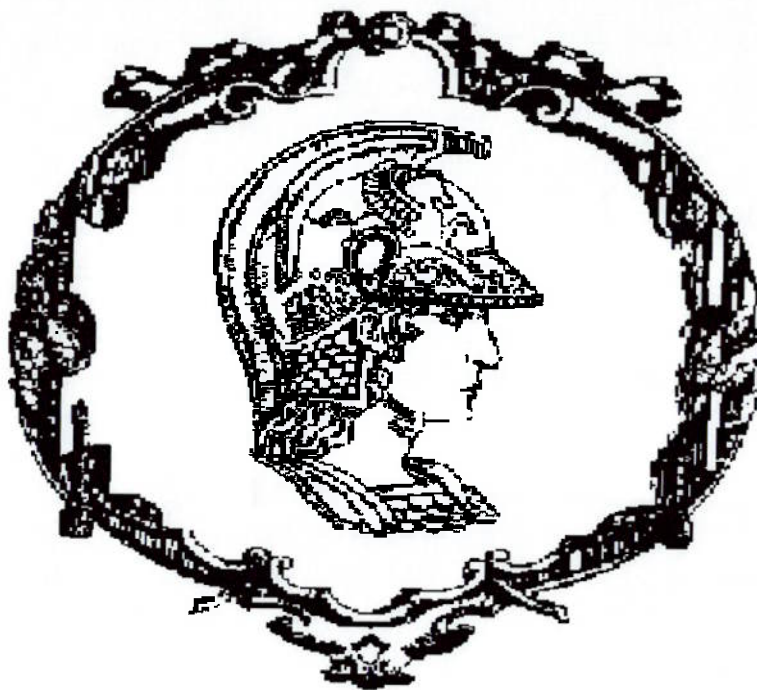


# **ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E  
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

---



**PROJETO DE FORMATURA / 2006  
PRENSA UTILIZANDO ATUADOR LINEAR DE CORRENTE  
CONTÍNUA**

Leonardo Vicente da Silva

PROJETO FORMATURA / 2006



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA/EPUSP



**PROJETO DE FORMATURA / 2006**

**PRENSA UTILIZANDO ATUADOR LINEAR DE CORRENTE  
CONTÍNUA**

**ALUNO:** Leonardo Vicente da Silva

**ORIENTADOR:** José Roberto Cardoso

**CO-ORIENTADORES:** Ivan Eduardo Chabu

Walter Kaiser

**COORDENADOR:** Carlos Márcio Vieira Tahan

São Paulo

RELATÓRIO FINAL – PROJETO FORMATURA / 2006



## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	5
SINOPSE .....	6
ABSTRACT .....	6
1. INTRODUÇÃO .....	7
1.1 Motor linear .....	7
1.2 Construção dos motores lineares .....	8
2. Desenvolvimento .....	10
2.1. Abordagem clássica do projeto de máquinas .....	10
2.2 Determinação das dimensões principais .....	10
2.3 Dimensões da Armadura .....	11
2.4 Dimensões do campo .....	12
2.5 Determinação dos carregamentos magnéticos .....	14
2.5.1 Armadura .....	14
2.5.2 Dente da armadura .....	15
2.5.3 Entreferro .....	15
2.5.4 Campo .....	16
2.5.5 Cálculo da força magneto motriz total .....	16
2.6 Projeto dos enrolamentos (armadura e campo) .....	17
2.6.1 Armadura .....	17
2.6.2 Campo .....	18
3. PROTÓTIPO .....	19
4. RESULTADOS .....	21
5. CONCLUSÕES .....	22
ANEXO A .....	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	24



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a pessoa mais importante na minha vida, minha mãe, que me deu condições para que eu pudesse cursar e terminar a graduação.

Agradeço ao meu amigo Ygor que me ajudou na elaboração do tema deste trabalho. Agradeço muito ao Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu que me ajudou na parte teórica deste projeto, demonstrando os passos que deveriam ser seguidos para o bom funcionamento do protótipo e ao Prof. Dr. Walter Kaiser, que me ajudou na montagem e me cedeu espaço no Laboratório de Eletrônica de Potência para que eu pudesse montar, e posteriormente testar este protótipo. Sem o auxílio destes dois grandes professores provavelmente este trabalho não teria andamento.

Agradeço também ao Prof. Dr. Carlos Márcio Vieira Tahan que foi o coordenador deste projeto a quem se deve, através da sua monitoração e cobrança, o término do trabalho no tempo previsto.



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA/EPUSP

### SINOPSE

Este trabalho tem como objetivo a utilização de um motor linear de corrente contínua de forma tubular, atuando como prensa com a finalidade de vincar papéis. Este modelo não necessita de comutador nem de escovas para seu funcionamento, devido à pequena excursão do êmbolo diminuindo custos na sua elaboração. A utilização deste motor substitui a de outros motores já existentes no mercado para tais fins, os quais, em sua maioria são atuadores mecânicos que trabalham através de engrenagens a fim de produzir movimento linear. Este trabalho tem por motivação a utilização deste motor em uma fábrica de encadernação térmica evitando a terceirização deste serviço.

### ABSTRACT

This work aims to present an use of a tubular direct-current linear engine form acting as presses with the purpose to wrinkle papers. This model does not need commutators or brushes for its functioning, due the small excursion of the piston reducing costs in its elaboration. The use of this engine substitutes the use of other effective engines already in the market for such ends, which in its majority are mechanical actuators that act through gears to produce vertical line move.

The motivation of this work is to include this engine in the plant of thermal bookbinding where this work is done for other companies.



## 1. INTRODUÇÃO

O estudo do eletromagnetismo Halliday[1], começou com a descoberta em uma região da Ásia Menor de rocha conhecida como magnetita composta de óxido de ferro com propriedades de atrair outros materiais ferromagnéticos.

Depois desta descoberta começou-se a pesquisar mais sobre a ação destes materiais sobre outros e neles mesmo.

A ação atrativa e repulsiva originada na vizinhança de materiais magnéticos fascinava o homem desde a descoberta da magnésia.

Posteriormente em 1820, Hans C. Oersted detectou através de uma bússola que a passagem de corrente elétrica em um fio produzia efeito magnético. O efeito do campo magnético sobre uma corrente elétrica pode ser utilizado para a obtenção de trabalho mecânico e é nesta teoria que se baseia o funcionamento do motor linear proposto neste trabalho.

### 1.1 Motor linear

O motor linear é uma máquina elétrica que através da conversão eletromagnética produz movimento em linha reta não existindo contato mecânico entre o indutor e o induzido. Devido a esta característica este motor é conveniente para trabalhos específicos apresentando diversas vantagens nas relações torque-volume, torque-peso em comparação com as máquinas rotativas convencionais.

O conceito dos motores lineares já data de mais de 160 anos e a primeira proposta foi patenteada em 1841 por Wheatstone.

Foi em 1917 que se teve notícia do primeiro protótipo do motor linear, conhecido como “Canhão de Birkeland”, onde um projétil de ferro era atraído por uma sequência de bobinas através da comutação de corrente contínua entre elas.

Os motores lineares são classificados quanto a sua alimentação podendo ser de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (AC). Dentre os motores lineares de corrente alternada temos o motor linear síncrono (com ou sem enrolamento de campo), motor linear de relutância e o motor linear de indução, cuja patente foi dada em 1890.

Os motores lineares de indução (MLI) são modelados de várias maneiras, cada um com sua característica e utilização própria. Estes são os mais empregados no mercado, pois não necessitam de enrolamento no secundário proporcionando maior robustez e confiabilidade aos mesmos. Abaixo, na Figura 1 são mostrados alguns destes tipos de motores existentes.



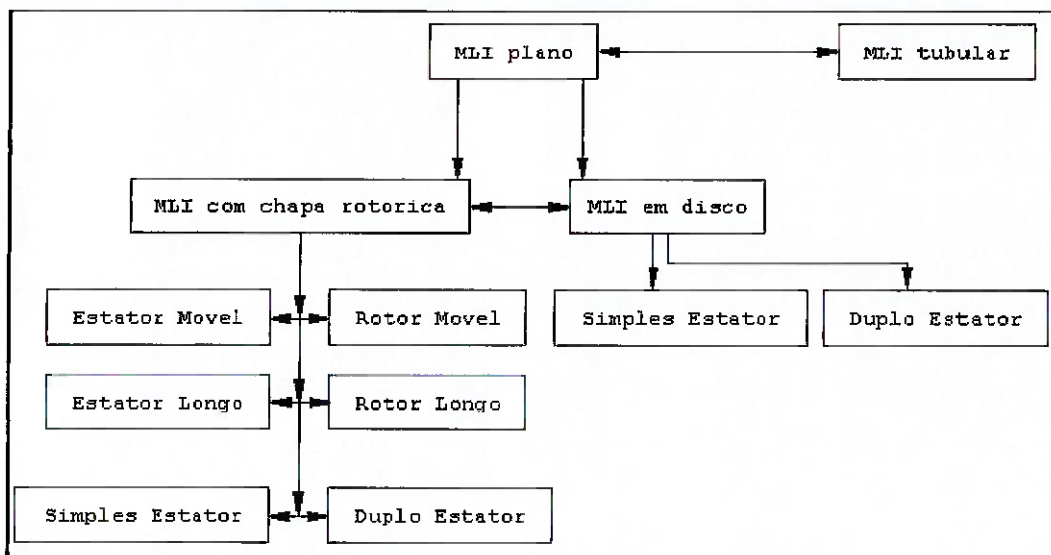


Figura 1 - Motor linear quanto à classificação geométrica

Os motores lineares de corrente contínua são análogos aos motores rotativos apresentando tanto a peça de armadura como a de campo. Normalmente a peça de campo é móvel e a armadura é fixa, servindo geralmente como esteiras transportadoras.

Para percursos muito pequenos utiliza-se de forma inversa, deixando o campo fixo e a armadura móvel.

## 1.2 Construção dos motores lineares

“O número de motores lineares vendidos na Europa quadruplicará até 2008”, de acordo com Technology news, novembro de 2002.

O motor linear pode ser obtido através de uma transformação geométrica do motor rotativo. Para tanto se devem seguir os seguintes passos:

Considere-se um motor rotativo com um rotor constituído por dois pólos, tal como se observa na etapa 1 da figura 2. Como analogia ao motor rotativo podemos dizer que o motor linear é obtido cortando-se um motor rotativo da sua periferia para o centro, etapa 2, e depois desenrolado, etapa 3.

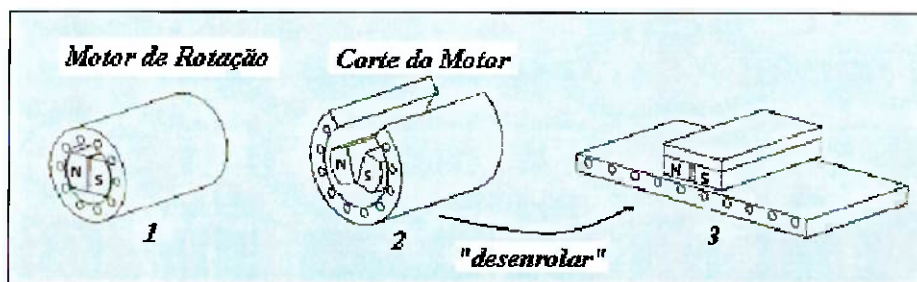


Figura 2 - Modelando um motor linear



Para que se chegue ao motor linear tubular, utilizado neste projeto, na etapa 3 da figura 1, o primário deve ser fechado na direção perpendicular ao movimento formando um tubo conforme visto na figura 3.

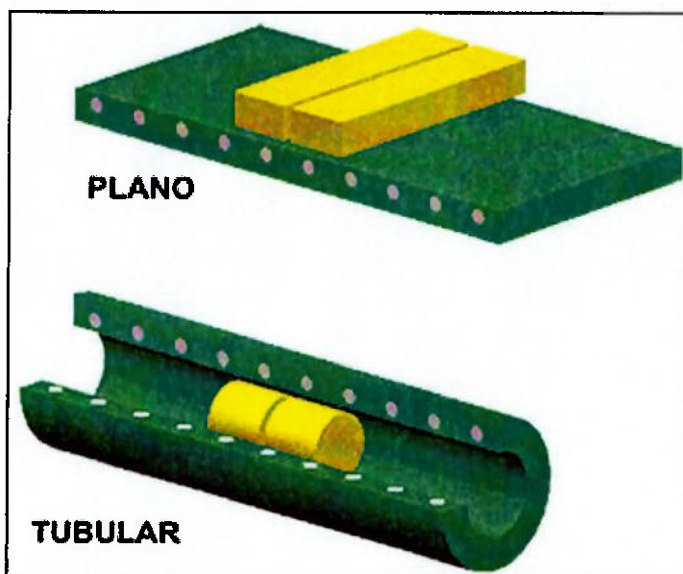


Figura 3 - Motor linear tubular

As diferenças entre os motores lineares tubulares e planos são dadas sob os seguintes aspectos mostrados na Tabela 1:

Tabela 1 Diferenças entre motores lineares planos e tubulares

Motor plano	Motor tubular
Armadura longa	Armadura curta
Armadura fixa	Armadura móvel
Armadura simples	Armadura dupla
Campo simples	Campo duplo
Fluxo longitudinal	Fluxo transversal





## **2. Desenvolvimento**

Inicialmente pensou-se em projetar a prensa utilizando um motor trifásico, de modo a desenvolver um motor linear de indução tubular seguindo como modelo um projeto desenvolvido no departamento de eletromagnetismo da USP (LMAG), cujo autor é o Bernardo Pinheiro de Alvarenga [2], utilização de tal modelo acarretaria uma maior complexidade e um custo mais elevado para o desenvolvimento do protótipo, optando-se então em utilizar um modelo de motor linear, também tubular, mas alimentado em corrente contínua.

Este modelo é baseado em um atuador desenvolvido por Green and Paul em 1969 e pode ser utilizado apenas para deslocamentos limitados no sentido longitudinal não necessitando de comutadores nem de escovas.

Neste modelo o enrolamento é invertido no meio da armadura para que a força aplicada sobre esta esteja no mesmo sentido e direção nos dois pólos do atuador.

### **2.1. Abordagem clássica do projeto de máquinas**

As técnicas de projetos de máquinas elétricas são antigas e estão consolidadas desde a década de 1970, quando surgiram as primeiras aplicações dos métodos numéricos nesta área.

Kuhlmann [3], cuja primeira edição data de 1930, apresenta procedimentos sistematizados para o projeto de motores, geradores e transformadores.

Alguns destes procedimentos listados abaixo serão utilizados neste projeto:

- determinação das dimensões principais;
- determinação dos carregamentos magnético e elétrico;
- projeto da sapata polar e da forma de onda do fluxo no entreferro;
- cálculo do circuito magnético;
- projeto do enrolamento de armadura;
- cálculo da reação de armadura, reatâncias de dispersão e síncrona;
- cálculo das perdas, eficiência e aquecimento.

Não faz parte deste trabalho o projeto da sapata e a elaboração dos dois últimos passos, pois não se tem por objetivo um estudo de otimização na construção do motor linear deste protótipo.

### **2.2 Determinação das dimensões principais**

As dimensões são calculadas de forma a não sobrecarregar nem o enrolamento de campo fixo nem o da armadura, a fim de se conseguir a força desejada no êmbolo. Para tanto os seguintes passos foram utilizados:



- Adota-se um valor de campo com valor baixo que percorrerá o centro da armadura.
- Calcula-se o fluxo magnético, que é fixo para todas as regiões.
- Com o valor do fluxo calculam-se as demais dimensões, de modo que se tenha um campo magnético com valor abaixo de 1,8T, pois acima deste valor sobrecarregamos os enrolamentos, ou seja, a relação (força/corrente).

### 2.3 Dimensões da Armadura

A armadura tem comprimento A, composta de N ranhuras que estão dispostas ao longo desta como mostra a Figura 4. Cada ranhura apresenta D de altura e C de profundidade, separada de uma distância E uma da outra (passo). Como o circuito magnético apresenta simetria radial, está representada apenas sua metade superior de raio B. Seguindo o Sistema Internacional, estas medidas são dadas em milímetros. Foi utilizada uma armadura composta por ranhuras para poder acumular um maior número de bobinas em um mesmo espaço ao invés de uma armadura lisa.

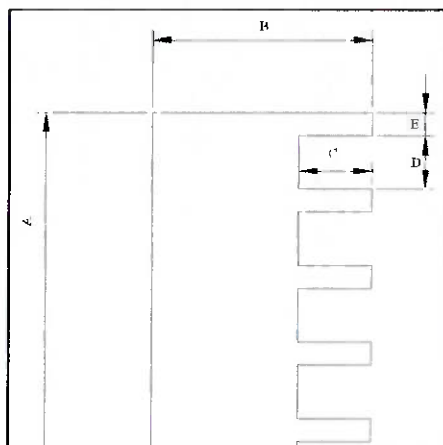


Figura 4 - Dimensionamento da armadura

Fluxo magnético (1) é dado pela seguinte fórmula:

$$\phi = B \times A \quad (1)$$

Onde:

B é o vetor campo magnético

A é a área na seção atravessada pelo campo magnético

Na Tabela 2 abaixo temos o dimensionamento da armadura:



Tabela 2: Tamanho da armadura

Medida	Valor	Unidade
A	303	mm
B	42,5	mm
C	10	mm
D	7	mm
E	3	mm

## 2.4 Dimensões do campo

Deve-se também dimensionar o campo gerado através da bobina externa ao êmbolo, que está alojada na ranhura da estrutura tubular exterior, mostrada na Figura 5.

O local na qual será alojada a bobina possui A de altura com B de profundidade, valores dados em milímetros. É necessário realçar que estas medidas devem ser coerentes com o número de espiras desejado, levando-se em consideração a bitola do fio. A bobina geradora de campo deve possuir um raio interno (E - D) maior que o raio da armadura, para que esta caiba no seu interior. A carcaça tem altura total C. A diferença da altura da armadura (A) em relação a altura da carcaça (C) é a distância percorrida pelo êmbolo (A-C).

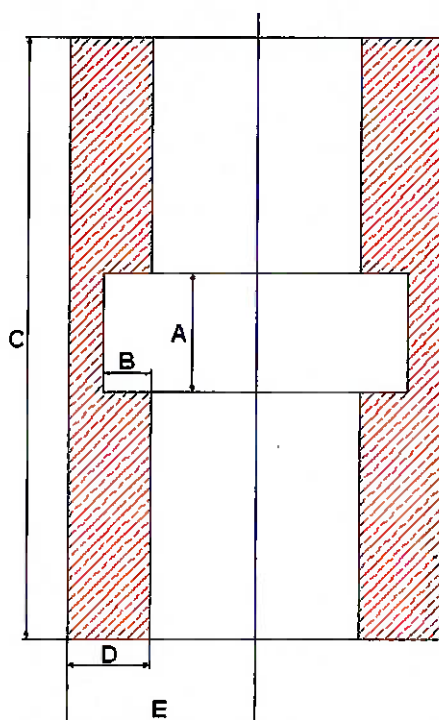


Figura 5 - Peça de campo

Na Tabela 3 temos o dimensionamento da peça de campo:



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA/EPUSP

Tabela 3: Dimensionamento do Campo

Medida	Valor	Unidade
A	50	mm
B	20	mm
C	250	mm
D	39	mm
E	82,5	mm

Para análise inicial foi pré-definido um campo magnético de 1,8T, o qual deve ser coerente com o material magnético utilizado a fim de não sobrecarregá-lo.

Dado este campo, o fluxo foi calculado na região central da armadura, no sentido vertical. Esta região tem uma seção de área com raio igual a B – C (Figura 4).

$$\phi = 1,8 \times \pi \frac{(0,065)^2}{4} = 5,97 \text{ mWb}$$

Este valor de fluxo foi arredondado para 6,0 mWb.

Com o valor deste fluxo, definido como constante, é possível calcular o vetor campo magnético nas demais regiões da peça. A Figura 6 mostra o caminho (l) percorrido pelo o fluxo magnético na peça tubular.

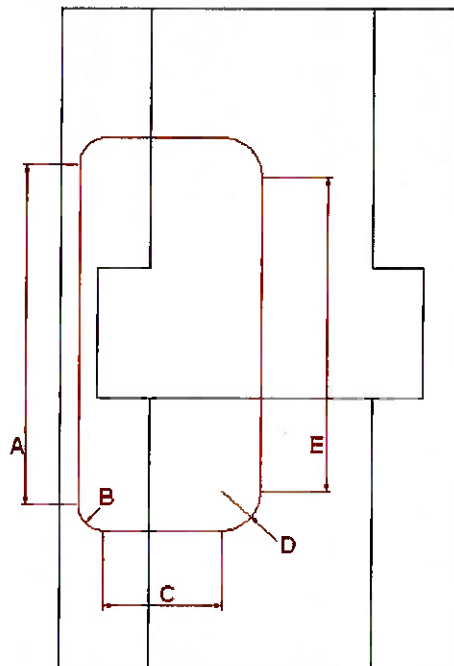


Figura 6 - Caminho percorrido pelo fluxo magnético

Na Tabela 4 estão mostradas as medidas do percurso do fluxo magnético, sendo que na região C o fluxo passa através da armadura, passado pelo entreferro e chegando a região de campo:



Tabela 4 Percurso do Fluxo Magnético

Medida	Valor	Unidade
A	130	mm
B	10	mm
C	45	mm
D	15	mm
E	120	mm

Com os valores do vetor campo magnético (2), calculados para cada região na peça, é possível encontrar o valor da intensidade de campo magnético  $H$  através da curva de magnetização  $B \times H$  do material ferromagnético utilizado na construção do motor, cuja unidade é  $[A/cm]$ .

$$B = \mu \times H \quad (2)$$

Onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material e a causa da não linearidade da mesma Boffi [4].

Nas regiões onde o fluxo faz curva, estimados pelos raios B e D na Figura 6, o vetor campo magnético foi calculado utilizando como seção de área de passagem metade do percurso no sentido vertical e a outra metade no sentido horizontal.

Com os valores da intensidade do campo magnético  $H$ , é calculado a força magneto motriz (3) de cada elemento através da seguinte fórmula:

$$F_{mm} = H \times l \quad (3)$$

## 2.5 Determinação dos carregamentos magnéticos

### 2.5.1 Armadura

Como já mencionado, na região horizontal temos  $B = 1,8T$ , com fluxo magnético de  $6,0 \text{ mWb}$ . Para tal campo, através da tabela de  $B \times H$  encontramos  $H = 74,6 \text{ A/cm}$ .

Na região horizontal, ou seja, percorridas na direção de C da Figura 6, temos:

$$\begin{aligned} \phi &= B \times A \rightarrow 0,006 = B \times \pi(0,065 \times 0,1) \\ B &= 0,3T \end{aligned}$$

Onde  $0,1$  é o comprimento em metros de cada passo polar (ANEXO A) do motor.

Da tabela, para um campo magnético de  $0,3 \text{ Tesla}$  temos uma intensidade de campo magnético de  $2,17 \text{ A/cm}$ .



### 2.5.2 Dente da armadura

Também é necessário calcular a FMM no dente da armadura, mas para isto, devido sua complexidade utiliza-se uma maneira simplificada para a aproximação da densidade de fluxo a uma distância  $C/3$ , Figura 4, do dente.

Seu diâmetro é medido da seguinte forma:

$$D = 65 + 2 \times \frac{10}{3} = 71,67 \text{ mm}$$
$$\phi = B \times A \rightarrow 0,006 = B \times \pi(0,07167 \times 0,003 \times 10)$$
$$B = 0,9 \text{ T}$$

Onde 0,003 metros é a altura do dente, sendo que cada passo polar apresenta 10 dentes. Para este valor de campo magnético temos uma intensidade de campo  $H$  de 4,8 A/cm.

### 2.5.3 Entreferro

Como o fluxo magnético fica mais denso na região do entreferro, observa-se que o entreferro efetivo é maior que o entreferro nominal. Para isto devemos utilizar o fator de Carter (4) Zanetti [5] expresso pela fórmula abaixo:

$$K_{gs} = \frac{\pi}{\pi - br(1 - \delta_s)} \quad (4)$$

Onde:

$\pi$  é o passo da ranhura

$br$  é a largura da ranhura

$\delta_s$  é o coeficiente de Carter

O cálculo da  $F_{mm}$  (5) nesta região é expresso pela fórmula:

$$F_{mm} = \frac{2 \times B_g \times l_g}{\mu_0} \quad (5)$$

Onde:

$B_g$  é o vetor campo magnético que atravessa o entreferro

$l_g$  é o comprimento do entreferro

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética no ar

Para um entreferro ( $l_g$ ) de diâmetro igual 1 mm temos:

$$\phi = B \times A \rightarrow 0,006 = B \times \pi(0,085 \times 0,003 \times 10)$$
$$B = 0,75 \text{ T}$$





Onde, 0,003 metros é a altura do dente, sendo que cada passo polar apresenta 10 dentes.

O fator de Carter calculado é de 2,06. Este valor é multiplicado pela FMM no entreferro gerada pelo campo que fará circular o fluxo magnético de 0,006Wb pelo motor.

### 2.5.4 Campo

Região vertical, ou seja, sentido de A na Figura 5.

$$\phi = B \times A \rightarrow 0,006 = B \left[ \pi \left( \frac{0,165^2}{4} \right) - \pi \left( \frac{0,124^2}{4} \right) \right]$$

$$B = 0,65T$$

Para este valor de campo magnético temos uma intensidade de campo H de 3,42 A/cm.

Na região horizontal, ou seja, no sentido de C da Figura 5 temos:

$$\phi = B \times A \rightarrow 0,006 = B \times \pi(0,86 \times 0,1)$$

$$B = 0,22T$$

Onde 0,1 é o comprimento em metros de cada passo polar do motor.  
Para este valor de campo magnético temos uma intensidade de campo H de 1,88 A/cm.

### 2.5.5 Cálculo da força magneto motriz total

De acordo com a fórmula já apresentada,  $F_{mm} = H \times l$ , podemos calcular a força magneto motriz de todo o motor necessário para se conseguir um fluxo circulante de 0,006 Wb, já que calculamos as intensidades de campo em todas as regiões, e também podemos calcular os caminhos (l) no qual este campo irá circular. Este método de cálculo é um aproximado, pois para termos as distâncias percorridas e as intensidades magnéticas reais teríamos que utilizar uma matemática computacional utilizando os métodos dos elementos finitos.

$$l(\text{armadura vertical}) = 120 + \frac{1}{4}(2 \times \pi \times 15) = 143,6mm$$

$$l(\text{armadura horizontal}) = 17,5 \times 2 + \frac{1}{4}(2 \times \pi \times 15) = 58,6mm$$

$$l(\text{campo vertical}) = 130 + \frac{1}{4}(2 \times \pi \times 10) = 145,7mm$$



$$l(\text{campo horizontal}) = 20 \times 2 + \frac{1}{4}(2 \times \pi \times 10) = 55,7 \text{ mm}$$

$$l(\text{entreferro}) = 0,5 \text{ mm radial.}$$

$$l(\text{dente}) = \frac{10}{3} = 3,33 \text{ mm}$$

Então a força magneto motriz de cada região será:

$$F_{mm}(\text{armadura vertical}) = 74,6 \times 14,36 = 1071,2 \text{ [A x espiras]}$$

$$F_{mm}(\text{armadura horizontal}) = 2,17 \times 5,86 = 12,7 \text{ [A x espiras]}$$

$$F_{mm}(\text{campo vertical}) = 3,42 \times 14,57 = 49,8 \text{ [A x espira]}$$

$$F_{mm}(\text{campo horizontal}) = 1,88 \times 5,57 = 10,5 \text{ [A x espira]}$$

$$F_{mm}(\text{dente armadura}) = 4,8 \times 0,33 = 1,6 \text{ [A x espira]}$$

$$F_{mm}(\text{entreferro}) = \frac{2 \times 0,75 \times 0,5 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 10^{-7}} = 596,8 \text{ [A x espira]}$$

Este valor deve ser multiplicada pelo fator de Carter que vale 2,06, ou seja, a  $F_{mm}$  do entreferro vale 1229,4 [A x espira].

Tabela 5 Distribuição da FMM

REGIÃO	FMM(AxEspira)
ARMADURA	1083,9
CAMPO	60,3
DENTE	
ARMADURA	1,6
ENTREFERRO	1229,4
FMM(total)	2375,2

## 2.6 Projeto dos enrolamentos (armadura e campo)

### 2.6.1 Armadura

As ranhuras da armadura devem conter as dimensões necessárias para que se aloje no seu interior o número de espiras desejado a fim de se conseguir impor força ao êmbolo.

É através do valor do campo no entreferro e da corrente que circula nos enrolamentos da armadura que se calcula a força (6) expressa em Newton (N) que o motor irá impor através da fórmula:

$$F = i(L \times B_g) \times N \quad (6)$$

Onde,

$i$  é a corrente que passa pelo enrolamento da armadura

$N$  é o número de espiras da armadura

$L$  é o comprimento de uma volta na armadura



Deve-se também considerar a bitola do fio que será utilizado tanto para o dimensionamento das ranhuras como também para suportar a corrente imposta na armadura.

O fio previsto, tanto para a armadura quanto para o campo, foi o de bitola #18AWG, cujo diâmetro total se aproxima de 1mm e 0,82mm sem o isolante.

O comprimento do fio em cada volta dada na armadura vale:

$$L(\text{fio}) = \pi \times D_{\text{médio}}(\text{armadura}) \rightarrow L(\text{fio}) = \pi \times 0,075 = 0,235m$$

Como cada ranhura apresenta 10 mm de comprimento e 7 mm de altura, descontando o espaço do isolante utilizado para revestir as ranhuras foram estimadas 50 espiras enroladas em cada ranhura da armadura. Como o motor é formado por dois pólos e cada passo polar apresenta 10 ranhuras, temos um total de 1000 espiras atuantes.

De acordo com a fórmula (6) temos que a força aplicada será:

$$F = i(0,235 \times 0,75 \times 1000) = 176,25 \times i [\text{Newtons}]$$

### 2.6.2 Campo

Na peça de campo, temos como espaço para o enrolamento das espiras 20 mm de comprimento e 50 mm de altura. Também devemos descontar o isolante que reveste esta bobina, supondo-se que se conseguiria enrolar um total de 900 espiras.

A força magneto motriz total (FMM<sub>total</sub>) calculada foi de 2375,2 [A.espiras].

Então, para que se chegue ao valor de 1,8 Tesla de fluxo passando pela armadura central, devemos impor uma corrente de:

$$i(\text{campo}) = \frac{2375,2}{900} = 2,64A$$



### 3. PROTÓTIPO

Na Figura 7 é possível observar a construção do protótipo da armadura.

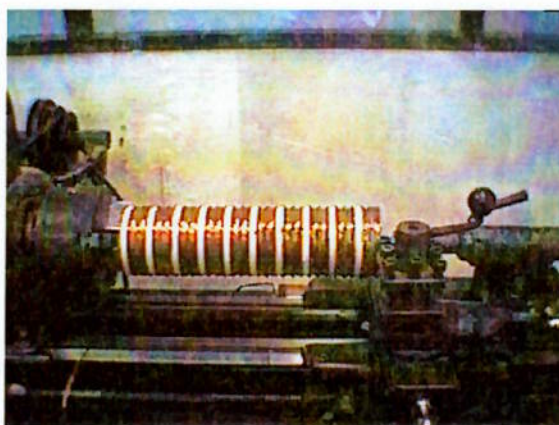


Figura 7 - Montagem da Armadura

Na armadura foram enroladas 40 espiras em cada uma das 30 ranhuras existentes, em sentidos contrários dividindo-se em 15 ranhuras enroladas num sentido e as outras 15 no sentido inverso. As listras brancas são esparadrapos que foram colocados a fim de segurar os enrolamentos para que não se soltassem durante a montagem. Posteriormente foram afixadas duas resinas contornando a armadura, servindo como anéis, para que não se tivesse contato direto entre a armadura e a peça de campo.

Com esta configuração a força aplicada é calculada abaixo:

$$F = i(0,235 \times 0,75 \times 800) = 141 \times i [\text{Newtons}]$$

Na Figura 8 é possível observar o protótipo da peça de campo:



Figura 8 - Protótipo da peça de campo



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA/EPUSP

Esta peça é composta por duas outras que são conectadas através de parafusos que podem ser observados no anel em volta da Figura 8. Isto ocorre, devido a necessidade de se incluir a bobina de campo ao seu interior. Foram enroladas 812 espiras nesta única bobina de modo que a corrente de campo necessária para se conseguir um fluxo magnético de 0,006Wb na região central da armadura é:

$$i(\text{campo}) = \frac{2375,2}{812} = 2,92A$$

O motor montado, com a armadura sendo envolvida pelo campo, pode ser visto na Figura 9:



Figura 9 - Motor montado





#### 4. RESULTADOS

Durante os testes utilizaram-se duas formas para de isolar o indutor do induzido, ou seja, a armadura da peça de campo. Na primeira utilizaram-se dois anéis de bronze, um colocado na parte superior, e outro, na parte inferior da armadura. Estes anéis eram fixados através de pressão, ou seja, para anexá-los esquentaram-se estes anéis e com o resfriamento dos mesmos estes se fixavam na armadura. Com o uso destes anéis o motor funcionou por um breve período de tempo, pois depois de alguns testes houve o deslocamento de um destes anéis sobre o outro. Provavelmente devido ao aquecimento do motor, houve dilatação desprendendo o anel do material. Isto levou à utilização de outra forma para separar as duas partes do motor.

A segunda forma foi utilizar uma resina que por ser maleável se encaixava nas ranhuras da armadura fazendo com que ficasse mais firme, ou seja, de modo a não escorregar ou “caminhar” sobre a armadura. Esta é a solução encontrada e que está implantada no protótipo.

Nos testes foram necessários excitar a peça de campo com uma corrente de 4[A] e a armadura com corrente de 5[A] para que se conseguisse levantar o êmbolo, ou seja, pelo menos os 85N, peso da armadura.

Esta diferença entre os valores calculados, 3A para armadura e 1A para o campo, e os valores aplicados pode ser atribuída ao método simplificado do cálculo da distância percorrida pelo campo magnético ao longo do motor. Tal diferença pode também ser atribuída ao cálculo do campo magnético que atravessa o entreferro, que devido a geometria das ranhuras foram também utilizados métodos simplificados de arredondamento. Deve-se também levar em consideração o atrito estático e dinâmico no êmbolo.



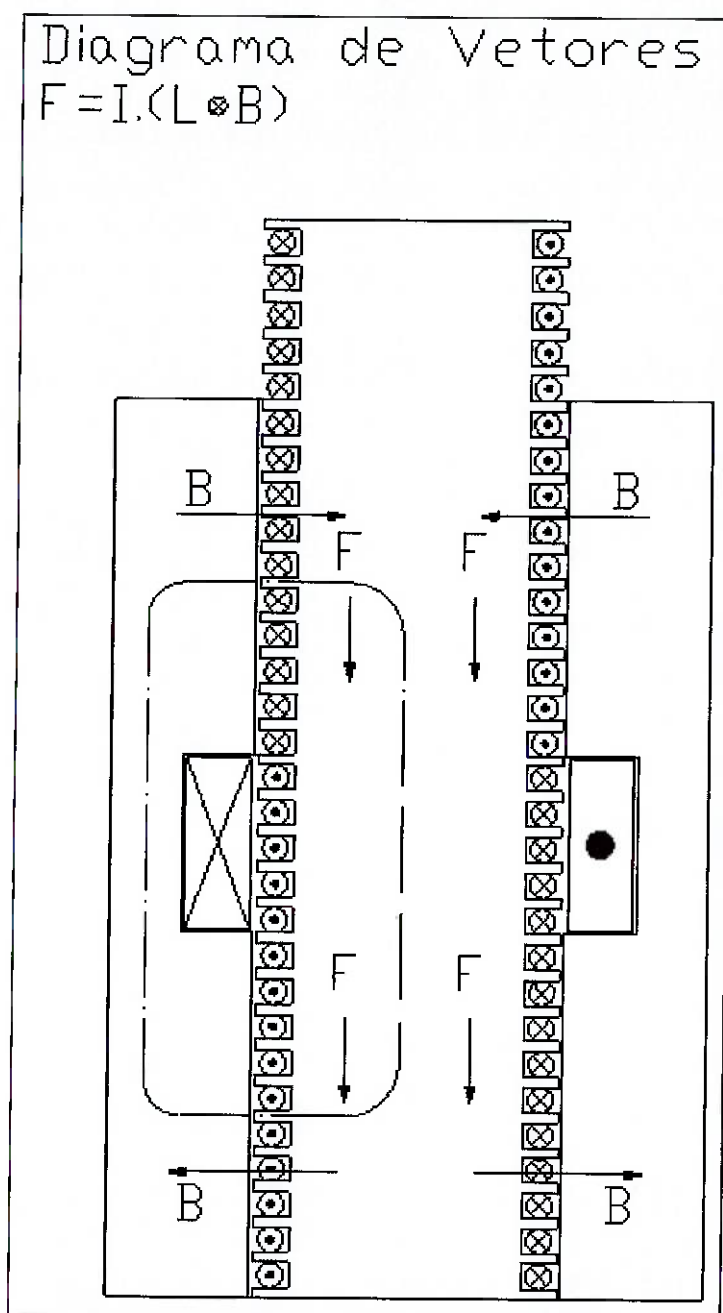


## **5. CONCLUSÕES**

A utilização de um motor linear de corrente contínua serviu aos propósitos do projeto que era de criar vincos em papéis. Sua escolha devido ao baixo custo e também a baixa potência consumida, além da facilidade do controle da força exercida pelo êmbolo através de corrente tanto de campo como de armadura, também foram decisivos para a sua escolha.



## ANEXO A





## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] HALLIDAY, D. e Resnick, R. *Física 3*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994.
- [2] ALVARENGA, Bernardo Pinheiro de, Proposta de aplicação de motor de indução linear tubular na extração de petróleo, ed.rev. – São Paulo, 2004,168p.
- [3] KUHLMANN, John, Design of Electrical Apparatus. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, 1940.
- [4] BOFFI, Luiz V., Conversão eletromecânica de energia, 1977.
- [5] ZANETTI, Adriano, Atuador Linear de Corrente Contínua: Projeto Formatura pelo Departamento de Engenharia de Energia e Automação da Universidade de São Paulo, 2004.