, pode-se concluir que:

- 1 - O poder de comutação diminui à medida que a velocidade aumenta. Há necessidade de se dimensionar o circuito de comutação forçada, levando-se em conta a maior velocidade de que a máquina pode atingir, e que é limitada pelo regulador de velocidade.
- 2 - A utilização de uma fonte de corrente reversível em tensão permite a regeneração de energia à rede, garantindo alto rendimento.
- 3 - É possível utilizar um controle de velocidade proporcional-integral e conseguir um erro de posição nulo.
- 4 - Existe linearidade de resposta em regime transitório.
- 5 - A associação do pulsador de corrente à máquina de corrente contínua apresenta uma característica torque-velocidade linear, que permite obter torque elevado em baixa velocidade.
- 6 - O melhor desempenho da associação do pulsador à máquina de corrente contínua é conseguido quando a máquina apresenta baixa constante de tempo elétrica, ou seja, baixa indutância de armadura, e que é sempre encontrada em servomotores.

7 - O pulsador de corrente possui um comando relativamente simples e de fácil dimensionamento.

Acredita-se que esta montagem seja superior às outras estruturas difundidas, tenha interesse prático, e ainda, que possa ser empregada industrialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - PELLY, B.R. - Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters, Wiley-Interscience, 1971.
- [2] - DEWAN, S.B. & STRAUGHEN, A. - Power Semiconductor Circuits, Wiley-Interscience, 1975.
- [3] - LAMBERT, J.A. - Motor Monofásico de Indução Alimentado em Corrente, Sob Freqüência Variável, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1983.