

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE  
CONTÍNUA**

**PAULO NASCIMENTO MARTINS  
WANDERSON LOPES BANHOS**

**VITÓRIA – ES  
AGOSTO/2005**

**PAULO NASCIMENTO MARTINS  
WANDERSON LOPES BANHOS**

## **CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação dos alunos Paulo Nascimento Martins e Wanderson Lopes Banhos, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES  
AGOSTO/2005**

**PAULO NASCIMENTO MARTINS  
WANDERSON LOPES BANHOS**

**CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE  
CONTÍNUA**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Sérgio Leite Lopes, M.Sc.  
Orientador**

---

**Prof. Marcos Aurélio Escopel Simões,  
D.Sc.  
Examinador**

---

**Prof. Antônio Bento Filho, M.Sc.  
Examinador**

## **DEDICATÓRIA**

Aos alunos e professores do Curso de Engenharia Mecânica da UFES.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente à Deus e ao Professor Sérgio Leite Lopes por ter proposto esse projeto. Aos nossos pais e irmãos por acreditarem na realização deste sonho. Aos demais familiares e amigos pelo incentivo.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 Reboque fixo.....	6
Figura 02 Reboque móvel.....	7
Figura 03 Controle de tensão no cabo .....	7
Figura 04 Tensão induzida no condutor .....	9
Figura 05 Vetor velocidade .....	10
Figura 06 Sentido da FEM .....	10
Figura 07 Configuração das linhas de campo .....	11
Figura 08 Formas de ondas das entidades físicas .....	12
Figura 09 Forças mocionais .....	13
Figura 10 Geração de energia .....	14
Figura 11 Convecção do sentido da corrente .....	15
Figura 12 Esquema do princípio de funcionamento .....	16
Figura 13 Elementos do motor .....	17
Figura 14 Esquema elétrico de um motor CC .....	18
Figura 15 : Torque x Corrente (a); Rotação x Corrente (b); Torque x Rotação (c) .....	21
Figura 16 Dinâmica do motor .....	22
Figura 17 Excitação independente de campo .....	23
Figura 18 Modulação por mudança de pulso .....	24
Figura 19 Frenagem dinâmica .....	24
Figura 20 Malha aberta .....	25
Figura 21 Malha fechada . .....	25
Figura 22 Malha mista .....	25
Figura 23 Controle de velocidade por largura de pulso aplicada ao motor (um quadrante) .....	26
Figura 24 Controle de velocidade por largura de pulso aplicada ao motor (dois quadrantes) .....	27
Figura 25 Motor original .....	28
Figura 26 Eixo do motor e soldagem .....	29
Figura 27 Última modificação .....	29
Figura 28 Foto do motor utilizado .....	31
Figura 29 Esquema de funcionamento .....	32
Figura 30 Foto esquemática do sistema .....	33
Figura 31 Sistema funcionando com 01 lâmpada .....	33
Figura 32 Sistema funcionando com 02 lâmpadas .....	33
Figura 33 – Gráfico Rotação x Potência requerida pelas Lâmpadas- peso 2Kg .....	40
Figura 34 – Gráfico Rotação x Potência requerida pelas Lâmpadas- peso 4Kg .....	41
Figura 35 – Gráfico do rendimento de conversão de energia Mecânica em Elétrica- peso 2Kg .....	42

## LISTA DE TABELA

Tabela 01 – Resultados Para o motor ligado a 01 Lâmpada de 25w e Peso de 2kg. ....	34
Tabela 02 – Resultados Para o motor ligado a 02 Lâmpadas de 25w cada e Peso de 2kg. ....	35
Tabela 03 – Resultados Para o motor ligado a 03Lâmpadas, 110W e Peso de 2kg. ....	35
Tabela 04 – Resultados Para o motor ligado a 03 Lâmpadas,145W e Peso de 2kg. ....	36
Tabela 05 – Resultados Para o motor ligado a 04Lâmpadas, 170W e Peso de 2kg. ....	36
Tabela 06 – Resultados Para o motor ligado em circuito aberto e Peso de 2kg. ....	37
Tabela 07 – Resultados Para o motor ligado em curto-circuito e Peso de 2kg. ....	37
Tabela 08 – Resultados Para o motor ligado 01 Lâmpada de 25w e Peso de 4kg. ....	38
Tabela 09 – Resultados Para o motor ligado a 02 Lâmpada de 25w e Peso de 4kg.....	38
Tabela 10 – Resultados Para o motor ligado em circuito aberto Peso de 4kg. ....	39
Tabela 11 – Resultados Para o motor ligado em curto-circuito e Peso de 4kg. ....	39

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>FIGURA 01: REBOQUE FIXO. ....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>LISTA DE TABELA .....</b>	<b>IV</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>6</b>
<b>1 CONSIDERAÇÕES GERAIS DOS MOTORES DE CORRENTE</b>	
<b>CONTÍNUA.....</b>	<b>8</b>
1.1 Introdução .....	8
1.1.1 Fundamentos da eletromecânica .....	8
1.1.2 Lei de Faraday da Indução Eletromagnética .....	8
1.1.3 Sentido da FEM Induzida – Regra de Fleming .....	10
1.1.3.1 LEI DE LENZ: .....	11
“A ação eletrodinâmica de uma corrente induzida opõe igualmente à ação mecânica que a induziu”. .....	11
1.1.4 Força eletromotriz Vocacional: .....	12
1.1.5 FEM Mocionais .....	13
1.1.6 Geração de energia elétrica .....	13
1.2 Motores elétricos.....	15
1.2.1 Aplicações de máquinas elétricas:.....	15
1.2.2 Princípio de Funcionamento.....	15
1.2.3 Tipos de motores elétricos.....	16
1.3 Motor CC .....	17
1.3.1 Aspectos físicos de uma máquina cc .....	18
1.3.2 Máquinas CC funcionando como motor; .....	19
1.3.3 Velocidade do motor CC.....	19
1.3.4 Relação entre torque e velocidade no motor de CC: .....	20
1.3.4.1 Características de torque e velocidade: .....	21



1.3.4.2 Dinâmica do motor CC .....	22
1.4 Controle de Motores CC .....	23
1.4.1 Malhas de controle com realimentação .....	25
1.4.2 Controle de motor CC por meio de Choppers .....	26
<b>2 ESCOLHA DO MOTOR .....</b>	<b>28</b>
2.1 SOLDAGEM DO EIXO .....	29
2.2 SEPARAÇÃO DAS ALIMENTAÇÕES .....	29
2.3 ANLISE DE PROJETO .....	30
<b>3 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE</b>	
<b>CONTÍNUA.....</b>	<b>31</b>
3.1 Características do Motor Utilizado .....	31
3.2 Descrição dos Testes Realizados .....	32
3.3 Resultados Obtidos .....	34
3.3.1 Resultados para a Queda de um Peso de Massa 2 kg .....	34
3.3.2 Resultados para a Queda de um Peso de Massa 4 kg .....	38
3.4 Análise dos Resultados .....	39
3.4.1 Rotação Média Estimada .....	40
3.4.2 Potência Aproveitada Estimada .....	41
3.4.2.1 Rendimento do Sistema para um peso de massa 2 kg .....	42
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>44</b>

## RESUMO

Este presente projeto de graduação visa estudar uma forma de controlar a velocidade de um motor de corrente contínua fazendo-o funcionar como gerador e controlar sua rotação através de resistências elétricas em paralelo.

O controle do motor de corrente contínua será utilizado para levantar vôo de asa delta, puxada por um reboque, onde terá um controlador de tensão que irá controlar a tensão no cabo, afim de que o piloto tenha a sensação semelhante a ter decolado de uma montanha.

Hoje no mercado, encontramos dois tipos de controle de tensão de cabo, que são: Controle Hidráulico de Tensão e Controle Utilizando Freio a Disco. Ambos são importados e podem custar até R\$ 56.000,00.

Há dois tipos de reboques: o fixo, feito com um motor estacionário que traciona o cabo conforme a Figura 01 e o tipo móvel que é acoplado a um carro, barco ou avião que libera o cabo do carretel conforme a Figura 02.



Figura 01: Reboque fixo.

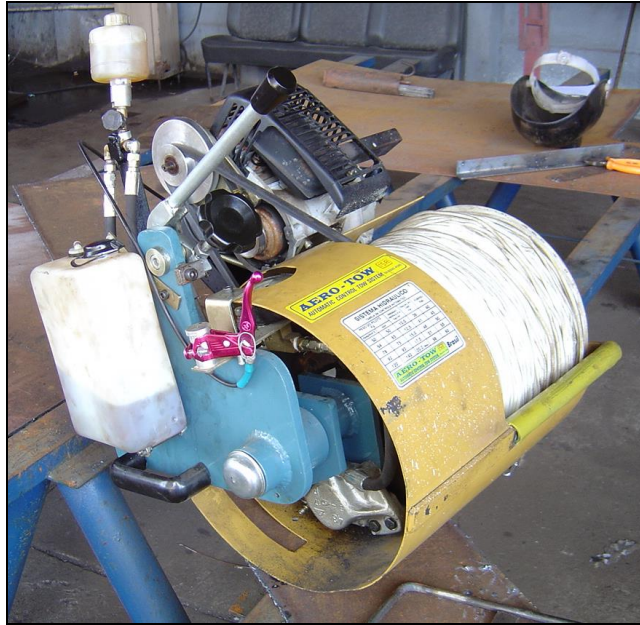


Figura 02: Reboque móvel.

Nos dois tipos é necessário que haja uma pessoa experiente para operar o reboque controlando o ângulo e a velocidade do parapente ou da asa delta. E existe ainda um terceiro tipo que é uma variação do reboque móvel sendo denominado reboque automático, pelo fato de existir uma regulação da tensão na corda, este reboque é mais compacto, usa um cabo muito mais fino, normalmente de Kevlar. A Figura 07 mostra o controle de tensão do reboque automático.

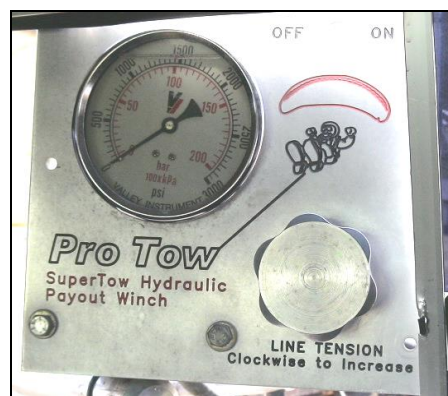


Figura 03: Controle de tensão do cabo.

Assim sendo, nossa proposta é desenvolver um equipamento que faça este controle, porém de forma muito mais simples, fácil e acessível.

# **1 CONSIDERAÇÕES GERAIS DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA**

## **1.1 Introdução**

Neste capítulo, tem-se uma breve discussão sobre motores de corrente contínua, desde seu funcionamento básico até os tipos de controle para estes motores.

### **1.1.1 Fundamentos da eletromecânica**

A primeira indicação da possibilidade de intercâmbio entre energia elétrica e mecânica foi apresentada por Michael Faraday em 1831. Esta descoberta, extremamente importante, possibilitou o desenvolvimento de:

- Gerador;
- Motor elétrico;
- Microfone;
- Alto-falante;
- Transformador, etc.

Fenômenos envolvidos na conversão eletromecânica de energia:

1. A força de atração existente entre as placas (opostas) carregadas de um capacitor;
2. A força mecânica exercida sobre uma amostra de material magnético localizado em um campo magnético;
3. Indução eletromagnética;
4. Força eletromagnética.

### **1.1.2 Lei de Faraday da Indução Eletromagnética**

Antes da descoberta de Faraday, a tensão de um circuito era gerada através de uma ação química. Faraday descobriu que o movimento entre um campo e um condutor de eletricidade

também provoca aparecimento de tensão. Faraday chamou esta tensão de “induzida” pois ele surgia apenas quando ocorria movimento relativo entre o condutor e o campo magnético, sem contato físico entre eles.

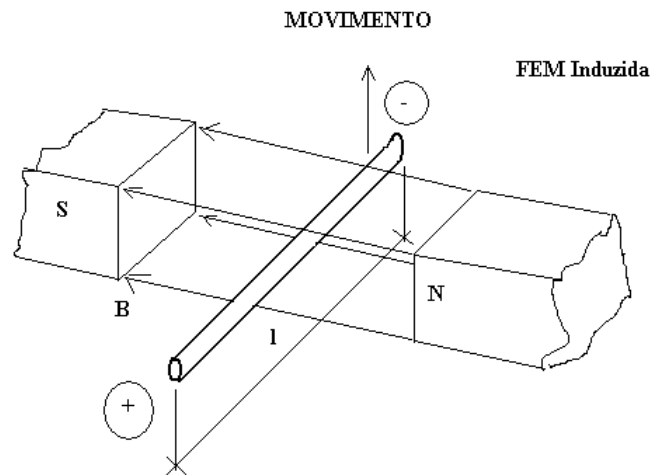


Figura 04 - Tensão induzida no condutor

**Afirmativa geral da lei de Faraday:** O valor da tensão induzida em uma simples espira de fio é proporcional à razão da variação das linhas de força que passam através daquela espira (ou se conectam com ela).

Força eletromotriz induzida instantânea:

$$e = B.l.v.k$$

Onde:

$$e = [v] - [v];$$

$$B = [\text{Gauss}] - [\text{Wb/m}^2] = \text{densidade de fluxo};$$

$$l = [\text{cm}] - [\text{m}] = \text{comprimento do condutor imerso no campo};$$

$$v = [\text{cm/s}] - [\text{m/s}] = \text{velocidade relativa entre o condutor e o campo};$$

$$k = 10^{-8} - 1 = \text{fator de ajuste}.$$

Se o movimento do condutor for paralelo às linhas de campo, não há geração de FEM. Portanto a equação completa é: fórmula, onde  $\theta$  é o ângulo formado entre a velocidade e as linhas de campo.

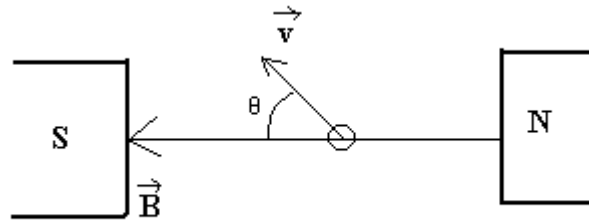


Figura 05 Vetor velocidade

### 1.1.3 Sentido da FEM Induzida – Regra de Fleming

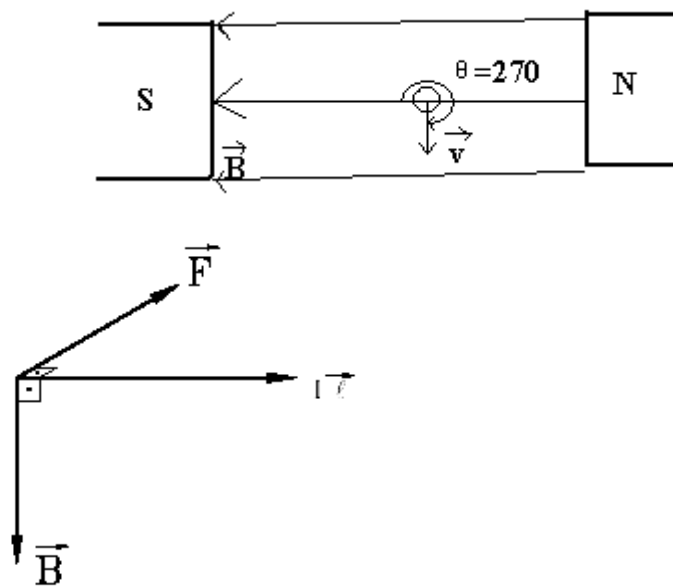


Figura 06- Sentido da FEM.

### 1.1.3.1 LEI DE LENZ:

**“A ação eletrodinâmica de uma corrente induzida opõe igualmente à ação mecânica que a induziu”.**

Em outras palavras, uma FEM induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado num sentido tal que seu efeito magnético se oponha à variação que a produziu.

A propriedade da indutância é um efeito e um resultado da lei de Lenz.

Nota: a energia para indução eletromagnética não é fornecida pelo campo magnético, como se poderia supor, uma vez que não se altera nem se destrói o campo durante o processo. A energia elétrica para indução eletromagnética requer, portanto, um dispêndio de energia mecânica (lei da conservação de energia).

Considere um condutor como parte de um gerador acionado por uma máquina primária. Quando uma carga é conectada a esse gerador, a corrente tenderá a circular no condutor no mesmo sentido da FEM induzida, produzindo um campo magnético em torno do condutor. O campo magnético de sentido anti-horário em torno do condutor repele o campo acima dele e atrai o campo abaixo dele (se opõe do campo que o originou).

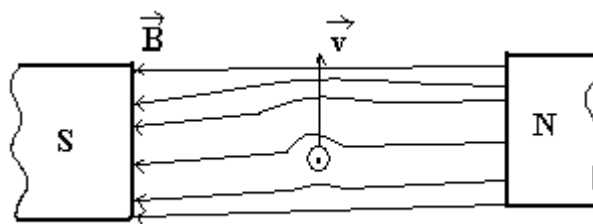


Figura 07- Configuração das linhas de campo.

Logo, quanto maior a energia elétrica solicitada do gerador (pela carga), maior será a corrente no condutor, maior será o campo induzido em torno do condutor e, portanto, maior será a oposição ao campo. Mais energia mecânica é necessária para movimentar o condutor.

A forma quantitativa do fenômeno descrito por Faraday e por Lenz (indução Eletromagnética) foi estabelecida por Maxwell:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

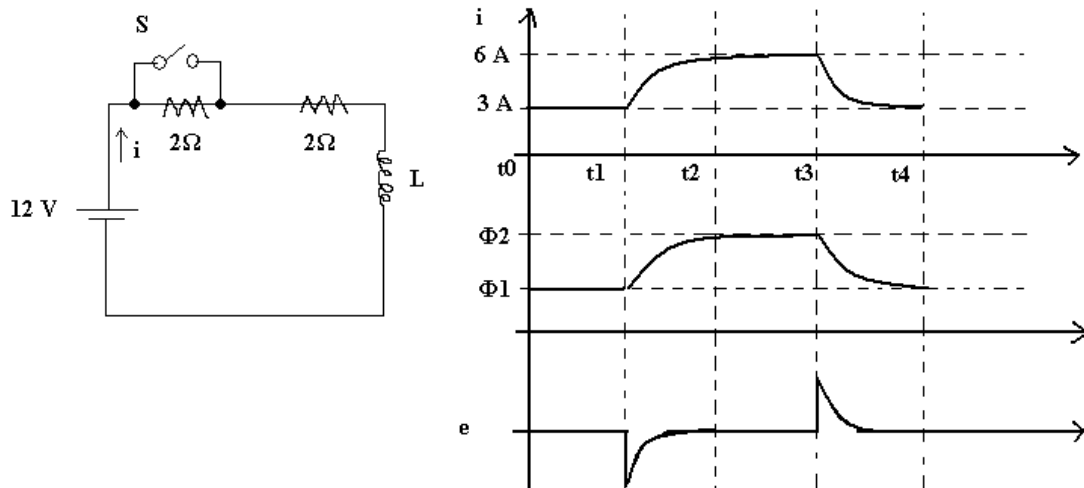


Figura 08.- Formas de ondas das entidades físicas

Pode-se utilizar um indutor como limitador da variação de corrente em circuitos elétricos e eletrônicos.

#### 1.1.4 Força eletromotriz Vocacional:

É a FEM oriunda da variação de fluxo no tempo.

O fluxo magnético concatenado com determinado enrolamento dotado de N espiras é:

$$\lambda = N(t) \cdot \Phi(t)$$

Dessa forma:



$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial N} \times \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial \lambda}{\partial \Phi} \times \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Como N é constante:

$$\frac{d\lambda}{dt} = N \times \frac{d\Phi}{dt}$$

### 1.1.5 FEM Mocionais

Denomina-se FEM Mocional aquela induzida em um condutor por movimentação relativa em relação a um campo magnético.

Se v e B são perpendiculares:

$$e = -B.L.v$$

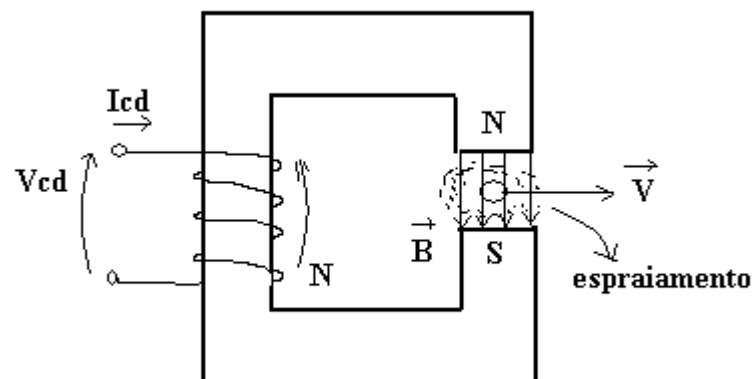


Figura 09- Forças Mocionais

### 1.1.6 Geração de energia elétrica

Ação: FEM – induz corrente I.

Reação: surge uma força \$F\_r\$ que tende a frear o condutor.

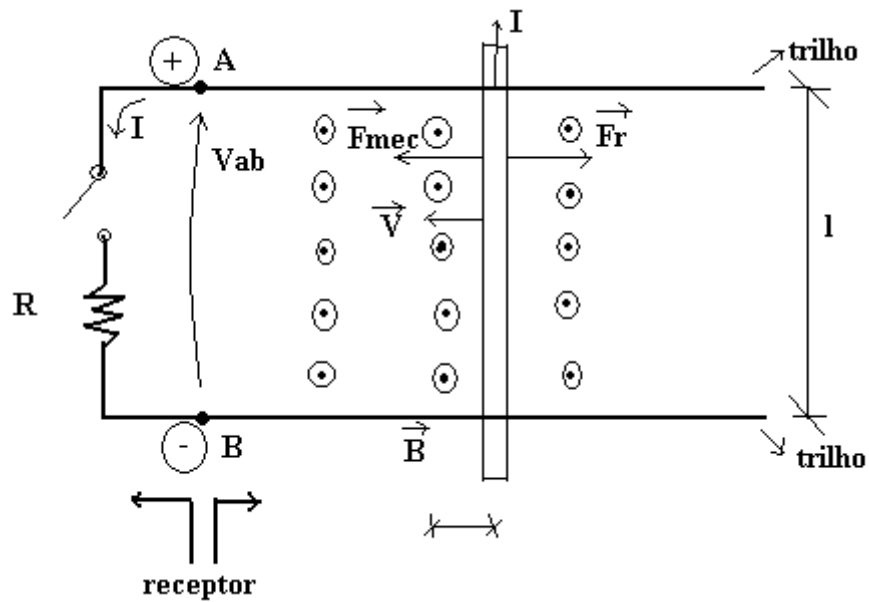


Figura 10- Geração de energia.

$$\text{Se } |\vec{Fr}| = |\vec{Fmec}| \Rightarrow |\vec{v}| = \text{constante.}$$

O sentido da força “frenante” ( $\vec{Fr}$ ) é contrário ao sentido da  $\vec{Fmec}$

Potência do circuito elétrico:  $P = R.I^2$

Trabalho realizado:  $\Delta T = P\Delta t$

Mas,  $\Delta T = Fmec.\Delta x$

Mas,  $P = \frac{\Delta T}{\Delta t} \Rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} = Fmec.\frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow P = Fmec.v \Rightarrow RI^2 = Fmec.v$ , desprezadas todas as perdas.

Mas,  $P = Vab.I \Rightarrow Vab.I = Fmec.v$

$$\mathbf{Vab = -E}$$

$$E = -BLv \Rightarrow Vab = BLv$$

Como:  $Vab.I = Fmec.v \Rightarrow BLvI = Fmec.v \Rightarrow B.L.I = Fmec$

$\Delta T = -fr.\Delta x \rightarrow$  sentido do deslocamento contrário ao sentido da força.

$$-fr.\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \Rightarrow fr.v = B.L.v.I \Rightarrow fr = B.L.I$$

Num gerador, se o condutor corta as linhas de campo magnéticas surge uma força mecânica (sentido oposto ao da regra da mão direita (FBI)) proporcional à corrente que passa a circular por esse condutor.

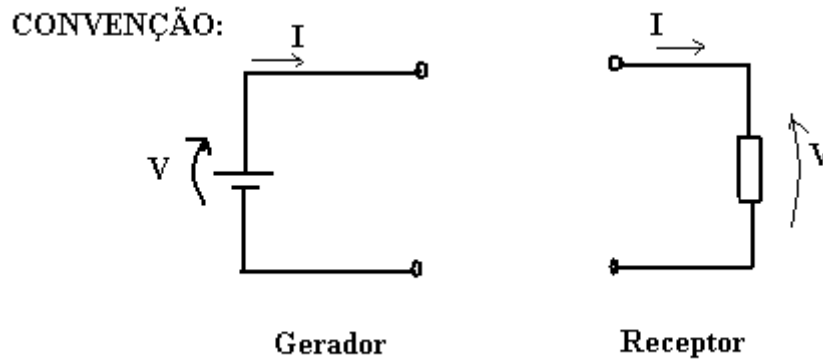


Figura 11- Convenção do sentido da corrente.

## 1.2 Motores elétricos

As máquinas elétricas rotativas funcionam sob o princípio da conversão eletromecânica de energia. Podem funcionar como Motores e Geradores.

### 1.2.1 Aplicações de máquinas elétricas:

Geração de energia elétrica;

Transportes (metrô, trem, etc)

Indústria (bombas, ventiladores, máquinas em geral);

Robótica;

Eletrodomésticos (ventiladores, máquinas de lavar, aspiradores, liquidificador, etc);

Informática (“cooler”, HD’s, drivers de CD-ROM, impressoras, scanners, etc)

### 1.2.2 Princípio de Funcionamento

Faraday: FEM induzida;

Lenz: corrente cria um campo que se opõe à variação inicial;

Condutores imersos em campo magnético sofrem ação de uma força quando circulados por corrente;

Condutores cortando as linhas de campo magnético com certa velocidade apresentam tensão induzida;

Pólos magnéticos: opostos se atraem e iguais se repelem..

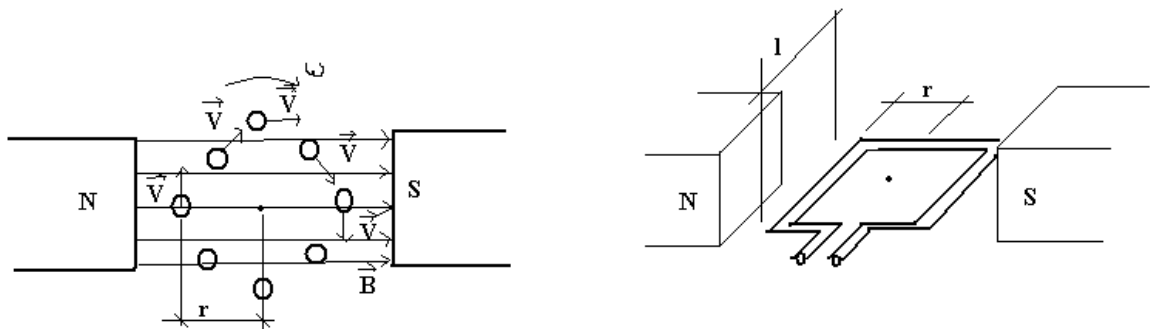


Figura 12 – Esquema do princípio de funcionamento.

$$e = B.l.v_1 \text{ para } N \text{ espiras} \rightarrow e = 2B.l\omega_r \sin(\omega t)$$

$$\text{Pois } v = \omega.r \text{ e } \omega = 2\pi f$$

### 1.2.3 Tipos de motores elétricos

Motor CC;

Motor de Indução;

Motor de passo;

Motor Síncrono;

BLDC ou PMSM – motor síncrono com imã permanente;

Motor de relutância variável;

Motor Universal, etc.

### 1.3 Motor CC

#### Princípio de Funcionamento

Faraday: FEM induzida;

Lenz: corrente cria um campo que se opõe à variação inicial;

Condutores imersos em campo magnético sofrem ação de uma força quando circulados por corrente;

Condutores cortando as linhas de campo magnético com certa velocidade apresentam tensão induzida;

Pólos magnéticos: opostos se atraem e iguais se repelem..

Comutador: objetiva manter a polaridade da tensão gerada por uma escova – obtenção de torque unidirecional. O comutador é composto por um anel dividido que desliza sob escovas.

Características físicas:

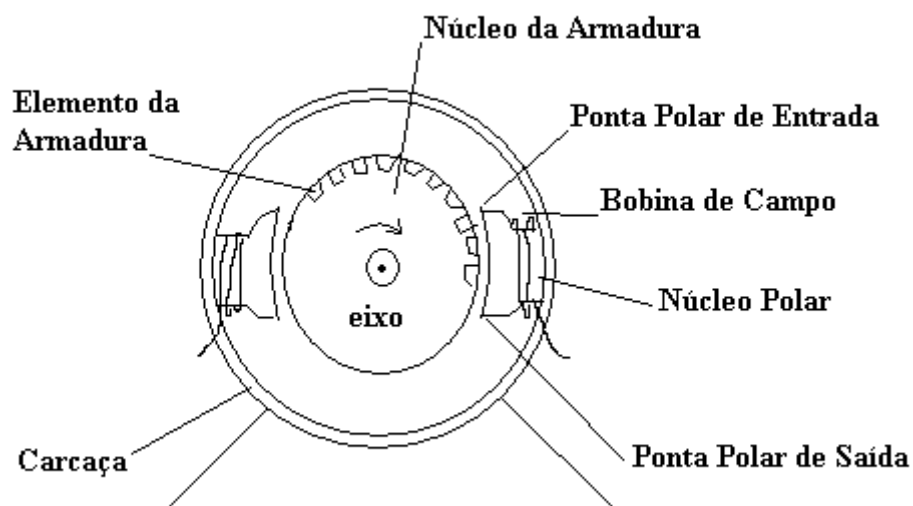


Figura 13- Elementos do Motor.

Equação da FEM:

A máquina CC possui resistências em seus enrolamentos. Quando operada como motor, a circulação de corrente nos condutores faz surgir uma força pois estão imersos num campo magnético. A movimentação dos condutores no campo faz surgir uma FEM induzida, chamada de força contra-eletromotriz, pois ela se opõe à circulação de corrente nos condutores:

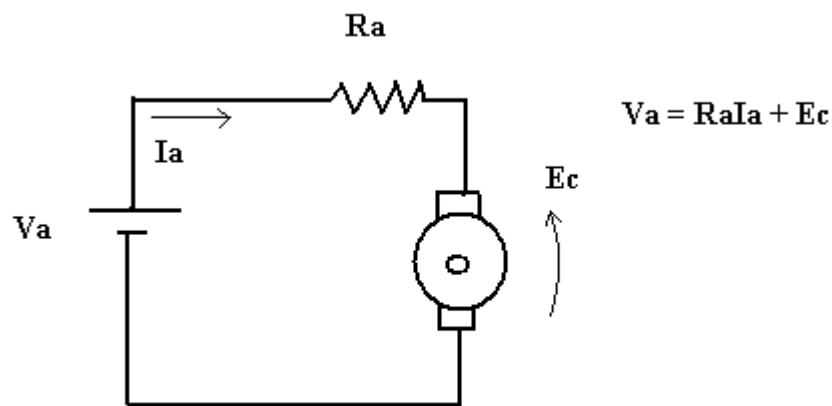


Figura 14.- Esquema elétrico de um motor CC

### 1.3.1 Aspectos físicos de uma máquina cc

Enrolamentos de campo: suportados pelos pólos, servem para criar o campo magnético no interior da máquina. Podem ser:

Série: poucas espiras de fio grosso;

Shunt:( paralelo) muitas espiras de fio fino.

Interpolos: localizados entre os pólos principais, são, geralmente, de tamanho menor. Composto de poucas espiras de fio grosso pois é ligado em série com o circuito de armadura, de modo que a FEM é proporcional à corrente de armadura.

Escovas: fazem o contato entre o circuito externo e o enrolamento de armadura através dos anéis comutadores. São, normalmente, mantidas por molas para que o contato com os anéis seja mais eficiente.

### 1.3.2 Máquinas CC funcionando como motor;

1. O torque eletromagnético desenvolvido produz rotação;
2. A tensão gerada nos condutores onde circula corrente (FEM) se opõe a corrente de armadura (Lei de Lenz);

3. FEM:  $E_c = V_a - I_a R_a$

$$E = \frac{p\phi n_z}{60a} \Rightarrow E = K_a \phi \omega_n, \text{ onde } \omega_n = \frac{2\pi n}{60}, K_a = \frac{zp}{2\pi a}$$

Se o circuito magnético é considerado linear, tem-se:

$$\phi = k_f \cdot i_f, \text{ onde } i_f \text{ é a corrente de campo } \Rightarrow E = K i_f \omega_n$$

Onde  $K = k_f k_a$ .

4. Torque:  $T_e = f \cdot d = f \cdot r$

$$P = f \cdot v = f \cdot \omega_n \cdot r \Rightarrow \frac{P}{\omega_n} = f \cdot r, \text{ logo: } T_e = \frac{P}{\omega_n} \Rightarrow T_e \cdot \omega_n = P$$

$$T_e \cdot \omega_n = E \cdot i_a \Rightarrow T_e \cdot \omega_n = K_a \cdot \phi \cdot \omega_n \Rightarrow T_e = K_a \cdot \phi \cdot i_a, \text{ que esta é a equação do conjugado.}$$

Ou  $T_e \cdot \omega_n = K \cdot i_f \cdot \omega_n \cdot i_a \Rightarrow T_e = K \cdot i_f \cdot i_a$ , onde K é chamada de constante eletromecânica de conversão de energia:  $K = K_f \cdot K_a$ .

### 1.3.3 Velocidade do motor CC

Viu-se que:  $E_m = \frac{p\phi N_z}{60a}$ , onde

N=velocidade em rpm;

$\phi$  = fluxo por pólo;

$p$  = número de pólos (cte);

$z$  = número de condutores (cte);

$a$  = número de caminhos paralelos (cte).

Pode-se escrever:  $E_m = K\phi N$ , onde  $K = \frac{zp}{60a}$ .

Visto que:  $V_a = E_m + RaI_a + V_e \Rightarrow E_m = V_a - RaI_a - V_e$

Tem-se:  $N = \frac{V_a - RaI_a - V_e}{K\phi}$ , chamada de equação fundamental da velocidade do motor CC.

Observações:

A velocidade pode ser controlada pela tensão aplicada à armadura;

Se  $V_a$  e  $\Phi$  permanecem constantes e ocorre aumento na carga do motor,  $I_a$  aumenta e a velocidade diminui;

Se  $V_a$  e  $I_a$  são constantes e  $\Phi$  diminui, a velocidade aumenta. De fato, o motor tende a disparar se o fluxo for zero!

### 1.3.4 Relação entre torque e velocidade no motor de CC:

Pela equação da velocidade vimos que esta aumenta quando o fluxo diminui. Mas, aumento do fluxo significa aumento do torque, pois  $T = k \Phi I_a$ . Então, porque  $N$  aumenta quando o  $\Phi$  diminui?

Lembre-se de que:  $V_a = E_m + RaI_a \Rightarrow I_a = \frac{V_a - E_m}{Ra}$ .

A diminuição da  $I_a$  provoca diminuição de  $\Phi$ ;

Como  $E_m = k \Phi N$ ,  $E_m$  cai instantaneamente, mas  $N$  permanece constante por causa da inércia;

A queda de  $E_m$  provoca aumento de  $I_a$ ;

Uma pequena redução em  $E_m$  (FEM) provoca aumento de  $I_a$ ;

Como  $T = k \Phi I_a$ , um pequeno decréscimo de  $\Phi$  provoca grande aumento de  $I_a$ . Logo, o torque aumenta, aumentando a velocidade;

Isso é válido para o caso em que  $I_a$  não é controlada.



Observação: durante a partida de um motor CC a corrente da armadura deve ser limitada (circuito de controle, fonte de corrente, resistores, etc.).

### 1.3.4.1 Características de torque e velocidade:

No motor série N tende a infinito quando  $I_a$  é pequeno. Por isso ele fica normalmente ligado à cargas como guindastes, elevadores ou serviço de tração.

No motor Shunt tem-se pouca variação de velocidade com a carga, o que é bom para acionamento de máquinas.

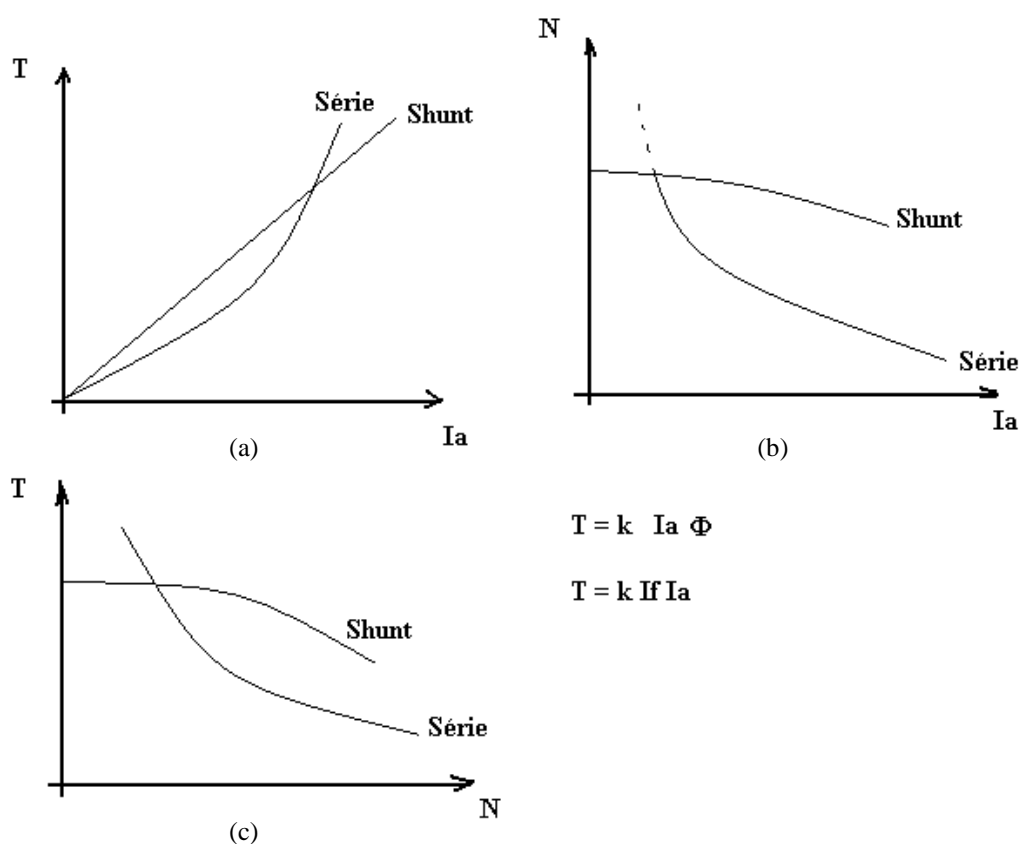


Figura 15.- Gráficos: Torque x Corrente (a); Rotação x Corrente (b); Torque x Rotação (c)

### 1.3.4.2 Dinâmica do motor CC

$$V_a = E_m + R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt}$$

$$E_m = K I_f \omega_n$$

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$$

$$T_e = T_l + B \omega_n + J \frac{d\omega_n}{dt}$$

$$T_e = K I_f I_a$$

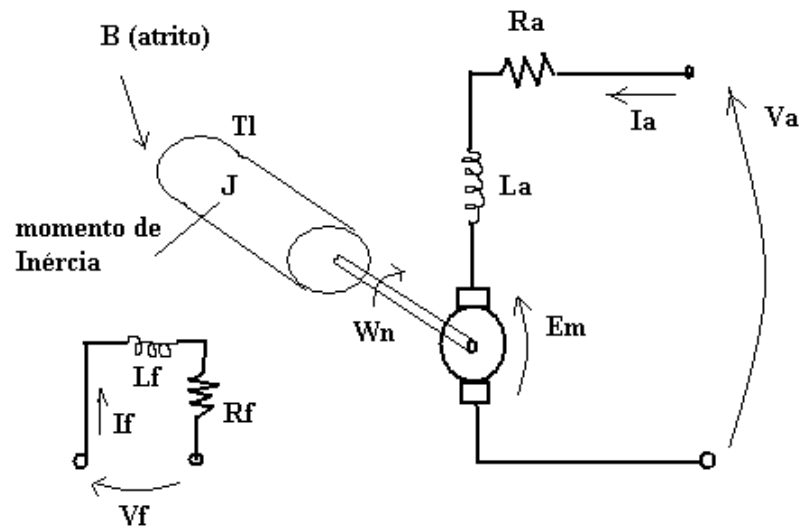


Figura 16.- Dinâmica do motor

## 1.4 Controle de Motores CC

Para fazer o controle de velocidade de motores CC devemos fazer o controle do fluxo do campo ou de tensão de armadura, de acordo com o que mostra a equação fundamental da velocidade de um motor CC.

A máquina CC mais simples de ser controlada é a de excitação independente:

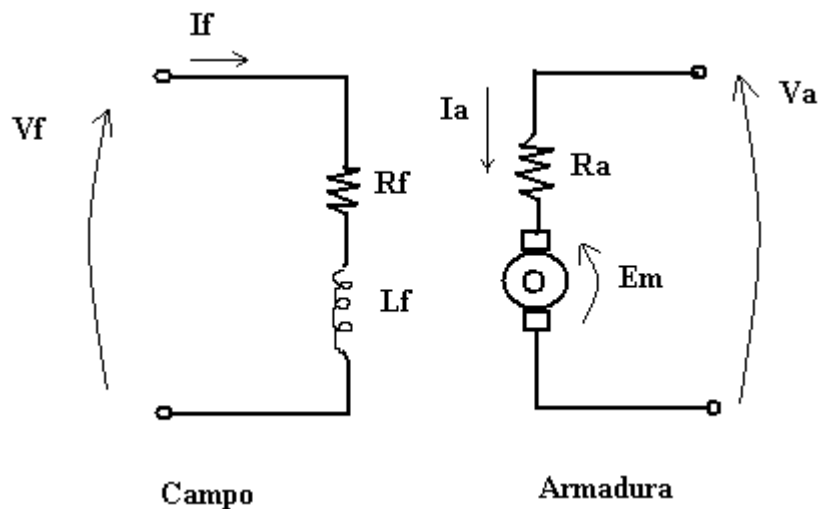


Figura 17 - Excitação independente de campo

Na região linear (sem saturação do circuito de campo) temos:  $\Phi = K_f \cdot I_f$ .

Como  $R_a$  é muito pequena, a variação de  $V_a$  resulta numa variação praticamente igual de  $E_m$ .

Formas de se ajustar a tensão da armadura ou campo:

Inserir um resistor em série;

Alimentar em CA com VARIAC e retificador a diodos;

Alimentar em CA com trafo e retificador controlado;

Alimentar com CC e PWM.

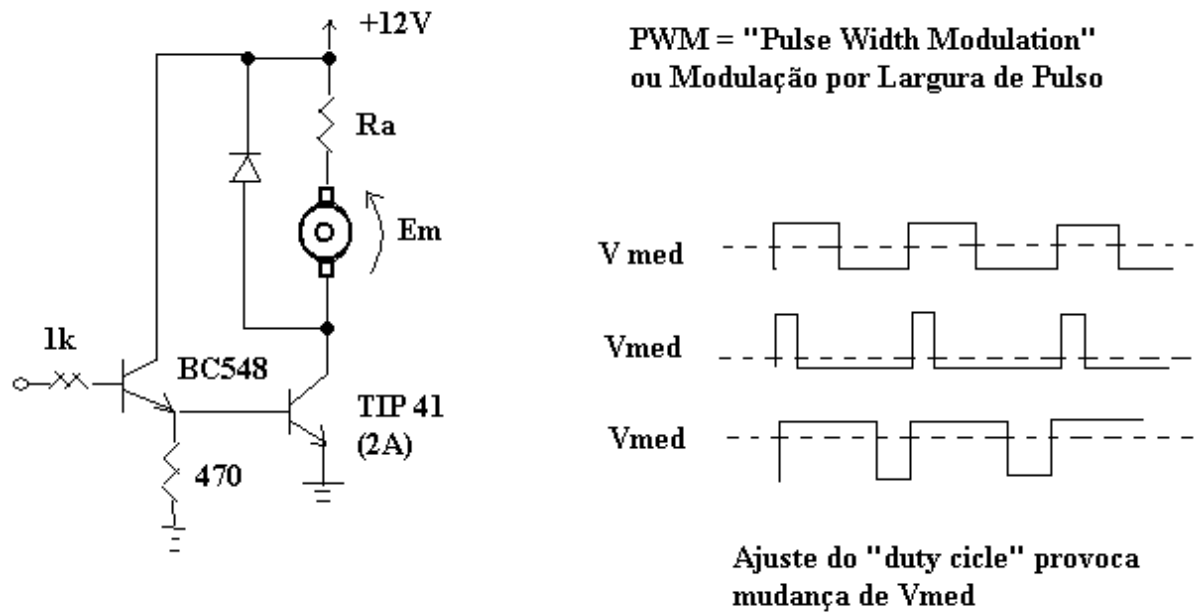
**PWM:**

Figura 18. – Modulação por mudança de pulso

Para todos os casos, a corrente média de armadura é proporcional ao torque do motor. A velocidade média proporcional à FEM média.

Em qualquer retificador estudado irão existir uma parcela de corrente que não produz torque – harmônicas. As correntes harmônicas produzem perdas adicionais no motor. Por isso, um mesmo motor terá rendimento menor quando alimentado por um acionamento tiristorizado, se comparado ao rendimento quando alimentado por fonte CC.

Quando desaceleração rápida é desejada, um conversor totalmente controlado pode ser colocado em modo de inversão – frenagem regenerativa. No caso de um conversor não controlado pode ser utilizada frenagem dinâmica.

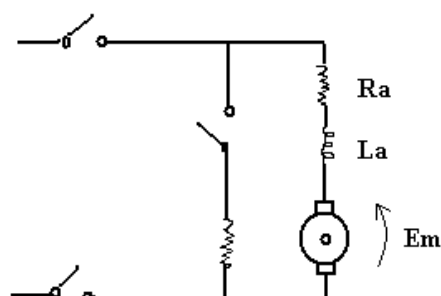


Figura 19.- Frenagem dinâmica

Para se inverter o sentido de rotação deve-se inverter a polaridade da tensão de armadura ou de campo. Nunca ambas ao mesmo tempo.

#### 1.4.1 Malhas de controle com realimentação

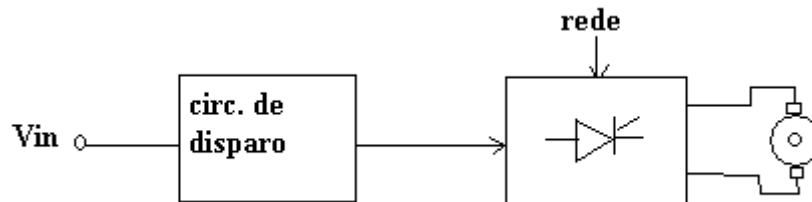


Figura 20.- Malha aberta

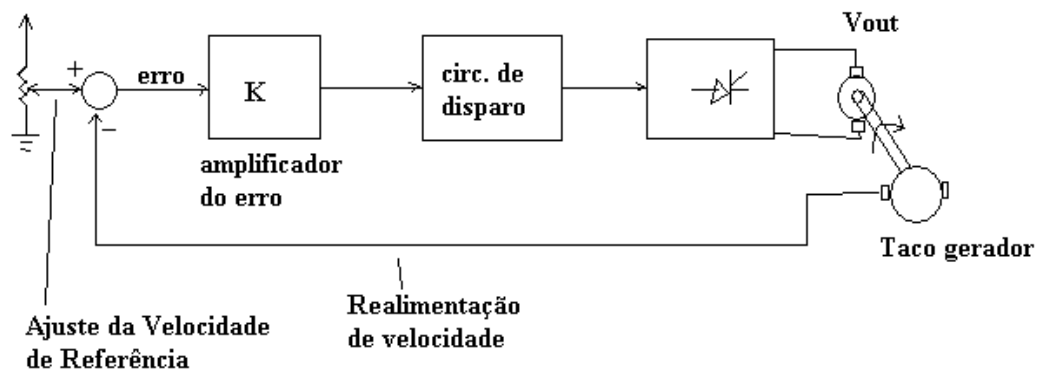


Figura 21. Malha fechada

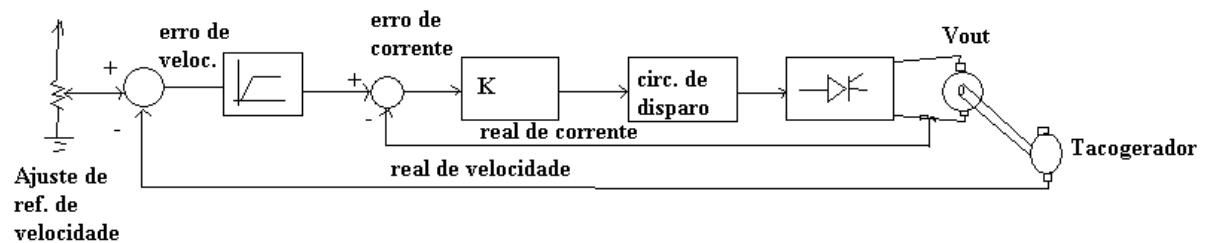


Figura 22.- Malha mista

### 1.4.2 Controle de motor CC por meio de Choppers

É interessante manter o motor operando em condução contínua pois o torque mais suave.

A tensão média no motor e, portanto, sua velocidade é controlada pela modulação de largura de um pulso de tensão aplicado ao motor.

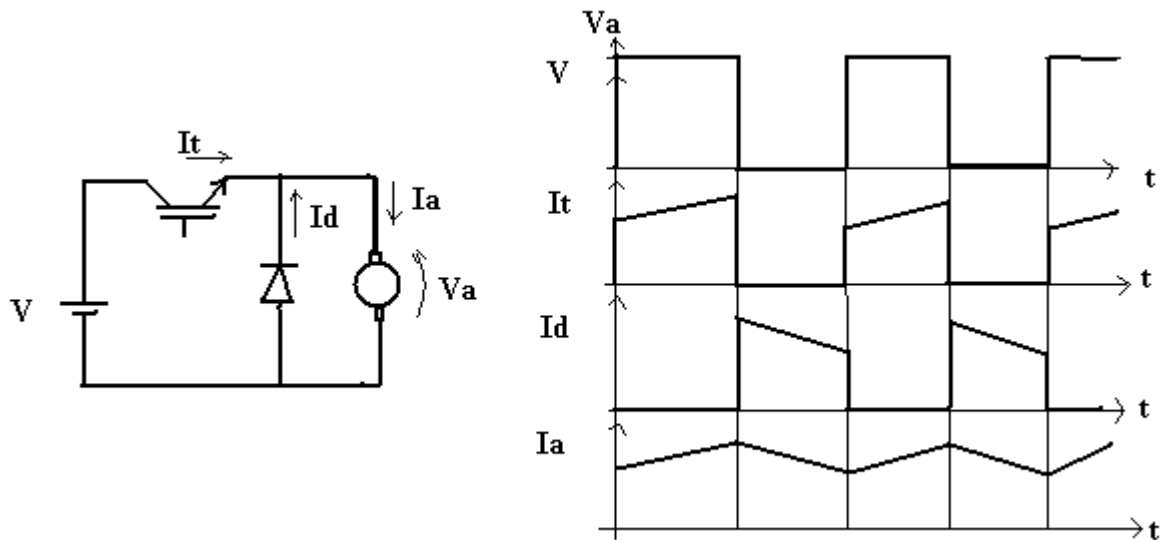


Figura 23.- Controle de velocidade por largura de pulso aplicada ao motor (um quadrante)

Operação em um quadrante: nem tensão nem corrente podem ter polaridade invertida.

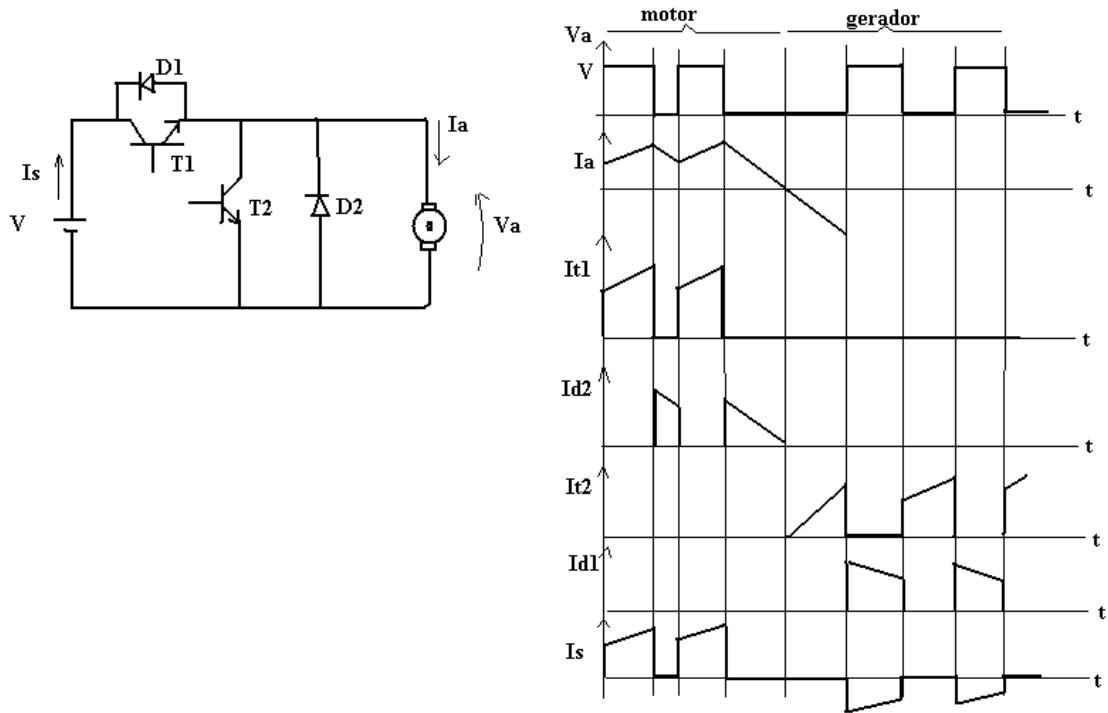


Figura 24.- Controle de velocidade por largura de pulso aplicada ao motor (dois quadrantes)

Operação em 2 quadrantes: corrente pode ser invertida, mas a tensão mantém a polaridade – velocidade em um sentido.

## 2 ESCOLHA DO MOTOR

A princípio, o motor escolhido foi o motor de arranque marítimo, da Volvo de 5kw, 12V, 4 escovas. É um motor de corrente contínua, com campo bobinado, ou seja, formado por eletroímã. As bobinas de armadura e campo são ligadas em série, e o eixo do motor possui sistema contra inversão de sentido.



Figura 25 – Motor original

O motor sofreu algumas modificações para atender a nossa proposta: separação das alimentações de campo e armadura, além da soldagem do eixo.



## 2.1 SOLDAGEM DO EIXO

Foi necessário soldar a catraca anti-travamento do eixo, para permitir a transmissão de torque nos dois sentidos de rotação. No motor original, o torque só era transmitido em um sentido.



Figura 26 - Eixo do motor e Soldagem

O produto utilizado na soldagem foi o Trincalox, com vareta de latão.

## 2.2 SEPARAÇÃO DAS ALIMENTAÇÕES

A separação das alimentações da armadura e de campo foi necessária devido a facilidade de controle de velocidade que existe num motor de corrente contínua construído em paralelo. Ou motor Shunt, como é conhecido popularmente.

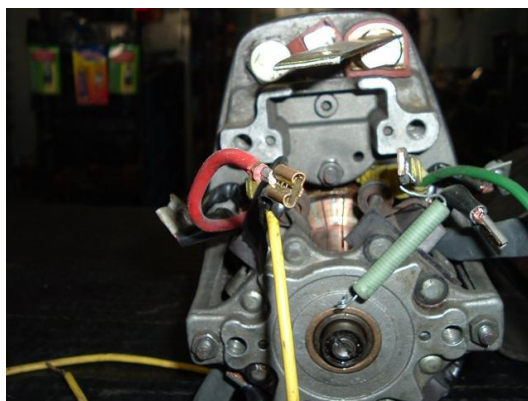


Figura 27 - Ultima modificação

## 2.3 ANLISE DE PROJETO

As modificações no motor foram efetuadas, mas devido a modificação na construção do motor, passando-o de série para paralelo, a corrente passante no campo ficou muito elevada, em torno de 200 A. A placa de controle de velocidade construída, foi projetada para suportar 15 A. Uma solução foi retificar a corrente utilizando transistores. Como um transistor de 100 A custa em torno de R\$ 1000,00 e o objetivo do trabalho envolvia baixo custo de fabricação, foram utilizados 10 transistores de 10A, na retificação. Estes custam em torno de R\$10,00 cada. Devido ao o pouco conhecimento na área, e através de experimentos, verificamos que a retificação não funcionara, pela forma de funcionamento transistor, que um atrapalhava a sequência de funcionamento dos outros, quando ligados em paralelo.

Por esse motivo, optamos por trabalhar com um motor menos potente, e que limitasse a corrente em 12 A.

O motor encontrado foi um motor de vidro elétrico automotivo, 12 V, CC, com corrente nominal de 6 A.

### 3 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Das diversas formas de controle de velocidade para motores de corrente contínua, a utilizada e testada neste presente trabalho, foi a de uma máquina de corrente contínua inicialmente projetada para ser funcionar como motor elétrico, foi utilizada como gerador. Neste caso, aplica-se um torque no eixo da máquina e esta produz tensão em seus terminais, consequentemente produzindo uma corrente de armadura. Esta corrente pode ser usada para alimentar um banco de resistências, por exemplo.



Figura 28- Foto do motor utilizado.

#### 3.1 Características do Motor Utilizado

O motor utilizado nos testes é o mesmo utilizado no vidro elétrico de automóveis, e possui as seguintes características:

Tensão: 12 V;

Consumo: 3,5 A;

Potência Máxima: 60 W;

Torque Máximo: 84 Ncm;

Rotação: 5100 rpm.

### 3.2 Descrição dos Testes Realizados

O experimento consistiu em aplicar torque ao eixo do motor e verificar corrente e tensão geradas para bancada de resistências elétricas em paralelo.

Foram utilizados dois pesos de massas 2 e 4 kg. O torque era aplicado através da queda de um peso, onde este peso estava preso à uma corda e esta era enrolada em uma polia, que estava ligada ao eixo do motor.

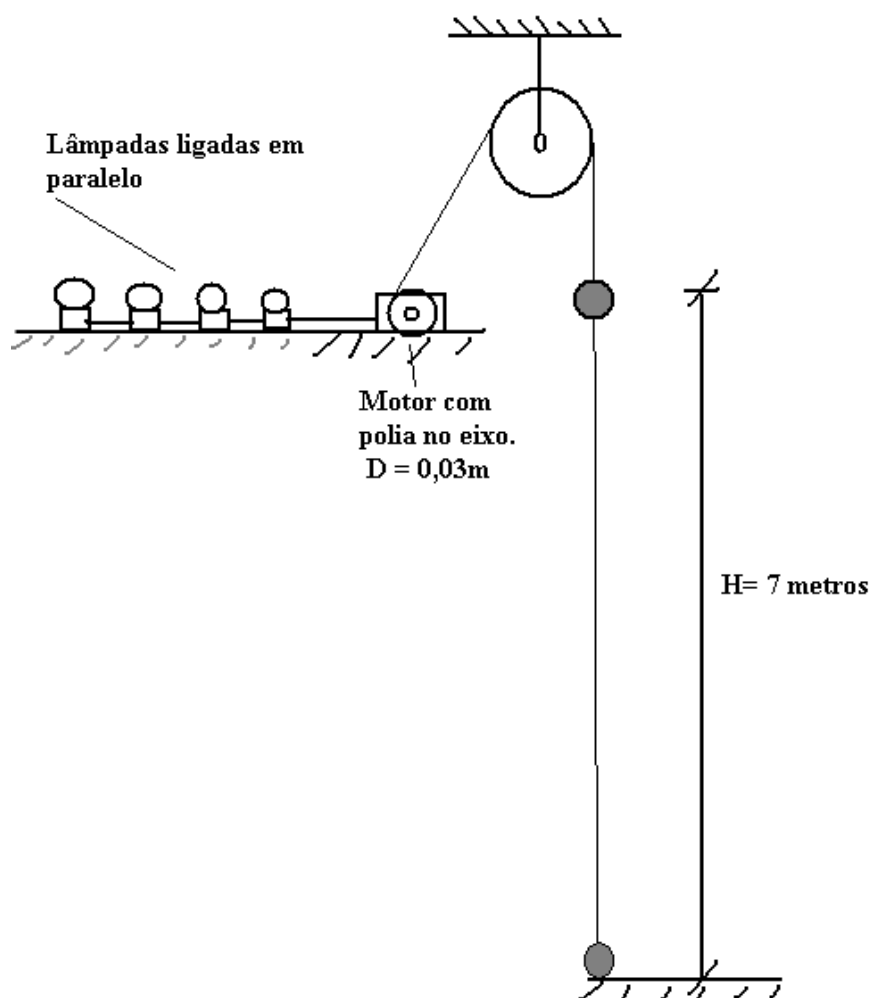


Figura 29- Esquema de funcionamento.

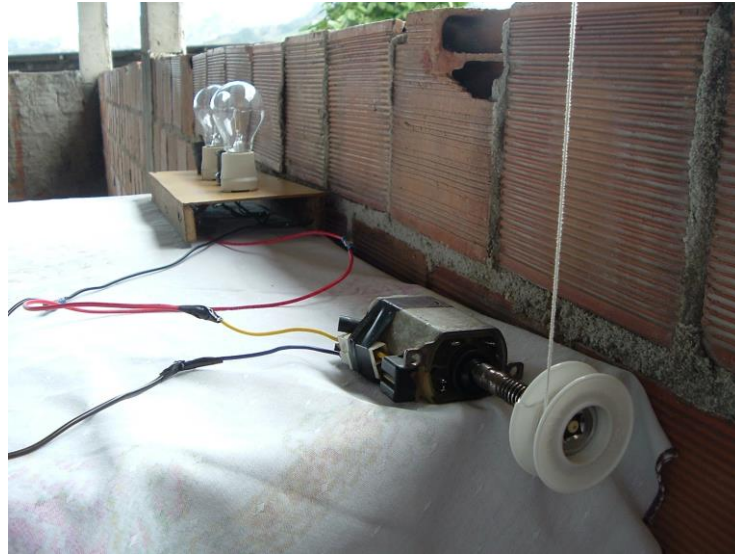


Figura 30- Foto esquemática do sistema.

O peso era abandonado de uma altura de 7 metros e durante a queda medíamos a máxima tensão e a máxima corrente que saía do motor para determinada quantidade de lâmpadas ligadas em paralelo, ou seja, resistências elétricas em paralelo com o motor, além de medirmos o tempo de queda do peso.



Figura 31-Sistema funcionando com 01 lâmpada.



Figura 32 - Sistema funcionando com 02 lâmpadas.

### 3.3 Resultados Obtidos

Através do experimento foram obtidos os seguintes resultados:

#### 3.3.1 Resultados para a Queda de um Peso de Massa 2 kg.

MOTOR LIGADO A 1 LÂMPADA (12v/25W)				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	2,00	1,60	1,96	
2	2,00	1,70	1,94	
3	2,00	1,30	1,90	
4	2,00	1,60	1,94	
5	2,00	1,50	1,86	
6	2,00	1,50	1,95	
7	2,00	1,60		9,50
8	2,00	1,50		9,00
9	2,00	1,35		7,40
10	2,00	1,60		9,10
11	2,00	1,60		9,10
<b>MÉDIA:</b>	<b>2,00</b>	<b>1,53</b>	<b>1,93</b>	<b>8,82</b>

Tabela 01 – Resultados Para o motor ligado a 01 Lâmpada de 25w e Peso de 2kg.

<b>MOTOR LIGADO A 2 LÂMPADAS (12v/25W CADA)</b>				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	2,00	1,85	3,34	
2	2,00	1,70	3,27	
3	2,00	1,70	3,42	
4	2,00	1,60	3,36	
5	2,00	1,60	3,40	
6	2,00	1,80		6,00
7	2,00	1,80		5,30
8	2,00	2,00		5,30
9	2,00	1,65		6,20
10	2,00	1,70		6,90
11				
<b>MÉDIA:</b>	<b>2,00</b>	<b>1,74</b>	<b>3,36</b>	<b>5,94</b>

Tabela 02 – Resultados Para o motor ligado a 02 Lâmpadas de 25w cada e Peso de 2kg.

<b>MOTOR LIG A 3 LAMP 12V / 25W 25W 60W</b>				
MEDIÇÃO	PESO [KG]	TEMPO [S]	CORRENTE [A]	TENSÃO [V]
1	2,00	2,20	5,16	2,25
2	2,00	1,90	5,05	2,23
3	2,00	1,90	5,19	2,25
4	2,00	1,70	5,12	2,39
5	2,00	1,70	5,16	2,38
<b>MÉDIA:</b>	<b>2,00</b>	<b>1,88</b>	<b>5,14</b>	<b>2,30</b>

Tabela 03 – Resultados Para o motor ligado a 03Lâmpadas, 110W e Peso de 2kg.

<b>MOTOR LIG A 3 LAMP 12V / 25W 60W 60W</b>				
<b>MEDIÇÃO</b>	<b>PESO [KG]</b>	<b>TEMPO [S]</b>	<b>CORRENTE [A]</b>	<b>TENSÃO [V]</b>
1	2,00	2,00	5,17	1,92
2	2,00	2,20	5,36	1,82
3	2,00	1,80	5,38	1,83
4	2,00	2,00	5,31	1,74
5	2,00	2,10	5,18	1,78
<b>MÉDIA:</b>	<b>2,00</b>	<b>2,02</b>	<b>5,28</b>	<b>1,82</b>

Tabela 04 – Resultados Para o motor ligado a 03 Lâmpadas, 145W e Peso de 2kg.

<b>MOTOR LIG A 4 LAMP 12V / 25W 25W 60W 60W</b>				
<b>MEDIÇÃO</b>	<b>PESO [KG]</b>	<b>TEMPO [S]</b>	<b>CORRENTE [A]</b>	<b>TENSÃO [V]</b>
1	2,00	2,40	5,60	1,44
2	2,00	1,80	5,45	1,30
3	2,00	1,90	5,48	1,36
4	2,00	2,20	5,47	1,36
5	2,00	2,10	5,61	1,40
<b>MÉDIA:</b>	<b>2,00</b>	<b>2,08</b>	<b>5,52</b>	<b>1,37</b>

Tabela 05 – Resultados Para o motor ligado a 04Lâmpadas, 170W e Peso de 2kg.



MOTOR COM CIRCUITO ABERTO				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	2,00	1,20		
2	2,00	1,20		
3	2,00	1,20		
4	2,00	1,40		
5	2,00	1,40		
6				
7				
8				
9				
10				
11				
<b>MÉDIA:</b>	<b>2,00</b>	<b>1,28</b>		

Tabela 06 – Resultados Para o motor ligado em circuito aberto e Peso de 2kg.

MOTOR COM CURTO-CIRCUITO				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	2,00	2,20	5,00	
2	2,00	2,00	5,80	
3	2,00	2,25	5,80	
4	2,00	2,00	5,90	
5	2,00	2,00	5,90	
6				
7				
8				
9				
10				
11				
<b>MÉDIA:</b>	<b>2,00</b>	<b>2,09</b>	<b>5,68</b>	

Tabela 07 – Resultados Para o motor ligado em curto-circuito e Peso de 2kg.

### 3.3.2 Resultados para a Queda de um Peso de Massa 4 kg.

<b>MOTOR LIGADO A 1 LÂMPADA (12v/25W)</b>				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	4,00	1,40	2,04	
2	4,00	1,30	2,07	
3	4,00	1,40	2,16	
4	4,00	1,20	2,19	
5	4,00	1,30	2,22	
6	4,00	1,30	2,50	
7	4,00	1,60		7,50
8	4,00	1,30		7,11
9	4,00	1,20		9,18
10	4,00	1,40		7,75
11	4,00	1,60		8,11
<b>MÉDIA:</b>	<b>4,00</b>	<b>1,36</b>	<b>2,20</b>	<b>7,93</b>

Tabela 08 – Resultados Para o motor ligado 01 Lâmpada de 25w e Peso de 4kg.

<b>MOTOR LIGADO A 2 LÂMPADAS (12v/25W CADA)</b>				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	4,00	1,35	3,70	
2	4,00	1,50	3,93	
3	4,00	1,40	3,84	
4	4,00	1,50	3,90	
5	4,00	1,50	4,00	
6	4,00	1,30	4,00	
7	4,00	1,20		9,63
8	4,00	1,30		9,28
9	4,00	1,30		7,90
10	4,00	1,60		9,32
11	4,00	1,50		9,34
<b>MÉDIA:</b>	<b>4,00</b>	<b>1,40</b>	<b>3,90</b>	<b>9,09</b>

Tabela 09 – Resultados Para o motor ligado a 02 Lâmpada de 25w e Peso de 4kg.

<b>MOTOR COM CIRCUITO ABERTO</b>				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	4,00	1,20		9,38
2	4,00	1,10		12,08
3	4,00	1,20		9,43
4	4,00	1,40		9,57
5	4,00	1,40		8,90
6				
7				
8				
9				
10				
11				
<b>MÉDIA:</b>	<b>4,00</b>	<b>1,26</b>		<b>9,87</b>

Tabela 10 – Resultados Para o motor ligado em circuito aberto Peso de 4kg.

<b>MOTOR COM CURTO-CIRCUITO</b>				
MEDIÇÃO	PESO(KG)	TEMPO (S)	CORRENTE (A)	TENSÃO(V)
1	4,00	1,50	5,90	
2	4,00	1,50	8,74	
3	4,00	1,70	9,88	
4	4,00	1,30	9,15	
5	4,00	1,30	8,74	
6		1,40	9,12	
7				
8				
9				
10				
11				
<b>MÉDIA:</b>	<b>4,00</b>	<b>1,74</b>	<b>8,59</b>	

Tabela 11 – Resultados Para o motor ligado em curto-circuito e Peso de 4kg.

### 3.4 Análise dos Resultados

Com a média dos resultados obtidos nos itens 2.3.1 e 2.3.2, pode-se estimar a rotação média durante a queda do peso como a potência mecânica convertida em potência elétrica dissipada pelo circuito ligado ao motor-gerador.

### 3.4.1 Rotação Média Estimada

O cálculo da Rotação Média Estimada é bastante análogo ao cálculo da velocidade média linear. Basta dividir a altura de queda do peso pelo comprimento da circunferência da polia, assim tem-se o número de rotações que a polia executa durante a queda.

$N$  = número de rotações que a polia executa durante a queda;

$C$  = comprimento da circunferência da polia;

$H$  = altura de queda do peso.

$$N = \frac{H}{C} = \frac{7}{\pi \times 0,03} = 74,3$$
, ou seja, durante a queda do peso o eixo do motor executa 74,3 rotações.

Assim, a rotação média pode ser calculada:

$$\bar{n} = \frac{74,3 \times 60}{t} \text{ [rpm]}, \text{ onde } t \text{ é o tempo de queda do peso.}$$

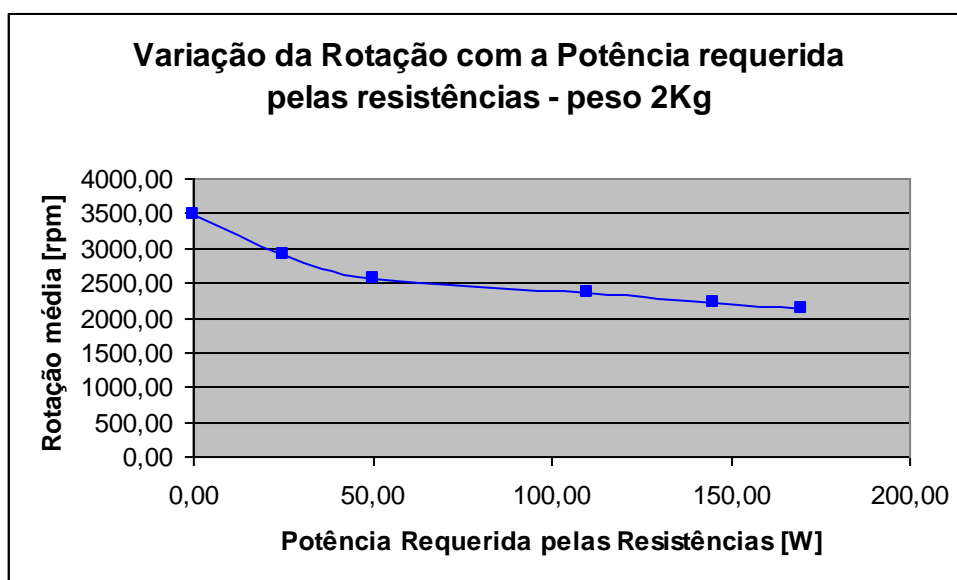


Figura 33 – Gráfico Rotação x Potência requerida pelas Lâmpadas- peso 2Kg

**Rotação Média com motor em curto-circuito: 2133 rpm.**

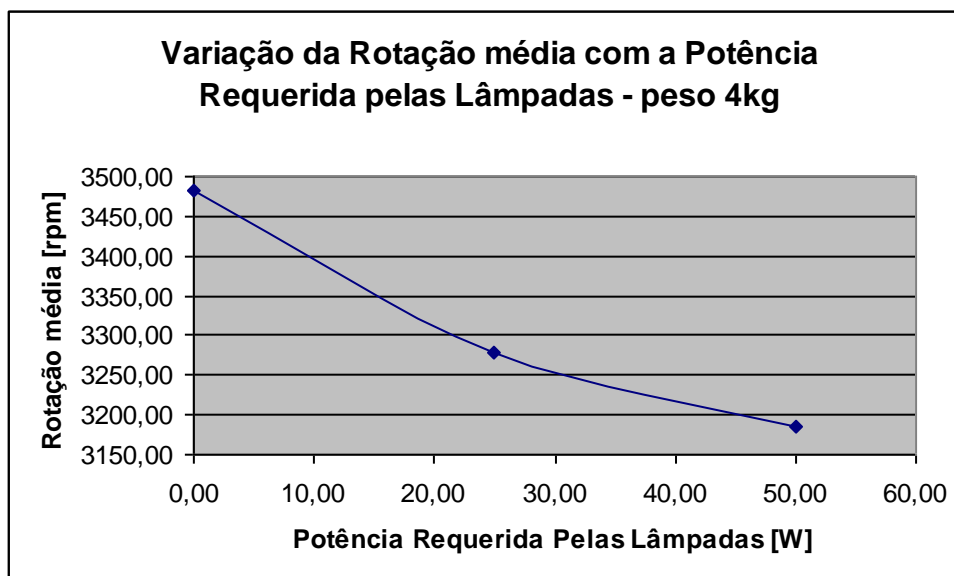


Figura 34 – Gráfico Rotação x Potência requerida pelas Lâmpadas- peso 4Kg

Observa-se que a medida que aumenta a potência requerida pelo circuito ligado ao motor-gerador, a rotação média do motor cai.

Também observa-se uma tendência da rotação média em estabilizar-se na rotação de curto-circuito do motor, para o caso do peso de massa 2 kg, onde foram efetuados maiores quantidades de testes.

### 3.4.2 Potência Aproveitada Estimada

Para analisar a conversão de potência mecânica dissipada em potência elétrica dissipada é necessário identificar as potências dissipadas no sistema:

P<sub>ql</sub>: Potência dissipada em queda livre;

P<sub>imp</sub>: Potência dissipada devido às imperfeições do sistema;

P<sub>c</sub>: Potência dissipada pelas resistências do circuito;

P<sub>qm</sub>: Potência dissipada durante a queda do peso quando este está girando o motor.

Sendo que:  $P_{ql} = P_{imp} + P_c + P_{qm}$

Através dos dados obtidos pode-se levantar o índice de aproveitamento do motor, ou seja, o rendimento do motor. Este rendimento representa em percentual a quantidade de energia mecânica dissipada ou potência mecânica dissipada que foi convertida em potência elétrica dissipada.

Sendo rendimento do sistema calculado como:  $\eta = \frac{P_c}{P_{ql}}$

$$P_{ql} = \frac{MgH}{t}$$

$$P_c = U.I$$

### 3.4.2.1 Rendimento do Sistema para um peso de massa 2 kg.

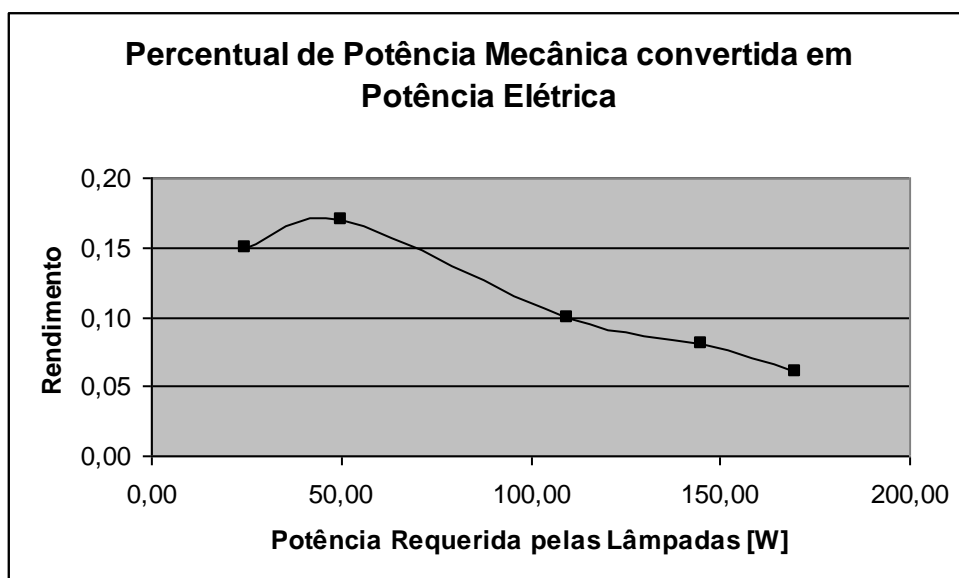


Figura 35 – Gráfico do rendimento de conversão de energia Mecânica em Elétrica- peso 2Kg

Observa-se que a energia mecânica convertida em energia elétrica diminui de acordo com o aumento da potência requerida pelas lâmpadas.

## 4 CONCLUSÃO

O uso de resistências elétricas para reduzir a velocidade do motor foi verificado, mostrando que é possível fazer um controle de velocidade através deste método.

Porém o funcionamento ideal deste tipo de controle de velocidade de motor de corrente contínua seria a conversão total da energia mecânica do sistema em energia elétrica consumida. Em outras palavras o peso suspenso ficaria pendurado, resultado este que não foi alcançado.

Foi verificado também que o sistema possui uma rotação mínima, o que no caso do motor estudado, não pode ser reduzido através de resistências elétricas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] MÁQUINAS ELÉTRICAS E TRANSFORMADORES – Irving I. Kosow, 8º edição,
- [2] MÁQUINAS ELÉTRICAS – conversão de eletromecânica da energia, processo, dispositivos e sistemas-Fitzgerald,A. E.,1979
- [3] MÁQUINAS ELÉTRICAS - M. Kostenko