



**UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL**  
**PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



**CARLOS ALBERTO ALVES**

**ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR LINEAR DE**  
**INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Canoas, Dezembro de 2010



**CARLOS ALBERTO ALVES**

**ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR LINEAR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Elétrica da ULBRA como um  
dos requisitos obrigatórios para a obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista

**Departamento:**

Engenharia Elétrica

**Área de Concentração**

Conversão Eletromecânica de Energia  
Elétrica

**Professor Orientador:**

Dra. Eng. Eletr. Marília Amaral da Silveira- CREA: RS050909-D

Canoas, 2010



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome do Autor:** Carlos Alberto Alves

**Matrícula:** 032006449-2

**Título:** Estudo e Construção de um Motor Linear de Indução Trifásico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

**Professor Orientador:**

Dra. Eng. Eletr. Marília Amaral da Silveira

CREA-RS: RS050909-D

**Banca Avaliadora:**

MSc. Eng. Eletr. André Luis Bianchi

CREA-RS: RS89.197

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. Miriam N. Cáceres Villamayor

CREA-RS: 067231-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

**Assinaturas:**

---

Autor  
Carlos Alberto Alves

---

Orientadora  
Marília Amaral da Silveira

---

Avaliador  
André Luis Bianchi

---

Avaliador  
Miriam N. Cáceres Villamayor

Relatório Aprovado em:



## **DEDICATÓRIA**

Dedico a aos meus pais Renê e Teresinha.



## **AGRADECIMENTOS**

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Aos professores da ULBRA pelo estímulo, em especial, ao professor André Luis Bianchi e às professoras Marília Amaral da Silveira e Miriam Noemi Cáceres Villamayor pela dedicação e esforço pessoal proporcionado principalmente durante o período de estágio e Trabalho de Conclusão de curso em Engenharia Elétrica.

Aos colegas Ely Cristófoli, Ricardo Masiel, Ricardo Marin, Gilmar Zwirtes e Jackson Popsin pelas valiosas sugestões durante a graduação.

A minha esposa pela motivação para continuar sempre, mesmo com todas as adversidades.

Ao Professor Luis Fernando Espinosa Cocian pela prestatividade e disposição para atendimento a todos os alunos.



## **EPÍGRAFE**

*Você faz suas escolhas e suas escolhas fazem você.*

*Steve Backman*



## RESUMO

ALVES, Carlos Alberto, Estudo e Desenvolvimento de um Motor Linear de Indução Trifásico. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2010.

Motores lineares são dispositivos que possuem um estator e um componente móvel capaz de produzir movimento linear. Para a aplicação em processos que necessitam de deslocamento linear, com uma operação silenciosa e reduzida manutenção, os motores lineares constituem uma importante alternativa. O presente trabalho apresenta o estudo e o desenvolvimento de um motor linear de indução trifásico, composto de um enrolamento trifásico localizado no estator, e de uma placa plana de alumínio, conectada mecanicamente a um sistema composto por rodas e trilhos, que permitem seu deslocamento linear. O motor linear foi projetado, simulado, construído e testado. As simulações permitiram analisar o comportamento da distribuição do fluxo magnético produzido pelas bobinas do enrolamento trifásico da armadura, e, assim, utilizar a melhor configuração para o arranjo das bobinas. O motor foi testado com o objetivo de identificar suas principais características de operação. Foram realizados ensaios para a verificação do comportamento da corrente fornecida pela fonte em função da tensão aplicada e da força estática de propulsão produzida sobre a placa de alumínio. Os resultados dos ensaios mostraram que a força de propulsão produzida pelo motor, com tensão nominal de 220V é igual a 0,47 N, para uma corrente de 2,4 A, resultando em uma sensibilidade de 0,19N/A.

**Palavras chave:** motor linear, simulação, força eletromagnética.



## **ABSTRACT**

Alves, Carlos Alberto. Study and Development of a Tri-Phasic Induction Linear Motor. Work of Conclusion of Course in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2010.

Linear motors are devices that have a stator and a mobile device capable of producing linear motion. When it's require application in linear process displacement, with a silent operation and reduced maintenance. Linear motors are an interesting solution. This paper presents the study and development of a linear induction motor three-phase, consisting of a three-phase winding located in the stator, and a slab of aluminum, mechanically connected to a system composed of wheels and rails, allowing for linear displacement. The linear motor was designed, simulated, built and tested. The computer simulations analyzed the behavior of the magnetic flux distribution produced by the armature phase winding coils, which led to an optimal configuration for the coils arrangement. The linear motor was tested with the aim of obtaining their operating characteristics. Tests showed the behavior of the applied current and the resulting thrust force produced on an aluminum plate. Tests showed that the thrust produced by the engine, with rated voltage is equal to 0,47N, for a current of 2,4A, resulting in a sensitivity of 0,19N/A.

Keywords: linearmotor, simulation, electromagneticforce.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito magnético.....	04
Figura 2 – Ciclo de histerese.....	10
Figura 3 – Etapas de técnica de análise numérica pelo MEF.....	11
Figura 4 – Corte lateral do motor de indução trifásico.....	12
Figura 5 – Princípio do Motor linear tubular de relutância.....	15
Figura 6 – Visualização didática do motor linear de indução.....	15
Figura 7 – Diagrama de blocos do projeto desenvolvido.....	17
Figura 8 – Protótipo desenvolvido em 05/04/2010.....	18
Figura 9 - Protótipo desenvolvido em 02/05/2010.....	19
Figura 10- Protótipo testado em 05/08/2010.....	19
Figura 11- Dimensões do Protótipo.....	20
Figura 12 - Dimensões da bobina utilizada.....	21
Figura 13 - Modelo completo para simulação do comportamento do campo magnético: (a) do motor de indução linear com 6 bobinas, (b) um dos núcleos ampliado .....	22
Figura 14- Condições de fronteira do modelo.....	23
Figura 15- Malha do modelo em estudo.....	23
Figura 16 - Correntes instantâneas trifásicas.....	24
Figura 17 - Distribuição do campo magnético para: (a) $wt = 0$ , (b) $wt = \pi/3$ , (c) $wt = 2\pi/3$ , (d) $wt = \pi$ , (e) $wt = 4\pi/3$ , e (f) $wt = 5\pi/3$ .....	25
Figura 18 - Mapeamento em cores da densidade de fluxo magnético.....	27
Figura 19 - Pontos onde foram calculados os valores da componente y do vetor densidade de fluxo magnético.....	27
Figura 20 - Comportamento do campo magnético viajante para as posições 2, 4 e 6, figuras (a), (b) e (c), respectivamente.....	28
Figura 21 – Método da medição de força: (a) com utilização de célula de carga (b) com a utilização de peso.....	29
Figura 22 - Célula de carga utilizada para medição de força no MLI.....	30
Figura 23 - Medição de massa com balança digital .....	32
Figura 24 - Indicação na tela do microcomputador.....	32
Figura 25 - Myplab: Módulo de aquisição de variáveis analógicas.....	33
Figura 26 - Conexões possíveis no módulo de aquisição.....	34



Figura 27 – Circuito implementado para estimativa de tempo.....	35
Figura 28 - Arranjo em estrela para cada conjunto de 3 bobinas.....	36
Figura 29 - Arranjo em triângulo para cada conjunto de 3 bobinas.....	38
Figura 30 – Posições para medição de força no protótipo.....	39
Figura 31 - Gráfico da tensão aplicada em função da força média produzida.....	40
Figura 32 – Medições em milivolts, função da deformação na célula de carga.....	40
Figura 33 - Protótipo completo, concluído em 23/11/2010.....	41
Figura 34 – Gráfico da medição de tempo para deslocamento no MLIT (a) com tensão de 220V (b) com tensão de 140V.....	42
Figura 35 – Gráfico da velocidade média em função da tensão aplicada.....	43



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Analogia entre grandezas elétricas e magnéticas .....	5
Tabela 2 – Características construtivas do protótipo.....	20
Tabela 3 – Medições com alimentação em estrela.....	37
Tabela 4 – Medições com alimentação em triângulo.....	38
Tabela 5 – Medições de capacidade de movimentação de carga.....	39
Tabela 6 – Caracterização do protótipo do MLIT desenvolvido.....	43



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AD: Conversor Analógico Digital

CI: Circuito integrado

FEMM: *Software* para simulação de campo magnético

Fmm: Força Magnetomotriz

MEF : Método dos Elementos Finitos

MLI: Motor Linear de Indução

MLIT: Motor Linear de Indução Trifásico

PC: *Personal Computer*

POS: Posição

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ULBRA: Universidade Luterana do Brasil

UR: Umidade Relativa



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\vec{B}$  – Vetor densidade de fluxo magnético [T]  
 $B$  – Densidade de campo magnético [T]  
 $d\vec{F}$  – Vetor diferencial de força [N]  
 $d\vec{l}$  – Vetor unitário de comprimento na direção da corrente [m]  
 $d\vec{s}$  – Vetor normal a superfície S [m]  
 $dV$  – Unidade Diferencial de volume (m<sup>3</sup>)  
 $\vec{E}$  – Vetor campo elétrico [V/m]  
 $e$  – Força eletromotriz induzida [V]  
 $\vec{F}$  – Força de Lorentz [N]  
 $\mathfrak{S}$  – Força Magnetomotriz (Ae)  
 $f$  – Frequência [Hz]  
 $\vec{H}$  – Vetor intensidade de campo magnético [Ae/m]  
 $H$  – Intensidade de campo magnético [Ae/m]  
 $I$  – Corrente elétrica [A]  
 $I_f$  – Corrente eficaz de fase [A]  
 $I_L$  – Corrente eficaz de linha [A]  
 $\vec{J}$  – Vetor densidade de corrente [A/m]  
 $L$  – Indutância [H]  
 $l$  – Comprimento do circuito magnético [m]  
 $N$  – espiras  
 $N_i$  – Amperes espiras [Ae]  
 $n_r$  – Velocidade do rotor [rpm]  
 $n_s$  – Velocidade síncrona [rpm]  
 $P$  – Potência elétrica ativa [w]  
 $q$  – Carga elétrica [C]  
 $R$  – Resistência elétrica [ $\Omega$ ]



$\mathfrak{R}$  – Relutância magnética [Ae/Wb]

$s$  - Escorregamento

$S$  – Superfície [m<sup>2</sup>]

$\bar{v}$  – Velocidade da partícula [m/s]

$V_F$  – Tensão eficaz de fase [V]

$\lambda$  – Fluxo concatenado [Wb]

$\mu$  – Permeabilidade magnética [H/m]

$\mu_0$  – Permeabilidade magnética no vácuo [H/m]

$\mu_r$  – Permeabilidade magnética relativa

$\varphi$  – fluxo magnético [Wb]

$Z$  – Impedância elétrica [ $\Omega$ ]



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivos Gerais	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Visão Geral do Trabalho	2
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1 Eletromagnetismo e Principais Grandezas Magnéticas	3
2.2 Fluxo Concatenado, Indutância e Energia	6
2.3 Expressões de Força e Campo Magnético em Notação Vetorial	7
2.4 Materiais Magnéticos	8
2.5 Método dos Elementos Finitos	10
2.6 Motor de Indução Trifásico Rotativo – Revisão Teórica	11
2.7 Máquinas Lineares	13
2.7.1 Tipos de motores lineares e suas vantagens	14
2.7.2 Funcionamento básico do no motor linear de indução trifásico	15
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>17</b>
3.1 Descrição Geral do Sistema	18
3.2 Simulações	21
3.3 Medição de Força através da utilização de pesos	29
3.4 Medição de Força com célula de carga	30
3.4.1 Elemento sensor tipo Célula de carga	30
3.4.2 Condicionamento de sinal	30
3.4.3 Metodologia para medição	31
3.4.4 Módulo de aquisição de sinais analógicos	32
3.4.5 Software	34
3.5 Medição de velocidade	34
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>36</b>
4.1 Caracterização do Motor Linear de Indução Trifásico Desenvolvido	36
4.1.1 Testes Iniciais	36
4.2 Medições de força com o uso de pesos	38
4.3 Medições de força com célula de carga	40
4.4 Medições de velocidade média	41
4.4 Resultados gerais	43
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>44</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>45</b>
<b>OBRA CONSULTADA</b>	<b>46</b>
<b>ANEXO A - CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO B - DATASHEET LM 723</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO C - DATASHEET INA114</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO D - DATASHEET 74LS32</b>	<b>50</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O motor linear de indução (MLI) não é um acionamento elétrico recente. Na realidade, o primeiro motor linear para aplicação em tração elétrica foi patenteado em 1841 por Zehdan. Daí em diante foram feitas diversas pesquisas em, tendo sido construídos centenas de protótipos diferentes (RODRIGUES,2000).

Os motores lineares são máquinas elétricas que produzem movimento de translação, ao contrário dos motores tradicionais que produzem movimento rotativo. Assim, em muitas aplicações onde o movimento linear é exigido, como a abertura de portas de um elevador, é possível utilizar um motor mais compacto, silencioso e de manutenção mínima [NASAR, 1987].

É também muito conhecida a utilização de motores lineares no ramo de transportes. Nessas aplicações, tipicamente o estator está no veículo em movimento e um rotor estacionário constitui os trilhos. Desta forma, além de propiciar a propulsão, as correntes induzidas nos trilhos podem ser usadas para produzir levitação, oferecendo assim, um mecanismo de transporte a alta velocidade, sem as dificuldades associadas com as interações que ocorrem entre as rodas e os trilhos no transporte convencional (FITZGERALD, 2006). Para elevadas potências a mais conhecida aplicação motores lineares de indução trifásicos (MLIT) são os trens *maglev*, existentes no Japão e alguns países da Europa, que movimentam-se com alta velocidade.

O presente trabalho apresenta o estudo e o desenvolvimento de um motor linear de indução trifásico (MLIT), composto de um enrolamento trifásico localizado no estator, e de uma placa plana de alumínio, conectada mecanicamente a um sistema composto por rodas e trilhos, que permitem seu deslocamento linear.

O trabalho envolveu o estudo teórico, a montagem e os testes do motor linear de indução trifásico. Com o objetivo de aprofundar estudo do campo magnético produzido pelas correntes que circulam pelas bobinas do estator foram feitas simulações através de um programa que apresenta a distribuição do campo magnético.



## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos Gerais**

O principal objetivo do trabalho foi o de projetar, construir, analisar e testar um protótipo de um motor linear de indução trifásico (MLIT), assim como, demonstrar o efeito da força de Lorentz, através da visualização do deslocamento do carro quando submetido à força eletromagnética.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

O trabalho teve como objetivos específicos:

- Estudar e projetar um motor linear de indução trifásico, composto de bobinas e uma chapa de alumínio, analisando o desempenho em função da disposição das bobinas e das ligações efetuadas;
- Demonstrar de forma teórica e prática, o efeito da força de Lorentz, em função das correntes nas bobinas e estimar a velocidade média do componente móvel do motor;
- Analisar o comportamento do campo magnético produzido pelas bobinas do MLIT.

## **1.2 Visão Geral do Trabalho**

Este Trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 2, referencial teórico, é realizada uma revisão dos principais conceitos referentes ao eletromagnetismo, materiais magnéticos, força de Lorentz, Método dos Elementos Finitos e princípio de funcionamento do MLIT.

No capítulo 3, materiais e métodos, há uma descrição mais detalhada do motor linear de indução trifásico conforme protótipo desenvolvido. São apresentadas as características do protótipo, detalhes construtivos e a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) através de simulações com o Software FEMM. Neste capítulo também é descrita a metodologia para medição de força eletromagnética e velocidade.

No capítulo 4, apresentação e discussão dos resultados, estão descritos os resultados das medições efetuadas, a metodologia utilizada, análises estatísticas e a comparação entre simulação, teoria e o desempenho prático.

No capítulo 5 estão descritas as conclusões, assim como, sugestões para outros trabalhos relacionados aos motores lineares.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo descreve a fundamentação teórica para o estudo do motor linear de indução trifásico. A teoria existente sobre eletromagnetismo, materiais magnéticos e força de Lorentz constituem importantes conceitos associados às máquinas elétricas em geral. Também está descrito o Método dos Elementos Finitos, que é indispensável para a compreensão dos *softwares* desenvolvidos através deste princípio.

### 2.1 Eletromagnetismo e Principais Grandezas Magnéticas

Um condutor elétrico conduzindo corrente elétrica produz forças que atuarão em materiais magnéticos ou outros condutores que também transportam corrente elétrica, colocados ao seu redor. Este campo é denominado de campo magnético e pode ser representado por linhas, com o sentido do campo magnético determinado pela regra da mão direita.

Um condutor que transporta corrente elétrica estabelece um fluxo magnético no espaço em suas proximidades. Certos materiais, chamados ferromagnéticos são mais receptivos ao estabelecimento do fluxo magnético do que o ar e o vácuo. Esses materiais são empregados em dispositivos eletromagnéticos porque têm a propriedade de concentrar e confinar uma porção significativa do fluxo magnético em seu interior [SILVEIRA, 2007].

Um circuito magnético consiste de uma estrutura composta, em sua maior parte, de material ferromagnético. Com a presença de um material de alta permeabilidade o fluxo magnético tende a ser confinado pelos “caminhos” delimitados pela estrutura [SILVEIRA, 2007].

Assumindo-se um circuito magnético, conforme figura 1, com o núcleo composto de material magnético cuja permeabilidade é muito maior que o ar e considerando a excitação por um enrolamento de  $N$  espiras conduzindo uma corrente  $i$ , observam-se a produção de um campo magnético no núcleo.

No circuito magnético da figura 1, a fonte de campo magnético do núcleo é o produto  $NI$ , denominada força magnetomotriz, dado em amperes-espiras.

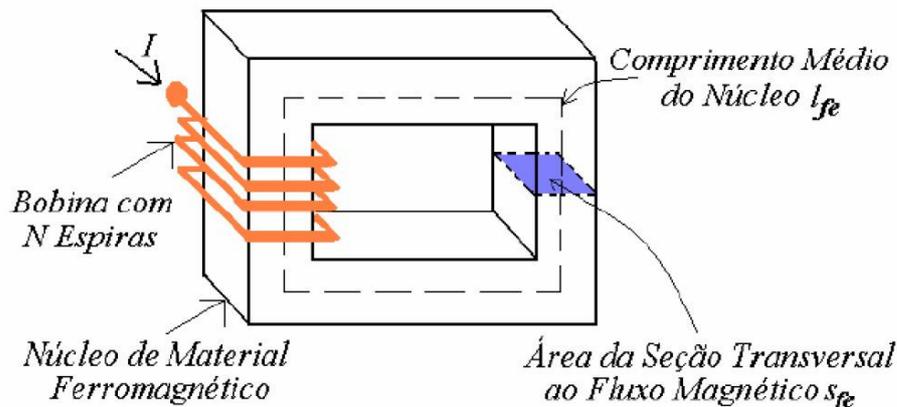


Figura 1- Circuito magnético

Fonte: Notas de Aula de Conversão Eletromecânica de Energia 1, 2007.

A fonte de campo magnético é igual ao produto  $NI$ , denominada de força magnetomotriz (fmm). A força magnetomotriz representa a habilidade de produzir fluxo magnético pela bobina (SILVEIRA, 2007). A *fmm* é uma diferença de potencial magnético que tende a forçar o fluxo magnético através de uma certa região do espaço. A fmm é calculada pela equação 1:

$$\mathcal{S} = NI \quad (1)$$

Onde  $N$  é quantidade de espiras e  $I$  a corrente elétrica [A]. O vetor intensidade de campo magnético,  $\vec{H}$ , representa o número de ampères-espiras por metro, necessário para vencer a relutância total de um circuito magnético. A lei de Ampère é a lei básica que fornece a relação entre a corrente elétrica e o campo magnético, sendo expressa pela equação 2.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \quad (2)$$

O fluxo magnético que será estabelecido dependerá da fmm e também da relutância do circuito magnético. Para que se estabeleça um determinado fluxo magnético é necessário vencer a relutância do circuito magnético. A relutância representa a dificuldade oferecida por um circuito magnético ao estabelecimento do fluxo magnético [SILVEIRA, 2007]. O fluxo magnético  $\phi$  que atravessa uma superfície  $S$  é calculado pela integral de superfície da componente normal de  $\vec{B}$ , sendo dada pela equação 3.



$$\iint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3)$$

Outra grandeza muito importante associada ao eletromagnetismo é a relutância magnética, que representa a dificuldade para o estabelecimento do campo magnético, expresso conforme equação 4:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu s} \quad (4)$$

Onde:

$\mathfrak{R}$  - relutância magnética [Ae/Wb];

$l$  - comprimento médio do circuito magnético [m];

$s$  - área da seção transversal ao fluxo magnético [m<sup>2</sup>];

$\mu$  - permeabilidade magnética do material [H/m].

Considerando as grandezas: fluxo magnético, força magnetomotriz e relutância magnética, é realizada a seguinte analogia entre as grandezas magnéticas e elétricas, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1- Analogia entre grandezas elétricas e magnéticas - Fonte: Adaptação de Notas de aula de Conversão Eletromecânica de Energia 1, 2007

<b>Grandeza Elétrica</b>	<b>Grandeza Magnética</b>
Tensão elétrica	Força magnetomotriz
Corrente elétrica	Fluxo magnético
Resistência elétrica	Relutância magnética

A intensidade de campo magnético produz uma indução magnética  $\vec{B}$ , que dependerá da permeabilidade do material, de acordo com a seguinte relação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

Onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética. O confinamento do campo magnético é relacionado com a permeabilidade magnética  $\mu$ , que quantifica a receptividade de um material ao estabelecimento do fluxo magnético. A presença de um material de alta permeabilidade tende a fazer com que o fluxo magnético seja confinado aos



caminhos delimitados pela estrutura, do mesmo modo que, em um circuito elétrico, as correntes são confinadas aos condutores [FITZGERALD, 2006]. A permeabilidade de um material é relacionada com a permeabilidade do vácuo através da permeabilidade relativa  $\mu_r$ , através da equação 6. A permeabilidade do vácuo,  $\mu_0$ , é igual a  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m [2].

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (6)$$

A relação entre a fmm e o fluxo magnético é calculada por:

$$\mathfrak{F} = NI = \varphi \cdot \mathfrak{R}_T \quad (7)$$

## 2.2 Fluxo Concatenado, Indutância e Energia

Quando um campo magnético varia no tempo, produz-se um campo elétrico no espaço de acordo com a Lei de Faraday [SILVEIRA, 2007], representada na equação 8.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (8)$$

A equação 8 afirma que a integral de linha do vetor intensidade de campo elétrico  $\vec{E}$  ao longo de um contorno fechado C é igual a razão, no tempo, da variação de fluxo magnético que concatena aquele contorno. Como o enrolamento concatena o fluxo do núcleo N vezes [SILVEIRA, 2007], a equação pode ser representada como:

$$e = N \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (9)$$

Onde  $\lambda$  é o fluxo concatenado, medido em *Webers*, do enrolamento definido como:

$$\lambda = N\varphi \quad (10)$$

Em um circuito magnético, composto de material magnético de permeabilidade constante ou que inclua um entreferro dominante, a relação entre  $\varphi$  e  $i$  será linear com a indutância definida conforme equação 11.

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (11)$$

### 2.3 Expressões de Força e Campo Magnético em Notação Vetorial

A força eletromagnética que atua sobre uma carga é conhecida como força de Lorentz e engloba as influências elétricas e magnéticas.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})) \quad (12)$$

A equação 12 fornece a força que atua sobre uma partícula de carga  $q$  na presença dos campos elétricos e magnéticos. Na equação anterior temos:

$\vec{E}$  = vetor campo elétrico [V/m];

$\vec{B}$  = vetor densidade de fluxo magnético [T];

$\vec{v}$  = velocidade da partícula [m/s].

Considerando apenas a influência magnética, a força de Lorentz é escrita como:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (13)$$

A equação 13 fornece o módulo e o sentido da força eletromagnética que atuará sobre uma carga elétrica em movimento em uma região onde exista um campo magnético. A direção da força é perpendicular ao plano formado pelos vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ . A magnitude da força é calculada pelo produto entre os módulos de  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$  e o seno do ângulo entre elas. Quando um grande número de cargas está em movimento é mais conveniente expressar a força de Lorentz em termos da corrente elétrica ou do vetor densidade de corrente elétrica,  $\vec{J}$ . Quando um condutor metálico de comprimento  $l$  percorrido por uma corrente elétrica  $i$  está imerso em um campo magnético, uma força atuará sobre ele que é igual à soma das forças magnéticas que atuam sobre as partículas em movimento que constituem a corrente. A equação anterior pode ser reescrita como [SILVEIRA, 2007]:

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B} \quad (14)$$

onde  $\vec{l}$  é o vetor cujo módulo é o comprimento ativo do condutor e cujos sentido e direção são paralelos a  $q\vec{v}$ . A equação anterior supõe que o condutor seja retilíneo e que a densidade de fluxo magnético seja constante em todo o seu comprimento. Quando uma destas duas situações, ou ambas, não forem satisfeitas, pode-se obter a força  $d\vec{F}$  que atua sobre um segmento de condutor  $d\vec{l}$ , obtida por:

$$d\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B} \quad (15)$$



Ao invés de utilizar-se o segmento de condutor, pode-se utilizar o elemento de volume  $dV = sdl$ , considerando que  $\vec{J}dV = id\vec{l}$ , onde  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente no condutor, aqui considerado uniforme através de sua área transversal. Desta forma, a força que atua sobre condutores percorridos por corrente imersos em um campo magnético pode ser obtida pela lei de Lorentz [KRAUS, 1978], através da equação 16.

$$\vec{F} = \int_V (\vec{J} \times \vec{B}) dV \quad (16)$$

Na equação anterior  $V$  é o volume de integração, ou seja, corresponde ao volume dos condutores com corrente, que estão imersos no fluxo magnético. A equação anterior permite determinar o módulo e o sentido da força que atua sobre os condutores percorridos por corrente, imersos em um campo magnético. Quando os condutores são estacionários e a fonte do campo magnético possui liberdade para movimentar-se, a força produzida entre os condutores percorridos por corrente e o campo magnético provocará o deslocamento do campo magnético [KRAUS, 1978]. Para determinar o sentido da força que atua sobre o campo magnético, a equação anterior é modificada para:

$$\vec{F} = \int_V -(\vec{J} \times \vec{B}) dV = \int_V (\vec{B} \times \vec{J}) dV \quad (17)$$

## 2.4 Materiais Magnéticos

Dependendo de seu comportamento magnético, as substâncias podem ser classificadas como diamagnéticas, paramagnéticas ou ferromagnéticas. Nos materiais diamagnéticos, a magnetização é oposta ao campo aplicado, enquanto que nos materiais paramagnéticos ela se dá no mesmo sentido do campo. Os materiais dos dois grupos, entretanto, apresentam somente efeitos magnéticos fracos. Os materiais do grupo ferromagnético, por outro lado, apresentam efeitos magnéticos muito fortes [KRAUS, 1978].

O magnetismo está relacionado com o spin dos elétrons. Uma carga em movimento provoca a formação de um campo magnético. Os átomos têm momento magnético devido ao movimento dos elétrons. Além disso, cada elétron tem um momento magnético, relacionado com seu spin [SILVEIRA, 2007].

Nas substâncias ferromagnéticas, como o ferro, mesmo um pequeno campo magnético externo, pode ser o suficiente para provocar um alto grau de



alinhamento dos momentos magnéticos, que persistem, mesmo após a retirada do campo magnético externo.

Os efeitos magnéticos são produzidos pelo movimento dos elétrons dos átomos individuais. Cada átomo de um material ferromagnético teria um comportamento de um ímã em miniatura. Um material ferromagnético, quando submetido acima de uma determinada temperatura, chamada de temperatura Curie, passará a ter comportamento paramagnético [SILVEIRA, 2007].

Os materiais ferromagnéticos são classificados em duas categorias principais: magneticamente macios (*soft magnetic materials*) e magneticamente duros (*hard magnetic materials*). Os materiais magneticamente duros são utilizados para a fabricação de ímãs permanentes. Os magneticamente macios são utilizados na construção de máquinas elétricas, pois, além de terem por função alojar os condutores dos circuitos da armadura e de campo, providenciam um caminho de baixa relutância magnética para o fluxo magnético, já que possuem, elevada permeabilidade magnética. Entretanto, o valor de densidade de saturação apresentado por esses materiais é elevada. A remanescência e a coercitividade são consideravelmente baixas, o que implica em baixa retentividade do magnetismo, após aplicação a um campo magnético externo [SILVEIRA, 2007].

Os materiais magneticamente duros são utilizados para a fabricação de ímãs permanentes. Como um ímã permanente possui energia armazenada, não há a necessidade da utilização de dispositivos, como eletroímãs, que absorvem energia elétrica para a produção de um campo magnético [SILVEIRA, 2007].

Nos materiais ferromagnéticos,  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$  podem variar de forma independente, e, em determinadas situações, podem ter direções opostas. Outra característica desses materiais é de apresentarem um ciclo de histerese, durante o processo de magnetização. Conforme figura 2, observa-se que, com um valor crescente de  $\vec{H}$ , as curvas começam a ficar horizontais à medida que o material tende a saturação (FITZGERALD, 2006). Se o campo aplicado for aumentado e em seguida for diminuído, a densidade do fluxo  $\vec{B}$  diminui, mas não tão rapidamente quanto aumentou ao longo da curva de magnetização inicial. Assim, quando  $\vec{H}$  chega a zero, há uma densidade residual, ou remanescência. Para reduzir  $\vec{B}$  a zero, deve-se aplicar um campo magnético negativo, campo que exerce uma força coercitiva. O fenômeno que causa o atraso de  $\vec{B}$  em relação à  $\vec{H}$ , é chamado de

histerese, e o ciclo traçado pela linha de magnetização chama-se laço ou ciclo de histerese [KRAUS, 1978].

Em materiais macios, ou que são facilmente magnetizáveis, o ciclo de histerese é estreito, com uma pequena área. A área do ciclo de histerese em materiais duros, é comparativamente, maior [SILVEIRA, 2007].

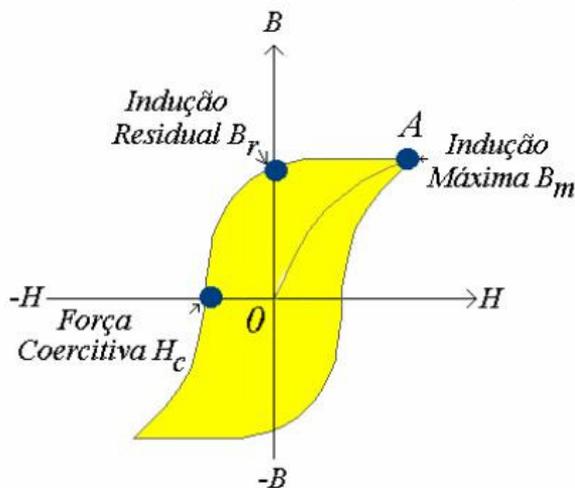


Figura 2- Ciclo de histerese

Fonte: Notas de Aula de Conversão Eletromecânica de Energia 1,2007.

## 2.5 Método dos Elementos Finitos

O princípio dos Métodos Finitos consiste na divisão do domínio em estudo em pequenos subdomínios, denominados de elementos finitos. Se existir um campo magnético em determinada região onde não estão definidos ímãs permanentes, nem correntes elétricas, as condições de fronteira, através das quais são impostas diferenças de potenciais magnéticos, representam a fonte desse campo. Se a malha que caracteriza a região é tridimensional, então cada elemento finito que a constitui também é tridimensional [SILVEIRA, 2003].

O emprego de técnicas de análise numérica através do Método dos Elementos Finitos (MEF) envolve, normalmente, as três etapas representadas na figura 3. Na etapa de Processamento é definido o modelo para análise. Como condições iniciais, deve-se ter um conhecimento aproximado de forma da distribuição dos campos eletromagnéticos através do dispositivo. Uma vez definido o tipo de análise em termos de dimensão, a próxima etapa corresponde à construção da malha que representa o dispositivo em estudo [SILVEIRA, 2003].

Um modelo então será gerado a partir de nós e elementos, que formarão uma malha. Um elemento resulta da união de nós. Uma malha é composta por todos os elementos de modelo, ou seja, por todos os elementos finitos. Em modelos

onde haja mais de uma região, a interface entre dois materiais deve coincidir com a fronteira dos elementos. Por fim, são definidas as fontes de excitação do campo e as condições de fronteira. Praticamente todos os pacotes computacionais para análise numérica de dispositivos eletromagnéticos representam fisicamente problemas magnéticos e eletromagnéticos em termos de potenciais elétricos ou magnéticos. Regiões não condutoras de corrente podem ser modeladas através do emprego do potencial escalar magnético ou potencial escalar reduzido. A escolha prende-se ao tipo de análise a ser realizada e às características do pacote empregado [SILVEIRA, 2003].

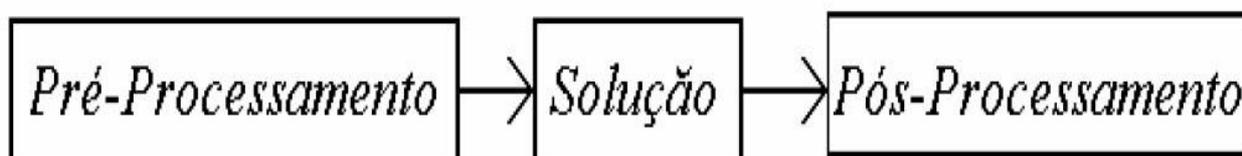


Figura 3- Etapas da técnica de análise numérica pelo MEF

Fonte: SILVEIRA, MARILIA AMARAL, Estudo de um novo atuador planar - Tese de Doutorado - UFRGS, 2003.

Na etapa de solução é utilizado um pacote computacional denominado de processador ou *solver*. *Solvers* são programas que resolvem o sistema de equações criado quando o modelo é definido. O produto de um *solver* é um conjunto de potenciais descrevendo o comportamento eletromagnético no modelo inteiro [SILVEIRA, 2003]. O pós-processamento fornece uma série de ferramentas para a análise de solução produzida pelo *solver*, tais como, manipulação matemática para tratamento dos dados e ferramentas gráficas para a visualização dos resultados, seja através do mapeamento das grandezas empregando cores e/ou linhas, ou através de gráficos.

## 2.6 Motor de Indução Trifásico Rotativo – Revisão Teórica

Na máquina de indução, há correntes alternadas tanto no enrolamento do estator, como no enrolamento do rotor. Quando o motor está em operação, a corrente alternada é fornecida diretamente ao enrolamento do estator e por indução, ou seja, por ação de transformação, ao enrolamento rotórico. Esta máquina pode ser considerada um transformador generalizado. Por analogia aos transformadores, o enrolamento estatórico é denominado de enrolamento primário, e o enrolamento rotórico, de secundário. A figura 4 mostra uma fotografia de um

motor de indução trifásico cortado, para possibilitar a visualização de seus componentes [SILVEIRA, 2007].

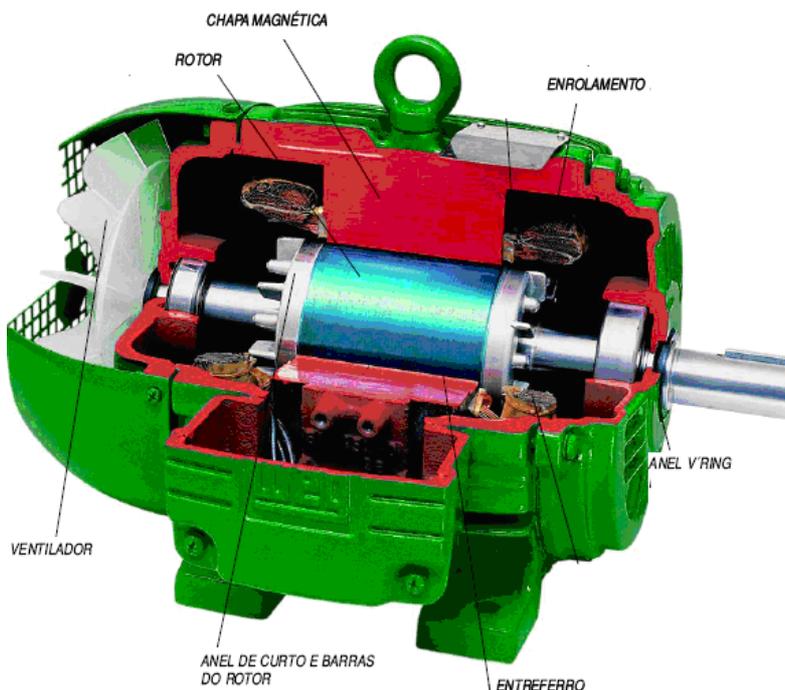


Figura 4 - Corte lateral do motor de indução trifásico

Fonte: Notas de Aula de Conversão Eletromecânica de Energia 2, 2007.

Os núcleos do estator e do rotor são formados por chapas laminadas, com ranhuras estampadas em cada chapa. O material utilizado na construção dos núcleos é o ferro-silício. Há dois tipos de motor de indução quanto ao enrolamento rotórico: (1) rotor em gaiola de esquilo ou em barras e (2) rotor bobinado ou rotor de anéis. No motor em gaiola, o enrolamento é formado por barras de alumínio ou cobre, entre outros. Essas barras estão permanentemente curto-circuitadas em suas extremidades por meio de anéis. Este tipo de enrolamento não é acessível externamente. No rotor bobinado, o enrolamento trifásico é distribuído em ranhuras. O acesso externo ao enrolamento é feito através de anéis. Normalmente o enrolamento rotórico é conectado internamente em estrela e cada um dos três terminais do enrolamento é levado a anéis coletores. Em operação, este enrolamento deve ser curto-circuitado, ou fechado através de resistências [SILVEIRA, 2007].

O enrolamento estatórico é trifásico. Quando esse enrolamento é conectado a uma fonte de tensão trifásica, a circulação de correntes trifásicas simétricas produzirá um campo magnético no entreferro, que gira à velocidade síncrona, de



acordo com o número de pólos e a frequência das correntes aplicadas ao enrolamento do estator. Com alimentação trifásica, as correntes trifásicas que percorrem os enrolamentos (fases) do estator vão gerar, em cada fase, campos pulsantes, defasados de um ângulo igual ao da defasagem entre as tensões aplicadas, cujos eixos de simetria são fixos no espaço, mas cuja resultante é um campo que gira num determinado sentido, denominado campo girante. O número de rotações do campo girante é obtida através da equação 19 [SILVEIRA, 2007].

:

$$n_s = \frac{120 f_e}{n^\circ \text{ pólos}} \quad (18)$$

Onde  $n_s$  é a velocidade do campo magnético estatórico (rpm);

$f_e$  é igual à frequência da rede (Hertz).

Na partida, como o rotor está parado, experimentando a máxima variação de campo magnético, a tensão induzida no enrolamento rotórico será máxima, com frequência igual à frequência da rede, e as correntes que circularão pelo enrolamento rotórico e estatórico atingirão valores máximos. O campo magnético produzido pelas correntes induzidas no rotor girará em sincronismo com o campo produzido pelo estator, produzindo um conjugado que tende a girar o rotor. Se o conjugado for suficiente para vencer a oposição à rotação criada pela carga no eixo, o motor chegará à sua velocidade normal de funcionamento, que será sempre inferior à velocidade síncrona. À medida que o rotor acelera, o escorregamento diminui e a frequência e o módulo das tensões induzidas no enrolamento rotórico diminuem. O campo magnético produzido pelo rotor girará com uma velocidade que é resultado da diferença entre a velocidade do campo síncrono,  $n_s$ , e a velocidade de giro do rotor [SILVEIRA, 2007]. A diferença de velocidade entre o campo magnético girante do estator e o rotor é denominada de escorregamento, definido pela equação 19.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (19)$$

## 2.7 Máquinas Lineares

Um motor elétrico linear é um dispositivo capaz de produzir diretamente movimento linear, sem a necessidade de dispositivos conversores de movimento rotacional em linear. Existem formas construtivas variadas, por exemplo, motores



lineares síncronos possuem aplicação em transporte de alta velocidade, como nos trens *MAGLEV* (NASAR, 1987).

### **2.7.1 Tipos de motores lineares e suas vantagens**

As formas construtivas são variadas, mas as vantagens comuns em todas as aplicações estão relacionadas com a simplicidade mecânica caracterizada por reduzido atrito e ausência de engrenagens, boa dissipação de calor e reduzida manutenção (NASAR, 1987).

O Motor linear síncrono possui princípio de operação similar ao rotativo. Ele é composto por um enrolamento trifásico planejado e um circuito de campo, geralmente composto por ímãs permanentes (SILVEIRA, 2003).

Motores lineares de corrente contínua possuem o enrolamento de armadura excitado por cc, podendo ser construído de diversas formas, como por exemplo, do tipo homopolar, com dupla armadura e sem escovas (SILVEIRA, 2003).

Motores lineares de passo são largamente utilizados na indústria de periféricos para computadores. Sua principal característica de funcionamento é converter uma sequência de pulsos em uma sequência de movimentos, que ocorrem na forma de passos lineares, iguais ao número de pulsos (SILVEIRA, 2003). Os principais motores lineares de passo são o motor de relutância variável e híbrido.

Existem motores lineares que empregam um princípio eletromagnético direto. A força eletromagnética fornece o movimento linear direto sem o uso dos cames, das engrenagens, das correias, ou de outros dispositivos mecânicos. O motor consiste somente de duas partes: o êmbolo e o estator. O êmbolo é um conjunto de precisão que consiste em um tubo do aço inoxidável, que é preenchido com os ímãs de *neodymium*, pelos furos que existem em cada extremidade. O estator consiste em bobinas, rolamento para o êmbolo, sensores de posição e um microprocessador, que são projetados para o uso em ambientes industriais agressivos. Acelerações elevadas e cursos inteiramente controláveis, velocidades e perfis de movimentos apropriados para ambientes industriais agressivos caracterizam as vantagens destes motores (SILVEIRA, 2003). Outra interessante aplicação é o motor linear tubular de relutância (figura 5). O motor é composto por núcleos estacionários de material ferromagnético, em torno dos quais estão enroladas bobinas, e por um cilindro móvel de material ferromagnético, que sofrerá deslocamento linear quando as bobinas forem adequadamente excitadas.

Motores lineares de indução, especificamente, com alimentação trifásica, serão detalhados neste projeto, inclusive a descrição do protótipo.

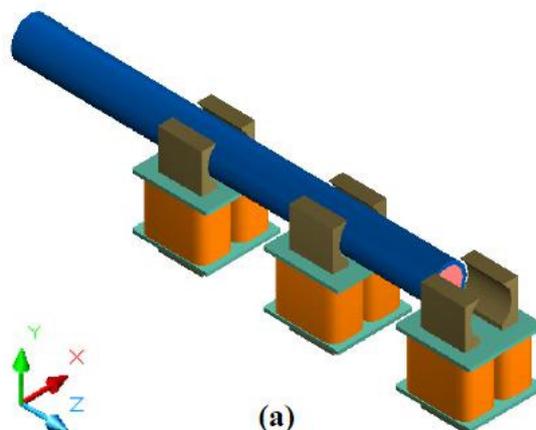


Figura 5- Princípio do Motor Linear Tubular de relutância.

Fonte: RINALDI, 2004.

### **2.7.2 Funcionamento básico do no motor linear de indução trifásico**

Uma forma simples de visualizar o motor linear de indução é “recortar e desenrolar” o motor de indução, conforme representação da Figura 6.

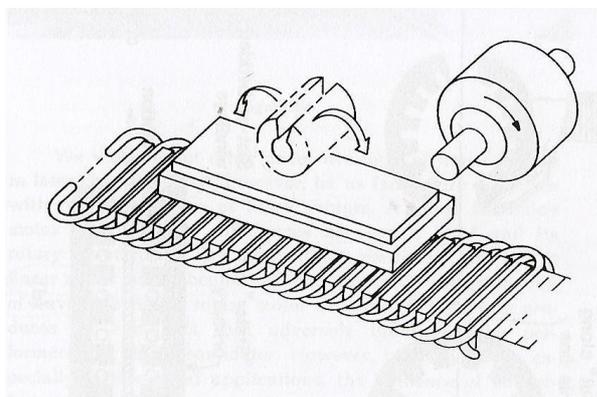


Figura 6- Visualização didática do motor linear de indução.

Fonte: NASAR, 1987.

Considerando o motor de indução rotativo, então o motor linear obtido é um MLIT, com o estator denominado de primário e o rotor de secundário. O secundário de um MLIT, em vez de ser constituído pelo rotor de um motor de indução desenrolado, é constituído por um material com alta condutividade elétrica (geralmente uma chapa de alumínio) (RODRIGUES, 1973).



No MLIT, ao ser aplicada uma tensão no estator, cria-se uma corrente que circula pelos enrolamentos do estator. Essa corrente, por sua vez, cria o campo viajante. Segundo a lei de Faraday, são induzidas forças eletromotrizes no secundário (chapa de material condutor), as quais produzem correntes elétricas que circulam pela chapa condutora. Essas correntes provocam um fluxo magnético antagônico aquele produzido pelo estator, resultando numa força de repulsão, que faz com que a chapa levite (RODRIGUES, 1973). Como a chapa condutora se encontra “imersa” no campo magnético produzido pelo estator, ao ser atravessada pela corrente, gera-se nela uma força eletromagnética (Lei de Lorentz). Essa força é responsável pelo movimento linear do rotor. Na placa de alumínio fica então aplicada uma força com componentes vertical (força de levitação devida aos campos antagônicos), lateral (estabilização) e longitudinal, propulsora, cujo princípio é descrito pela Lei de Lorentz. (NASAR, 1987).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto, com as implementações realizadas no Laboratório da Universidade Luterana do Brasil. É feita a descrição das características construtivas do motor em estudo. Nesta etapa estão apresentadas as medições de velocidade média e de força através da aplicação de célula de carga, em diversas posições do elemento móvel, com valores de tensão compreendidos entre 0 e 220V, de 10 em 10 volts, aproximadamente.

O diagrama de blocos da figura 7 representa as principais etapas do projeto desenvolvido. São elas:

- Alimentação trifásica a partir de fonte do Laboratório da Universidade;
- Construção do protótipo de um motor linear de indução trifásico;
- Desenvolvimento de um dispositivo para medição de força, composto de uma célula de carga, circuito de condicionamento de sinal e etapa de visualização;
- Medição de velocidade média a partir de circuito eletrônico digital.

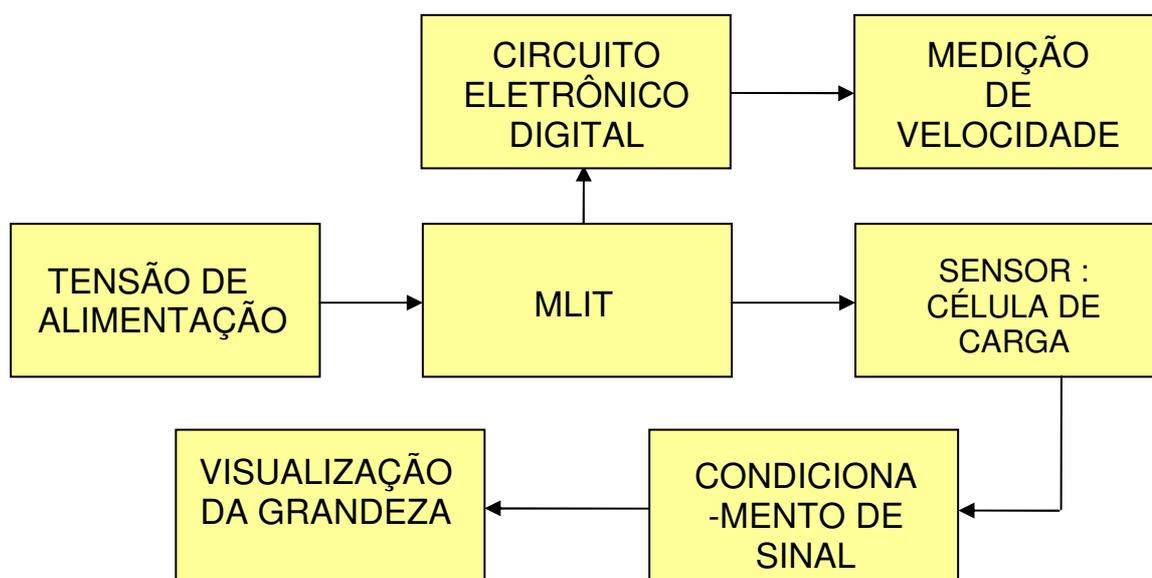


Figura 7- Diagrama de blocos do projeto desenvolvido.

### 3.1 Descrição Geral do Sistema

O motor linear de indução trifásico em estudo é composto de um enrolamento trifásico localizado no estator, e de uma placa plana de alumínio, conectada mecanicamente a um sistema composto por rodas e trilhos, que permitem seu deslocamento linear. De acordo com a tensão aplicada é verificada a movimentação unidirecional do elemento móvel sobre os trilhos. A medição da força que atua sobre o estágio móvel foi efetuada através de sinal proveniente de uma célula de carga e através de comparação de pesos com utilização de roldana.

A montagem do enrolamento trifásico estatórico foi implementada com a utilização de 6 bobinas com ligações trifásicas, retiradas de chaves contactoras. O núcleo das bobinas é composto de material ferromagnético, para melhor confinamento do campo magnético. Um primeiro protótipo foi montado com núcleo de aço-silício, obtidos de transformadores monofásicos comerciais. O protótipo foi montado para verificação do comportamento do campo magnético produzido pelo circuito da armadura e da força produzida sobre o elemento móvel, conforme visualização da figura 8. Na montagem inicial, foram utilizadas 3 bobinas com alimentação em estrela, alimentadas com tensão de linha de 220V.

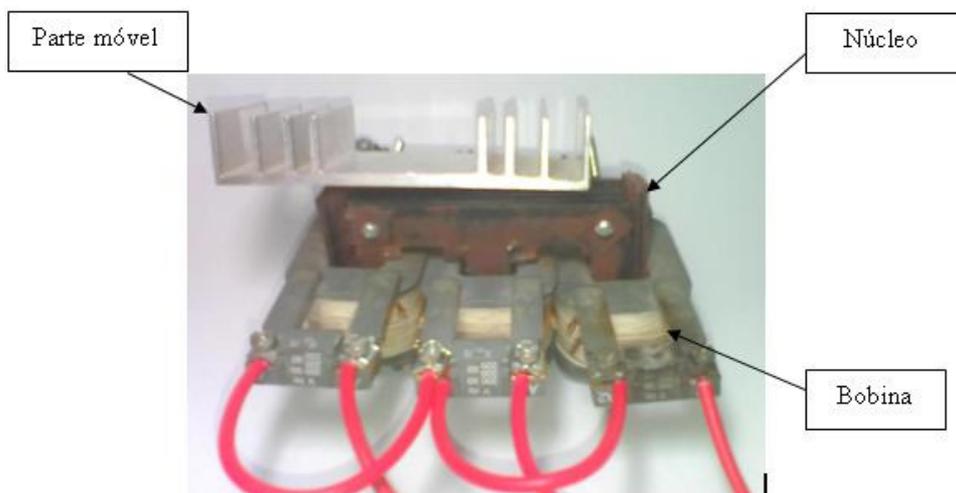


Figura 8- Protótipo desenvolvido em 05/04/2010

O objetivo do protótipo inicial estava relacionado com a observação quanto à força eletromagnética sobre uma chapa de alumínio (material paramagnético). Na montagem realizada, que pode ser visualizado na figura 8, observou-se o comportamento desejado, ou seja, ocorreu movimento da chapa de alumínio. A

partir desta verificação procedeu-se na montagem do protótipo seguinte do projeto, conforme apresentado na figura 9.



Figura 9- Protótipo desenvolvido em 02/05/2010.

O protótipo da figura 9 foi implementado com a disposição das bobinas, lado a lado, interligadas com núcleo de aço-silício e trilhos de material polimérico sintético. Para o elemento móvel, a aplicação de um dissipador de alumínio com a utilização de pequenas rodas. Entretanto, verificou-se a necessidade de diminuir a distância entre as bobinas, para o campo magnético atingir uma área maior do elemento móvel. Na figura 10 está apresentado o protótipo com esta alteração.

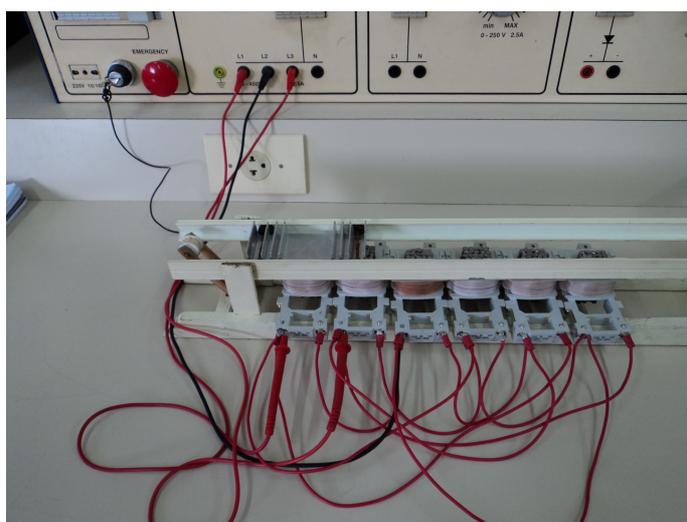


Figura 10- Protótipo testado em 04/08/2010.

As dimensões do protótipo estão especificadas na figura 11.

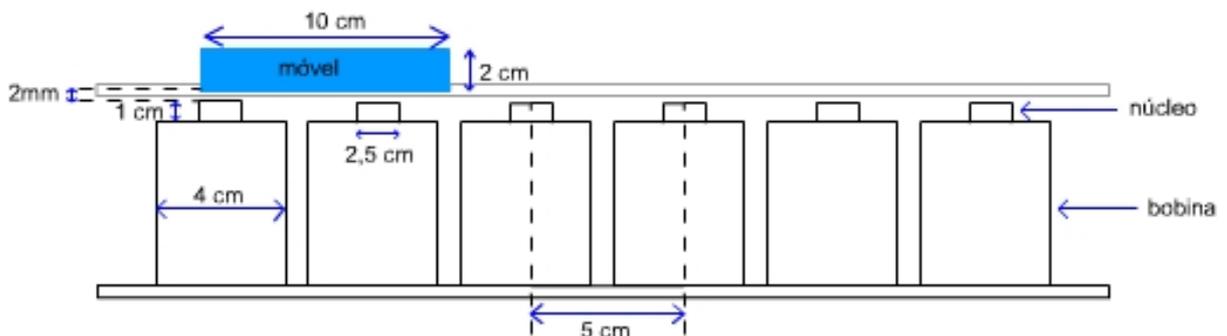


Figura 11- Dimensões do protótipo, vista frontal

A tabela 2 descreve as demais características construtivas do MLI

Tabela 2- Características construtivas do protótipo

Tensão de Linha	220V
Corrente de Linha	2,1 A
Número de Fases	3
Número de Bobinas	6
Número de Espiras na Bobina	2.100
Seção do Condutor da bobina	0,025 mm <sup>2</sup>
Indutância da Bobina	0,6 H
Resistência da Bobina	102 Ω
Freqüência	60 Hz
Dimensões do Componente móvel	100 x 20 x 40 (mm)
Espessura do componente móvel	2 mm
Massa do componente móvel	0,062 kg
Material do núcleo	Aço-carbono
Dimensões do núcleo	25 x 45 x 17(mm)

A figura 12 apresenta as dimensões da bobina utilizada.

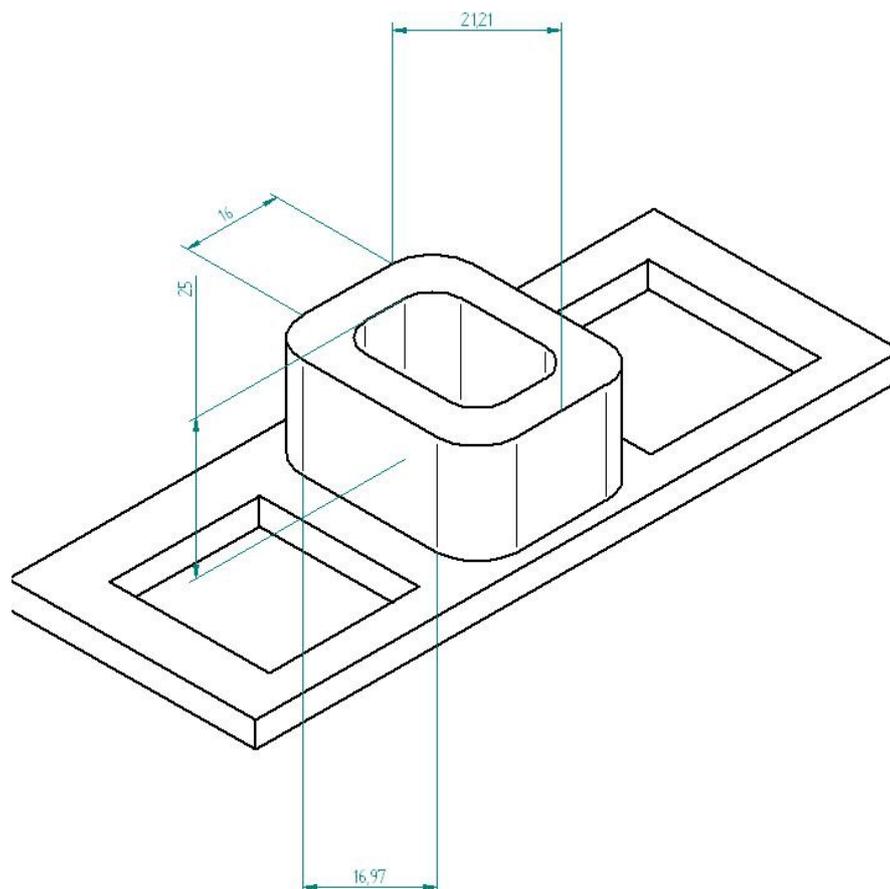
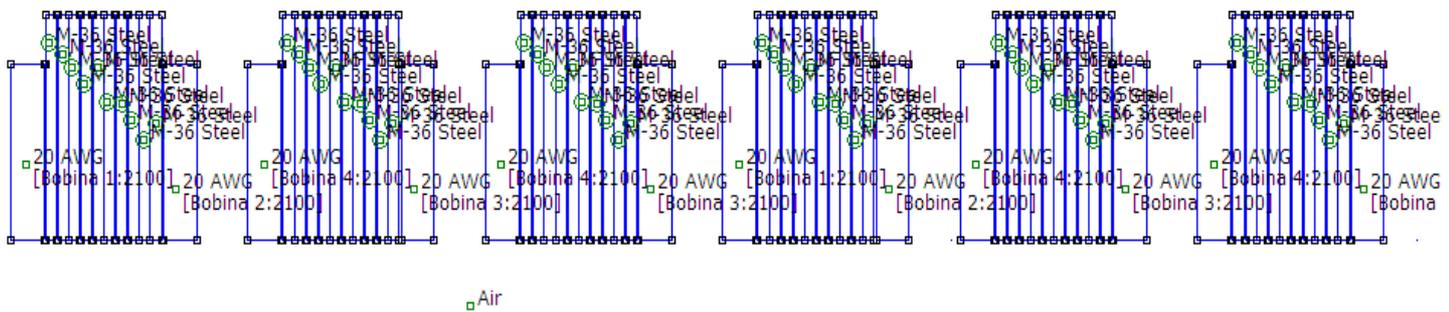


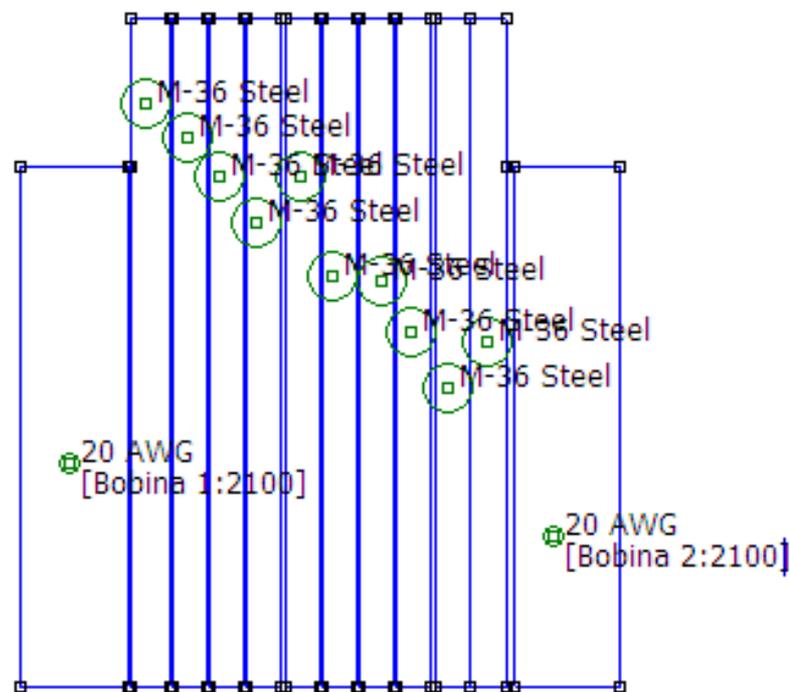
Figura 12- Dimensões da bobina utilizada.

### 3.2 Simulações

O motor de indução linear foi analisado numericamente através do Método dos Elementos Finitos, utilizando o pacote computacional FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), versão 4.2, que é um conjunto de programas para resolver problemas eletromagnéticos de baixa frequência, bi-dimensionais planares e cilíndricos. Através do FEMM, foi possível simular o comportamento do fluxo magnético no circuito do motor, em função da corrente na bobina. O circuito magnético do motor de indução linear foi desenhado, através de nós e linhas. Os materiais e suas propriedades elétricas e magnéticas foram definidos. A figura 13(a) mostra o modelo completo para simulação do comportamento do campo magnético do motor de indução linear, com os seis núcleos que compõem o motor de indução linear e a figura 13(b) mostra um dos núcleos ampliado.



(a)



(b)

Figura 13 - Modelo completo para simulação do comportamento do campo magnético: (a) do motor de indução linear com 6 bobinas, (b) um dos núcleos ampliado.

Após, foram definidas as condições de fronteira, conforme mostra a figura 14. Na fronteira do modelo, destacada pela linha vermelha, o potencial magnético foi definido com sendo nulo. A malha foi criada, sendo formada por 65.705 nós e 131.368 elementos, como apresenta a figura 15.

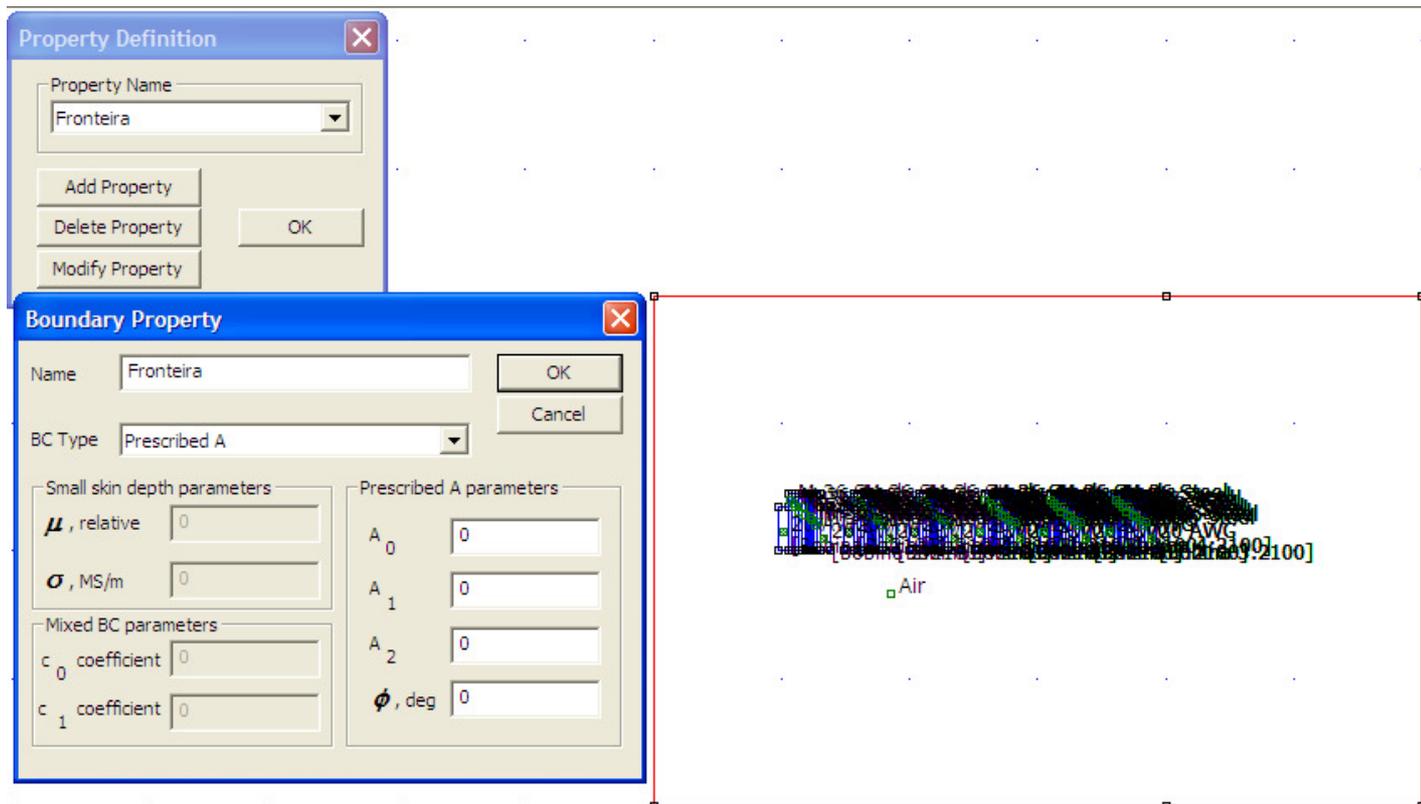


Figura 14 - Condições de fronteira do modelo.

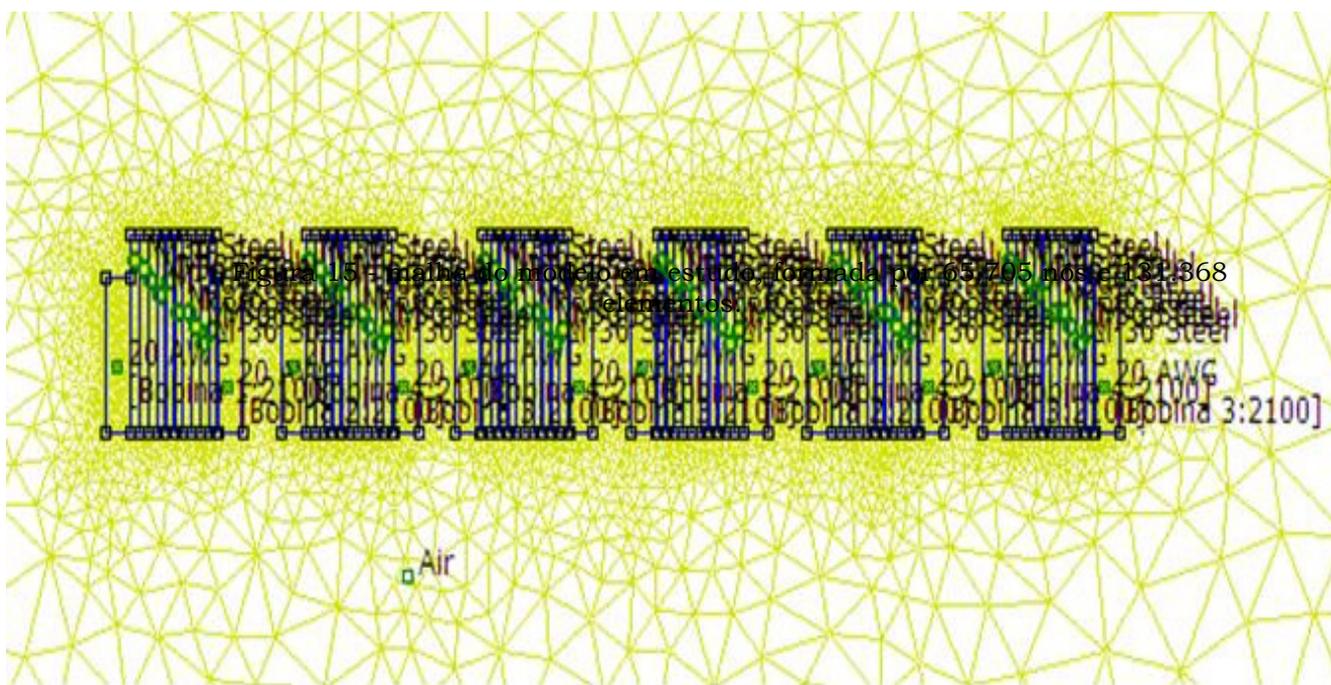


Figura 15 – Malha do modelo em estudo

O objetivo da análise foi o de verificar o comportamento do campo viajante. Para isso, foram feitas seis simulações. As bobinas do motor de indução linear são excitadas por correntes alternadas que variam com o tempo, e as três correntes de um sistema trifásico balanceado estão defasadas temporalmente entre si, de forma tal que seus comportamentos podem ser representados pelas seguintes expressões:

$$i_a = I_m \cos wt \quad (20)$$

$$i_b = I_m \cos( wt - 120^\circ ) \quad (21)$$

$$i_c = I_m \cos( wt - 240^\circ ) \quad (22)$$

Onde  $I_m$  é o valor de pico da corrente e a origem é tomada como sendo o instante em que a corrente da fase a passa pelo seu máximo positivo. A figura 16 mostra o gráfico das correntes trifásicas instantâneas. Cada fase produz uma onda de  $fmm$  no motor de indução linear, que varia de forma cossenoidal com o tempo e que é estacionária, pulsante, com seu máximo localizado no eixo magnético da sua respectiva fase, com amplitude proporcional à corrente de fase instantânea. Cada simulação foi feita considerando o valor instantâneo das correntes nas seis bobinas do enrolamento estático do motor. Na figura 16, cada um dos pontos no gráfico indica uma condição de uma das seis simulações, para as corrente instantâneas.

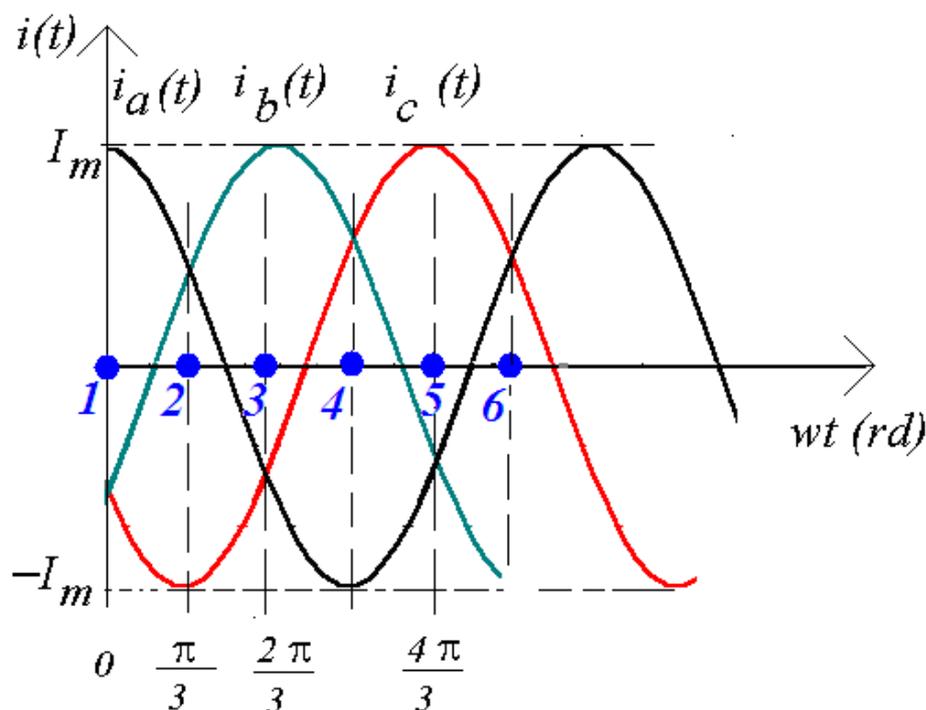
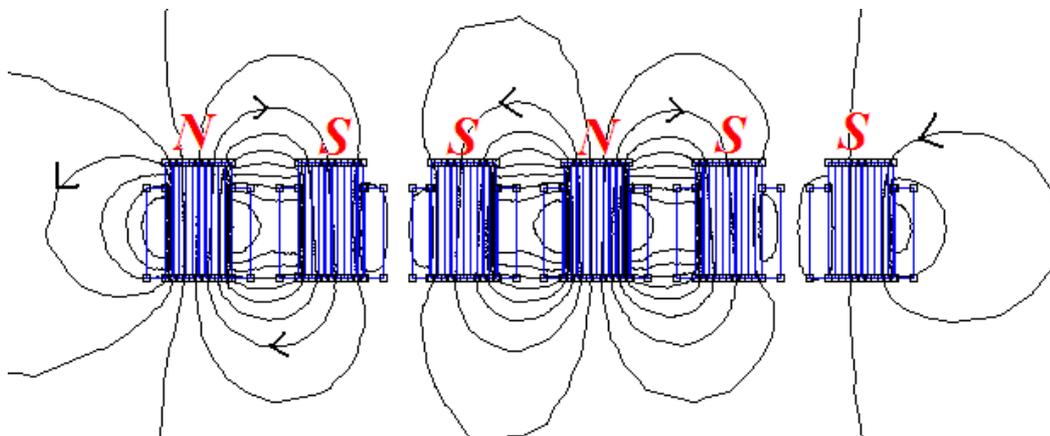
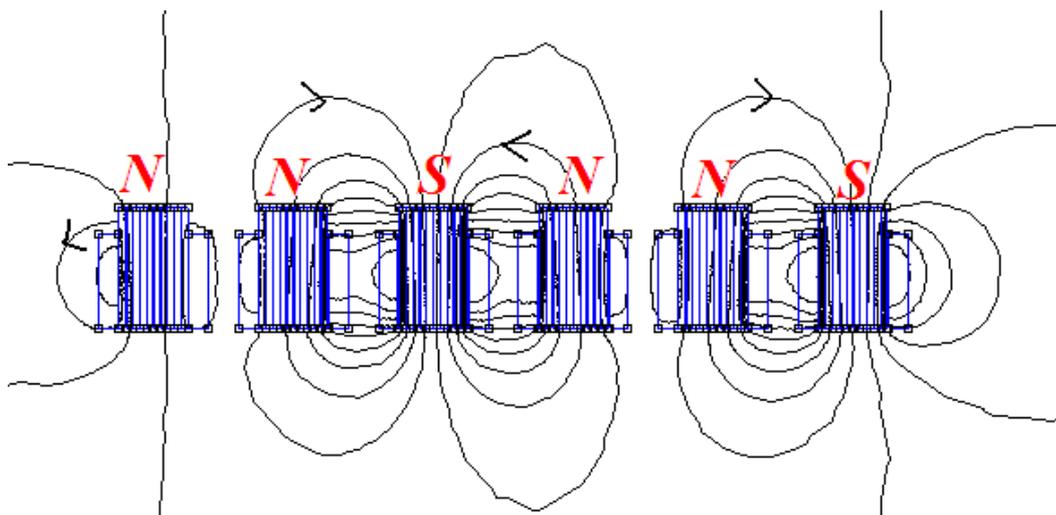


Figura 16 – Correntes instantâneas trifásicas.

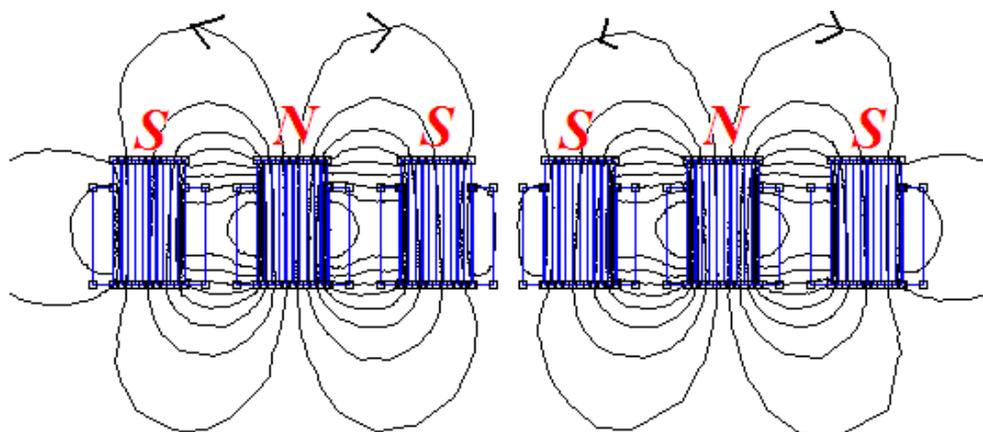
A figura 17 mostra os resultados das simulações, em (a), é apresentada a distribuição do campo magnético quando  $wt=0$ , em (b), para  $wt = \pi/3$ , em (c), para  $wt = 2\pi/3$ , em (d), para  $wt = \pi$ , em (e), para  $wt = 4\pi/3$ , e em (f),  $wt = 5\pi/3$ , respectivamente denominados como posições 1, 2, 3, 4, 5 e 6.



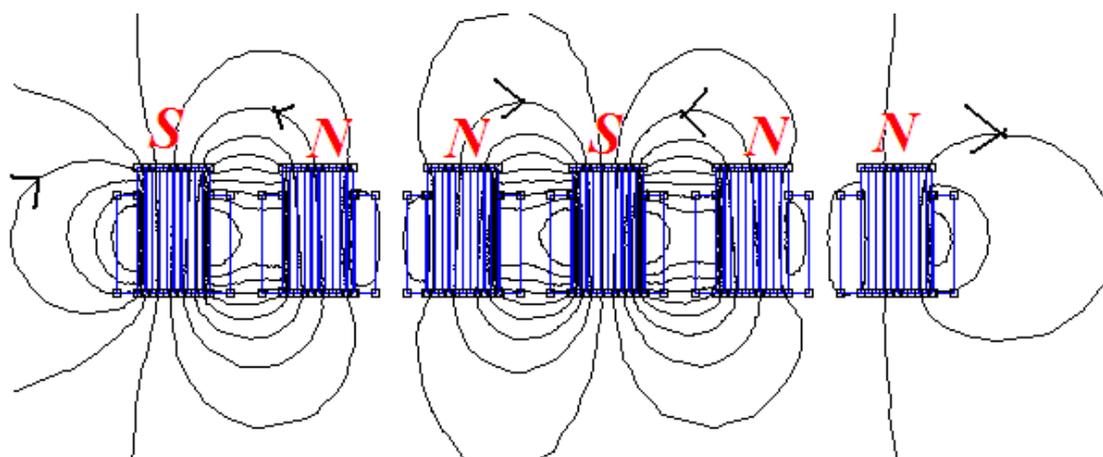
(a)



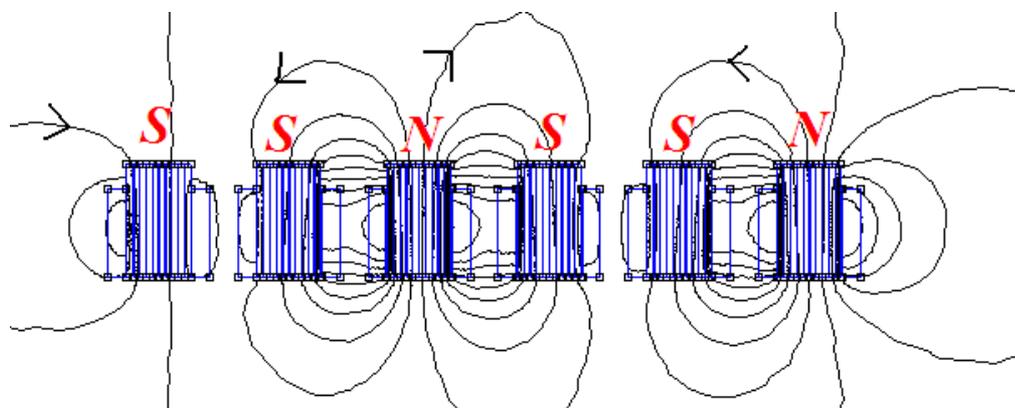
(b)



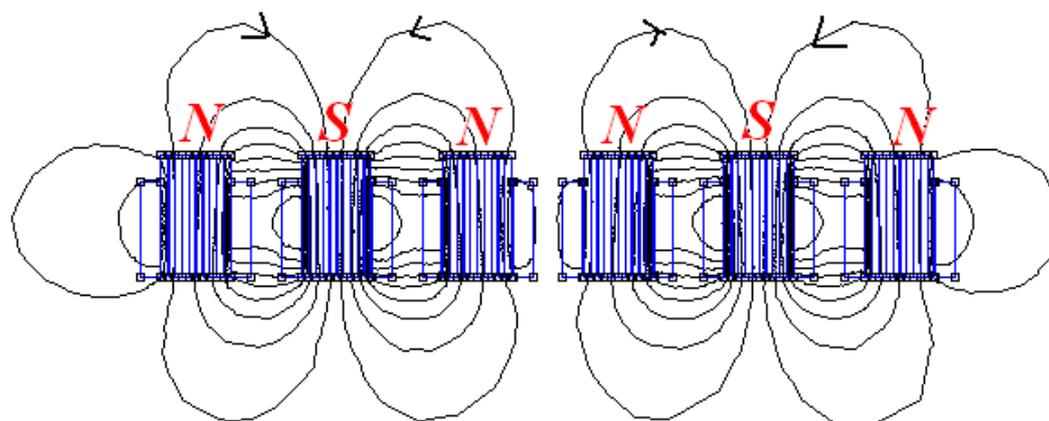
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 17 - Distribuição do campo magnético para: (a)  $wt = 0$ , (b)  $wt = \pi/3$ , (c)  $wt = 2\pi/3$ , (d)  $wt = \pi$ , (e)  $wt = 4\pi/3$ , e (f)  $wt = 5\pi/3$ .

A figura 18 mostra o mapeamento em cores da densidade de fluxo magnético relativo à figura 17(f), correspondente ao instante  $wt = 5\pi/3$ . De acordo

com as cores é possível avaliar valores aproximados da densidade de fluxo magnético.

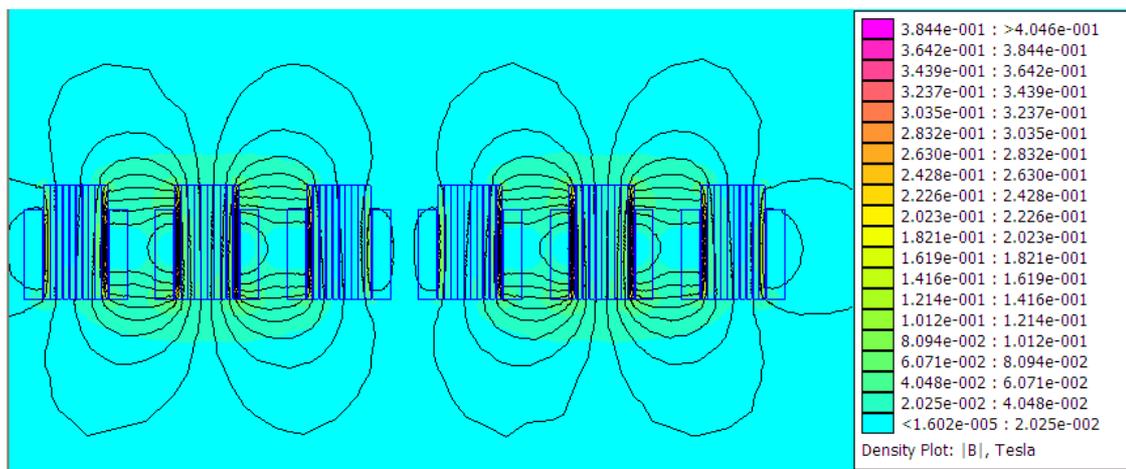


Figura 18 - Mapeamento em cores da densidade de fluxo magnético relativo à figura 17(f).

O comportamento do campo magnético viajante pode ser verificado através dos gráficos mostrados nas figuras 20(a), 20(b) e 20 (c). Cada gráfico corresponde aos valores da componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético calculados em pontos que correspondem à linha vermelha do desenho mostrado na figura 19, respectivamente para  $wt = \pi/3$  (posição 2),  $wt = \pi$  (posição 4) e  $wt = 5\pi/3$  (posição 6). Os valores foram calculados na região onde está situado o componente móvel do motor.

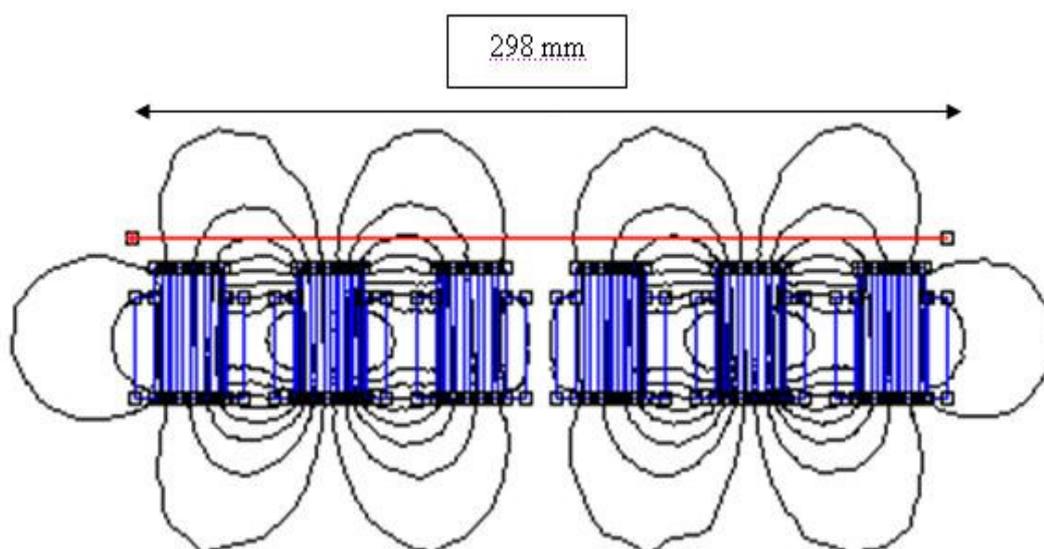
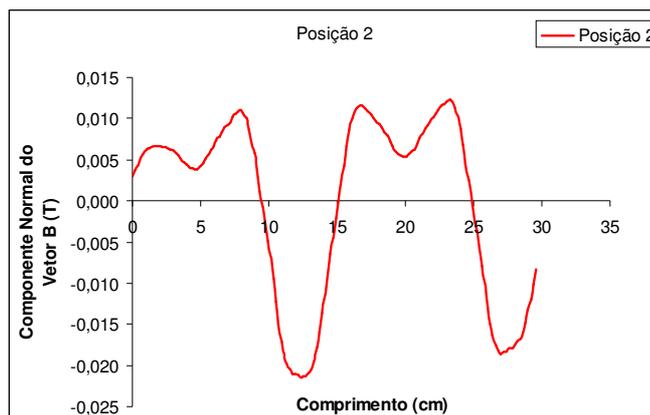
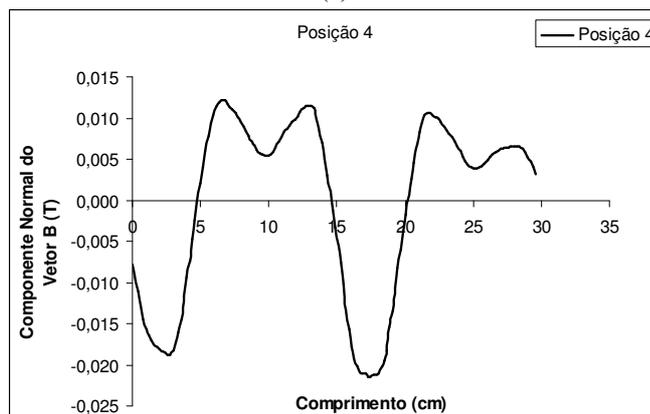


Figura 19 - Pontos onde foram calculados os valores da componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético e que correspondem à linha vermelha do desenho.

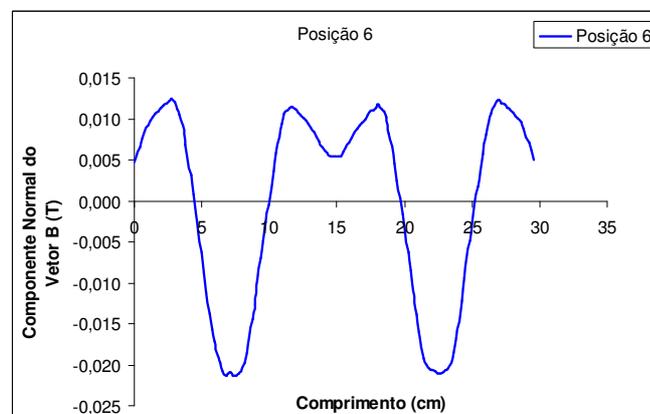
Os gráficos das figuras 20(a), 20(b), 20(c) ilustram o comportamento do campo viajante, por exemplo, quando  $wt = \pi/3$ , verifica-se uma densidade de fluxo magnético de 0,004 Tesla no deslocamento de 5 centímetros, conforme figura 20(a). Na sequência, a figura 20(b), apresenta 0,0055 Tesla para o deslocamento de 10 centímetros. Para complementar o estudo, quando  $wt = 5\pi/3$ , 0,005 Tesla corresponde a 15 centímetros no protótipo. Desta forma é possível avaliar o comportamento do campo viajante, nos diversos instantes de tempo.



(a)



(b)



(c)

Figura 20 - Comportamento do campo magnético viajante para as posições 2, 4 e 6, figuras (a), (b) e (c), respectivamente.

### 3.3 Medição de Força através da utilização de pesos

A força produzida sobre o componente móvel do motor pode ser determinada através do uso de peso padrão e uma roldana. O desenho de montagem é mostrado na figura 21(a). Pesos de massa conhecida são suspensos através de um fio, sendo que a outra extremidade do fio é presa ao componente móvel. A tensão aplicada do motor de indução linear é regulada, de forma que o componente móvel não se desloque. Nessa condição há um equilíbrio entre a força eletromagnética produzida pelo motor e a força produzida pelas massas presas ao componente móvel. Como esta força é calculada pela aceleração da gravidade, no equilíbrio, com  $F_{\text{motor}} = F_{\text{repouso}}$ , consegue-se determinar a força eletromagnética produzida pelo motor, conforme visualização na figura 21(b).

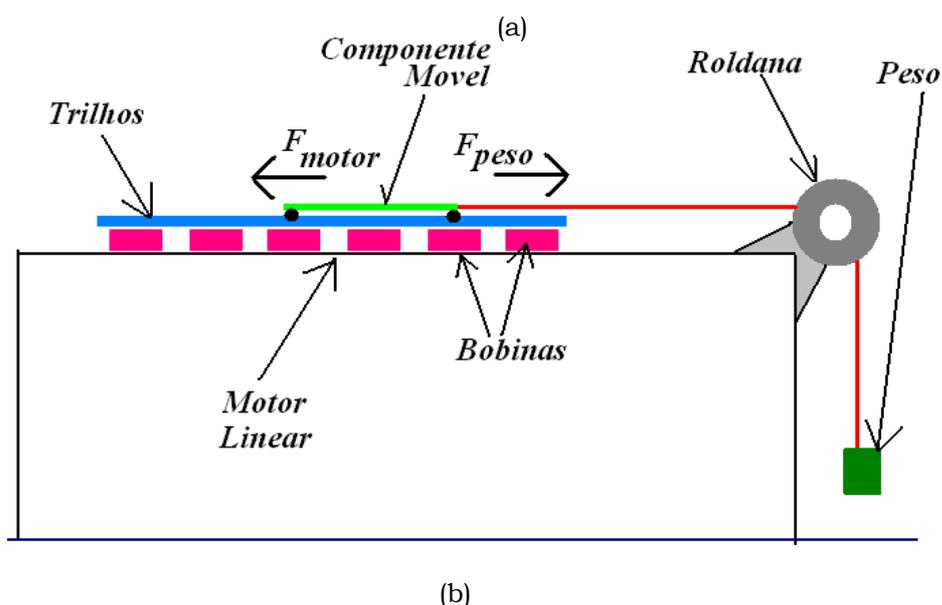
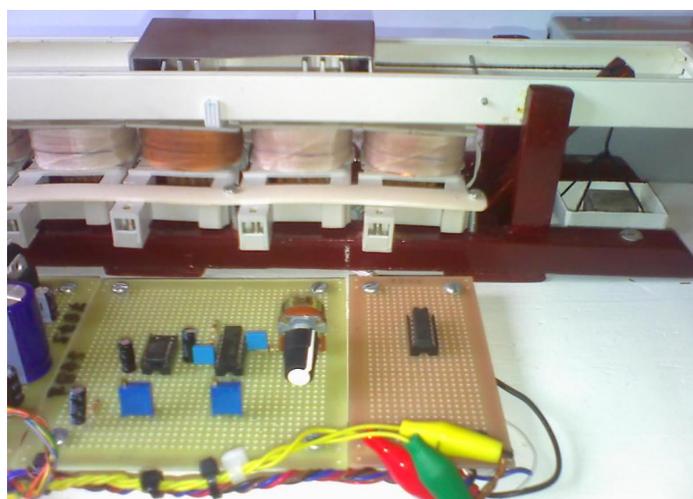


Figura 21 – Método da medição de força: (a) com utilização de célula de carga (b) com a utilização de peso.

### **3.4 Medição de Força com célula de carga**

#### **3.4.1. Elemento sensor tipo Célula de carga**

Para medição de força foi adquirida uma balança digital com o propósito de aproveitar a célula de carga. O objetivo elementar da célula de carga é fornecer um sinal elétrico quando submetido a uma deformação, através da variação da resistência elétrica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gage*.

A sensibilidade da célula de carga é diretamente influenciada pelo número de extensômetros, pela posição dos extensômetros e pela configuração na ponte de *Wheatstone* [BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2007).

A célula de carga (figura 22) utilizada apresenta 4 fios, sendo dois de alimentação, um vermelho (positivo) e outro preto (negativo); os outros dois fios correspondentes ao sinal elétrico de referência (fios verde e branco).

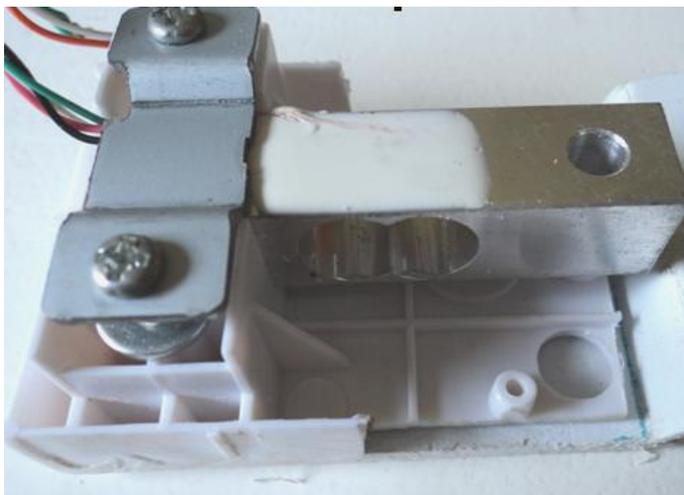


Figura 22- Célula de carga utilizada para medição de força no MLI.

Entretanto, a célula de carga necessita de um estágio de amplificação da tensão elétrica, para efetuar corretamente a medição.

#### **3.4.2. Condicionamento de sinal**

O circuito de condicionamento de sinal, conforme descrito no anexo A utiliza o LM723 (datasheet no anexo B), regulador de tensão para alimentação da célula de carga. Este regulador de tensão é alimentado com 12Vcc e ajustado para saída de 6V, destinado à célula de carga. Outros ajustes podem ser feitos conforme *datasheet*.

A etapa de amplificação do sinal da célula de carga é realizada pelo amplificador de instrumentação INA114, que conforme *datasheet* (anexo C) estabelece o ganho conforme equação 23:

$$ganho = 1 + \frac{50K}{Rg} \quad (23)$$

Onde  $Rg$  é o potenciômetro para ajuste do ganho.

No caso do circuito implementado, a tensão de entrada do amplificador de instrumentação (INA114) é amplificada, com a célula de carga sem deformação (0N). Na saída o filtro RC permite atenuar ruídos. Para alimentação do circuito de condicionamento de sinal, neste projeto, é utilizada uma fonte simétrica.

### **3.4.3 Metodologia para medição**

Para medição o seguinte procedimento foi adotado: Com o módulo de aquisição de sinais analógicos em funcionamento, efetua-se a medição, inicialmente com a célula de carga sem deformação (0 Kg) o valor lido na tela do microcomputador deverá ser zero. Quando, nesta condição, a indicação é diferente de zero, então, ajustes do circuito de condicionamento de sinal devem ser revisados (pequenas alterações de tensão na rede podem exigir novos ajustes), principalmente, para que a tensão não danifique o módulo de aquisição de sinais analógicos (limite de 50 mV). Caso a tensão na entrada do canal esteja entre 0 e 50 milivolts e a medição não esteja correta, a solução é ajustar o *offset* através do *software*.

Como através da medição com roldana foi possível estimar a força máxima de 0,5 N (aproximadamente 50 gramas), foram colocadas diversas medidas de massa entre 1grama e 50 gramas. Para cada medição de massa é associado um valor de tensão. Na figura 23 é apresentada a medição de massa de um objeto. Na figura 24 o mesmo objeto é colocado sobre a célula de carga indicando no microcomputador o valor de 9 mV.

Após calibração, a célula de carga foi colocada em contato com o elemento móvel visando deformá-la e, conseqüentemente, possibilitando verificar a variação de força.



Figura 23: Medição de massa com balança digital

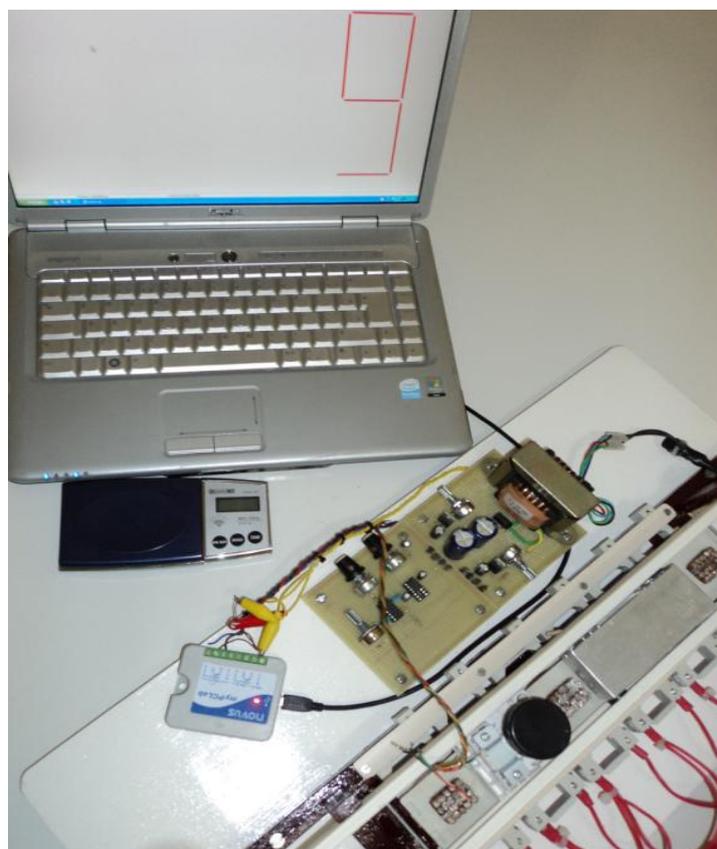


Figura 24: Indicação na tela do microcomputador.

#### **3.4.4 Módulo de aquisição de sinais analógicos**

Para a visualização da medição através do microcomputador optou-se pelo equipamento *Mypclab* da empresa *Novus*, disponibilizado pela Universidade Luterana do Brasil. O *Mypclab* é um módulo de aquisição de variáveis analógicas, com entradas configuráveis e interface USB para comunicação com o PC [NOVUS,

2010]. A figura 25 permite a visualização do módulo de aquisição de variáveis analógicas.



Figura 25 - Mypclab: Módulo de aquisição de variáveis analógicas

Fonte: NOVUS, 2010

Principais características e especificações, conforme fabricante:

Duas entradas analógicas, uma entrada digital com capacidade para contagens e sensor interno de temperatura ambiente.

- Entradas analógicas configuráveis: Termopares J, K, T, E, N, R, S e B, termorresistência Pt100 (3 fios), 4-20 mA, 0-50 mVcc ou 0-10 Vcc (este para o canal 1);
- Precisão: 0,2% da faixa máxima para Pt100, corrente ou tensão. 0,25% da faixa máxima  $\pm 3$  °C para termopares R, S e B; 0,25% da faixa máxima  $\pm 1$  °C para demais termopares;  $\pm 1,5$ °C para sensor de temperatura ambiente;
- Taxa de aquisição: 8 a 128 amostras por segundo, dependendo da resolução;
- Ambiente de operação: 0 a 50°C, 10 a 90%UR;
- Resolução AD: configurável de 15 a 11 bits, dependendo da taxa de aquisição.

O sinal do circuito de condicionamento de sinal é conectado, nos conectores 6 e 7, entrada de 0 a 50mV do canal 1 (figura 26).

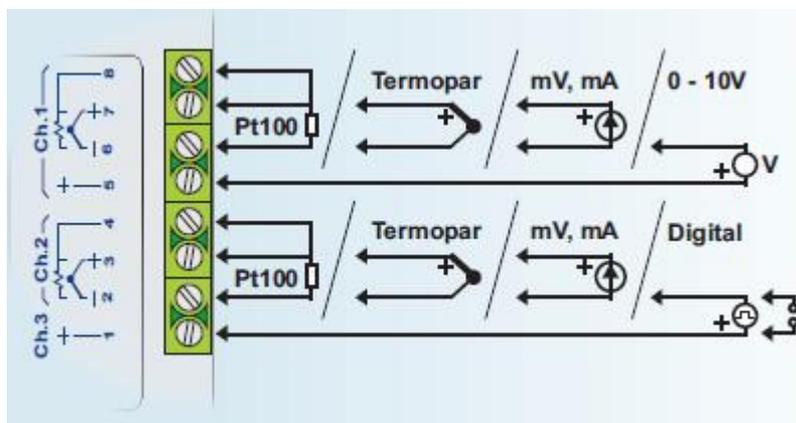


Figura 26 - Conexões possíveis no módulo de aquisição.

Fonte: NOVUS, 2010.

### 3.4.5 Software

Quanto ao *software*, aplicativo *Mypclab* versão 1.22, por meio dele, são configurados parâmetros como: identificador (*tag*) do aparelho, resolução mínima desejada, habilitação e identificação (*tag*) dos canais, tipo de entrada dos canais, unidades utilizadas, faixas de operação, ajuste da indicação, entre outros. Além disso, a aba “Diagnóstico” permite a conferência da nova configuração aplicada ao aparelho. Após a configuração do aparelho, deve ser criado um ambiente de visualização. Para tanto, deve-se criar as janelas onde serão visualizadas as variáveis de interesse e escolher o tipo de visualização (gráfico, barra, gauge, display). [NOVUS, 2010].

## 3.5 Medição de velocidade

Com o objetivo de complementar a caracterização do MLI foi possível estimar a velocidade no protótipo desenvolvido. Para tanto, a utilização de *leds* e fototransistores, desempenha a finalidade da verificação do pulso de tensão no momento em que o elemento móvel interrompe o fluxo luminoso. A análise dos pulsos em função do tempo, levando em consideração o trecho percorrido, permite estimar a velocidade. Quanto mais *leds* e fototransistores utilizados, melhor é o resultado da curva de velocidade, respeitando o limite para não ocorrer sobreposição de pulsos.

O funcionamento ocorre do seguinte modo: há um emissor de luz (neste caso o LED) e um receptor (fototransistor). Quando o LED está aceso, o fototransistor responde entrando em condução. Com o LED apagado o fototransistor entra em corte. Sabendo que podemos alterar a luminosidade do LED, obtemos assim diferentes níveis na saída. Podemos também controlar o fototransistor através de sua base, como se fosse um transistor normal (NOLL, 2007). Portanto a resposta de um fototransistor é função da intensidade luminosa e do comprimento de onda.

Para o protótipo desenvolvido foram utilizados 4 conjuntos de leds e fototransistores. Cada sinal do fototransistor é enviado para o CI 74LS32 (anexo D, *datasheet*), composto internamente por portas lógicas tipo *or*, todos os sinais são somados, para visualização em única onda. O circuito representado na figura 27, detalha a implementação.

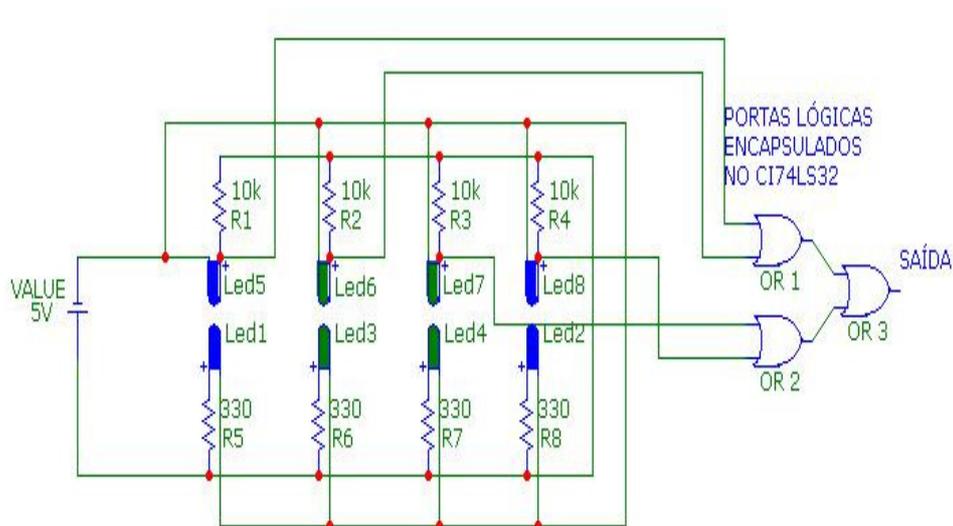


Figura 27 - Circuito implementado para estimativa de tempo.

Fonte: Autor

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do Motor Linear de Indução Trifásico Desenvolvido

Foram realizados ensaios para a verificação do comportamento da corrente nas bobinas em função da tensão aplicada e comportamento da força de propulsão.

#### 4.1.1 Testes Iniciais

Os testes iniciais foram desenvolvidos com a aplicação de tensão elétrica alternada, frequência de 60 Hertz, com alimentação trifásica para cada conjunto de 3 (três) bobinas. Em cada caso, a tensão de alimentação foi elevada gradualmente, até atingir o valor nominal de tensão de cada bobina (220 volts). Na primeira configuração escolhida, procedeu-se na alimentação trifásica em estrela para cada conjunto de 3 bobinas (Figura 28). Com estas ligações, ajustando-se o valor da tensão aplicada entre 0 e 220V, verificou-se um deslocamento reduzido do dispositivo móvel, mesmo com os valores limites de tensão. Na tabela 3, estão apresentadas as medições efetuadas.

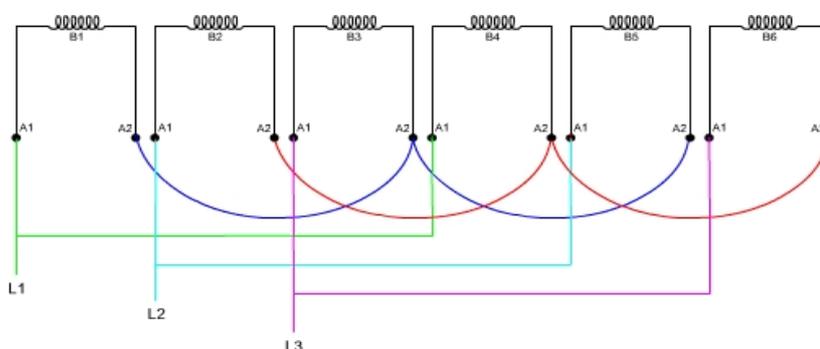


Figura 28 - Arranjo em estrela para cada conjunto de 3 bobinas.

Fonte: Autor

Tabela 3- Medições com alimentação em estrela

TENSÃO(V)	I1(A)	I2(A)	I3(A)
100	0,20	0,18	0,20
120	0,30	0,27	0,30
150	0,42	0,40	0,43
170	0,50	0,47	0,51
200	0,60	0,53	0,60
220	0,70	0,58	0,71

Com ligações em triângulo (figura 29), a partir da regulagem do valor da tensão aplicada, variando do mesmo modo, de 0 a 220V, verificou-se um desempenho melhor, com significativa movimentação do dispositivo.

Como em triângulo,  $I_L = \sqrt{3} \cdot I_F$ , portanto, a potência em triângulo é determinada conforme equações 24, 25, 26 e 27:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad (24)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot \sqrt{3} \cdot I_f \quad (25)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{V_L}{Z} \quad (26)$$

$$P = 3 \cdot \left( \frac{V_L^2}{Z} \right) \quad (27)$$

Em estrela, a potência elétrica é determinada conforme equações 28, 29, 30 e 31.

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad (28)$$

Como em estrela, corrente de linha é igual à corrente de fase.

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot \frac{V_F}{Z} \quad (29)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot \frac{\frac{V_L}{\sqrt{3}}}{Z} \quad (30)$$

$$P = \frac{V_L^2}{Z} \quad (31)$$

Portanto, confirma-se que a potência em triângulo é aproximadamente três vezes maior do que em estrela.

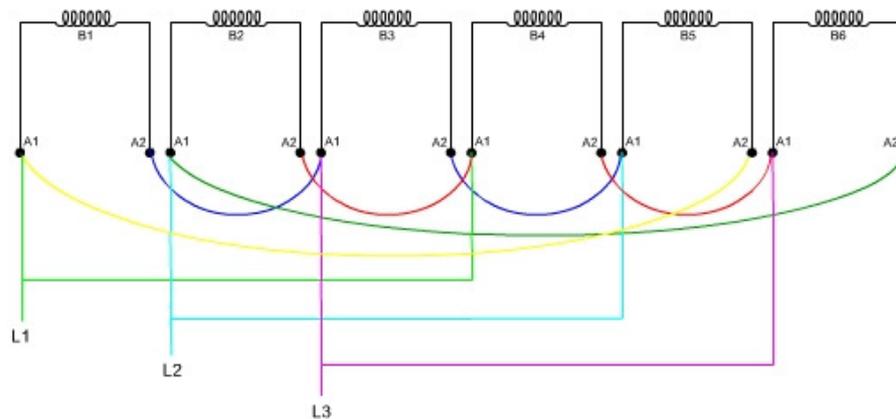


Figura 29 - Arranjo em triângulo para cada conjunto de 3 bobinas.

Fonte: Autor

As medições de tensão elétrica e corrente, com as ligações conforme figura 22, estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4- Medições com alimentação em triângulo - Fonte: Autor.

TENSÃO(V)	I1(A)	I2(A)	I3(A)
50	0,70	0,72	0,80
75	0,90	0,93	1,10
100	1,02	1,08	1,20
120	1,24	1,29	1,40
150	1,50	1,60	1,75
170	1,75	1,92	2,20
200	2,00	2,25	2,37
220	2,20	2,48	2,55

## 4.2 Medições de força com o uso de pesos

As medições estão apresentadas na tabela 5, com 12 medições de força, para distintos valores de tensão aplicada. As posições do elemento móvel correspondem à posição 1 (pos1) até a posição 12 (pos12), situadas uma para cada lado da bobina, com a extremidade do elemento móvel sobre o núcleo, conforme figura 30.

Tabela 5- Medições de força

Tensão	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos 5	Pos 6	Pos 7	Pos 8	Pos 9	Pos1 0	Pos1 1	Pos1 2
90V	0,05	0,03	0,04	0,02	0,06	0,03	0,05	0,04	0,06	0,03	0,04	0,02
100V	0,12	0,10	0,11	0,08	0,13	0,09	0,10	0,08	0,11	0,09	0,12	0,10
110V	0,20	0,17	0,19	0,16	0,18	0,17	0,21	0,19	0,19	0,18	0,22	0,17
120V	0,30	0,27	0,28	0,28	0,29	0,26	0,31	0,29	0,30	0,28	0,32	0,27
130V	0,32	0,30	0,30	0,29	0,31	0,28	0,32	0,30	0,31	0,30	0,33	0,29
140V	0,35	0,32	0,32	0,31	0,34	0,30	0,33	0,31	0,32	0,31	0,36	0,33
150V	0,38	0,35	0,37	0,35	0,39	0,36	0,38	0,37	0,39	0,35	0,40	0,36
160V	0,41	0,38	0,40	0,37	0,39	0,37	0,40	0,39	0,41	0,37	0,42	0,37
170V	0,43	0,40	0,44	0,39	0,42	0,40	0,43	0,42	0,44	0,40	0,43	0,40
180V	0,44	0,42	0,42	0,40	0,43	0,39	0,43	0,41	0,42	0,39	0,45	0,40
190V	0,45	0,41	0,43	0,40	0,44	0,41	0,46	0,42	0,45	0,40	0,46	0,41
200V	0,46	0,42	0,47	0,41	0,48	0,42	0,45	0,43	0,46	0,42	0,47	0,43
210V	0,46	0,43	0,45	0,42	0,46	0,41	0,44	0,42	0,45	0,41	0,48	0,42
220V	0,47	0,44	0,46	0,43	0,45	0,42	0,48	0,44	0,46	0,43	0,48	0,42

Observação: Medições em Newton (N), para cada posição em relação à tensão aplicada.

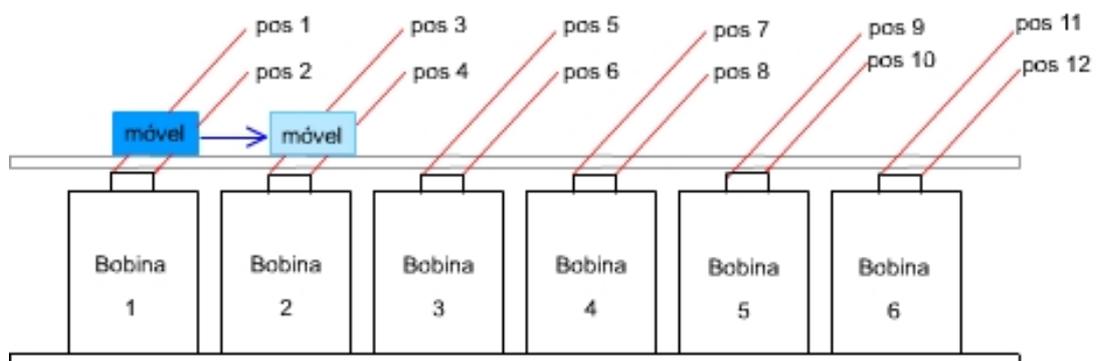


Figura 30 - Posições para medição de força no protótipo, neste caso, na posição 1(pos 1) e posição 3 (pos 3).

Para cada medição foi observada a condição de equilíbrio entre o componente móvel fixado ao peso, em relação à tensão aplicada, conforme metodologia apresentada no capítulo 3, Materiais e Métodos.

O gráfico da figura 31 demonstra a força média produzida em função da tensão aplicada. Neste gráfico é possível visualizar uma condição de saturação, na

qual, quando o valor de tensão está próximo ao valor nominal das bobinas, o resultado é uma pequena variação de força.

Os ensaios iniciaram com tensão de 90V, condição em que o protótipo desenvolvido, apresentou a condição de movimentação de massa com possibilidade de medição.

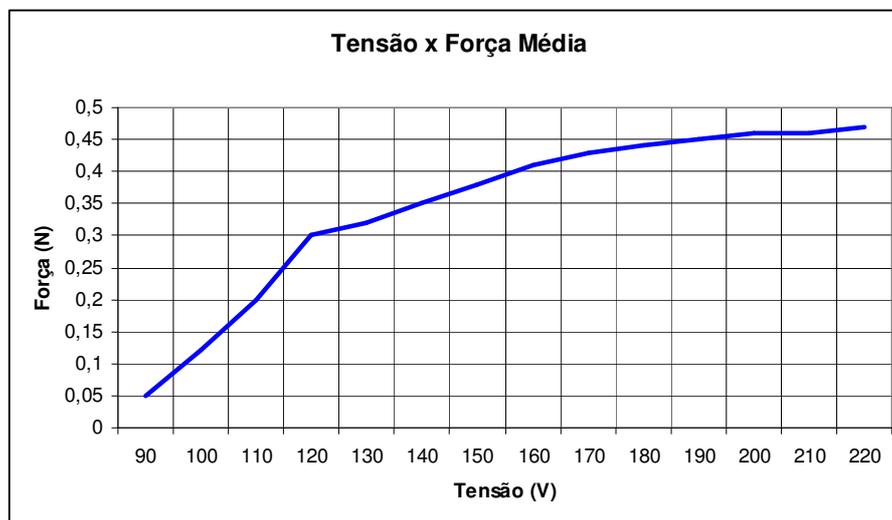


Figura 31 – Gráfico da tensão aplicada em função da força média produzida.

### 4.3 Medições de força com célula de carga

O gráfico da figura 32 apresenta a medição em milivolts em função da deformação da célula de carga.

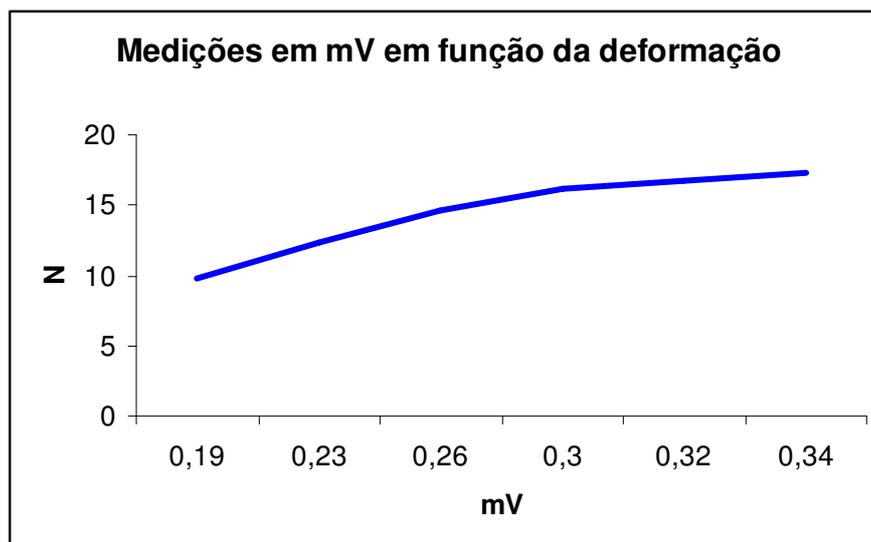


Figura 32- Gráfico da medição em mV em função da deformação na célula de carga

Houve uma variação proporcional de tensão em função da deformação da célula de carga, observando-se o comportamento praticamente linear. Entretanto,

medições com a célula de carga no protótipo apresentaram erros que culminaram na aplicação do método da utilização de pesos. A utilização de célula de carga com sensibilidade maior, resulta em medições mais precisas.

#### **4.4 Medições de velocidade média**

Como a saída dos fototransistores são de aproximadamente 5V foi possível conectar o sinal de saída na entrada de 0 a 10V do módulo de aquisição de sinais analógicos possibilitando a visualização no microcomputador. O protótipo com estas alterações está apresentado na figura 33.

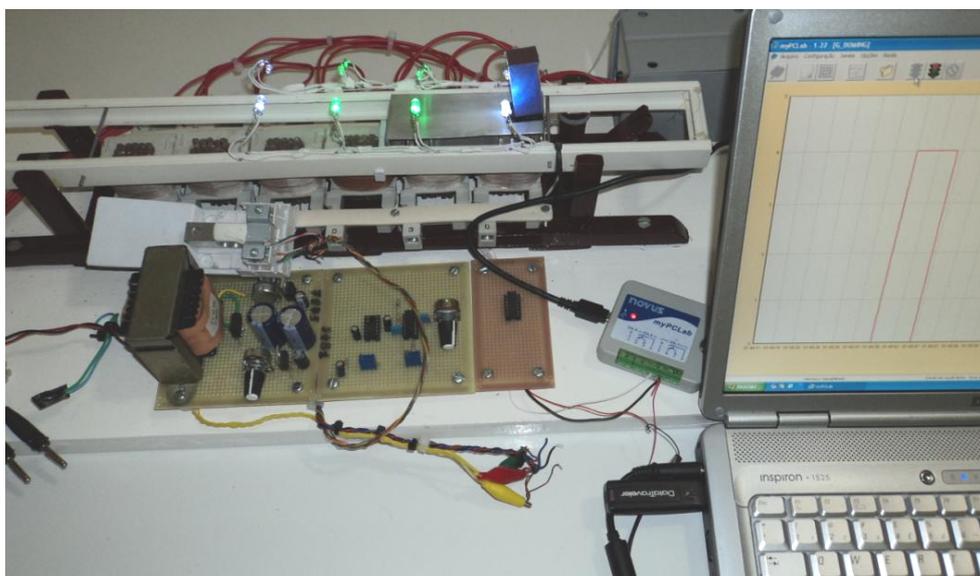
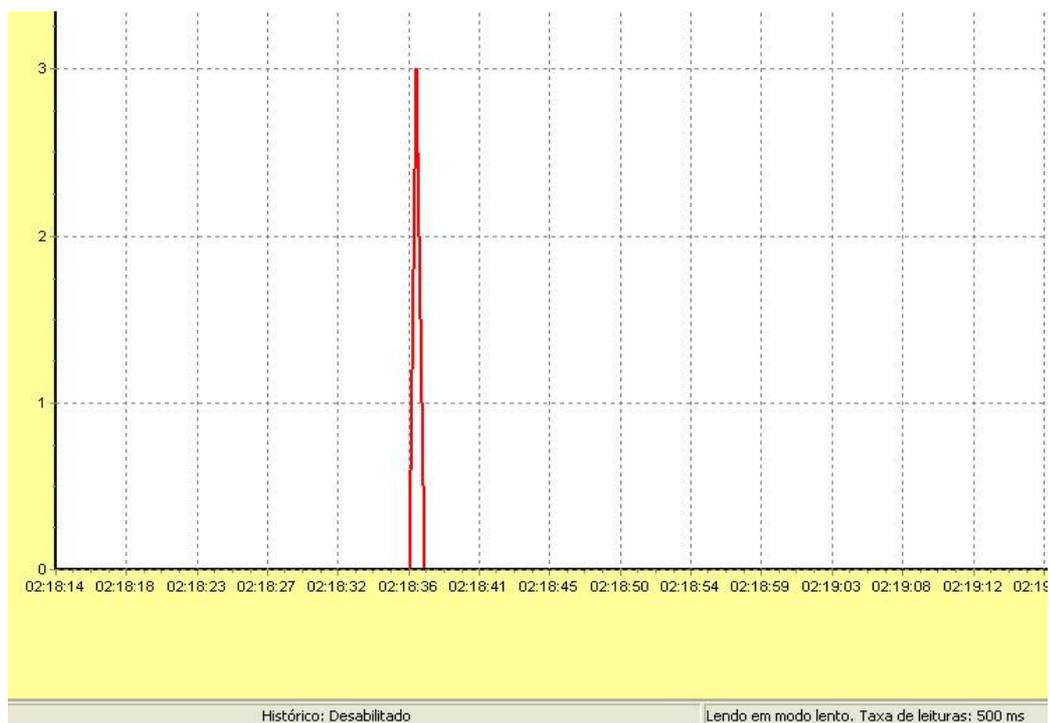


Figura 33 - Protótipo completo, concluído em 23/11/2010

Cada conjunto de led/fototransistor está distante 6 centímetros dos demais (4 conjuntos de leds/fototransistores espaçados 6 centímetros resulta em um deslocamento total de 18 centímetros).

Para a tensão nominal, 220 volts, o motor deslocou 18 centímetros (0,18 metros) em aproximadamente 400 ms (0,4 segundos), resultando em uma velocidade média de 0,45 m/s. As figuras 34(a) e 34(b) apresentam o sinal obtido através do módulo de aquisição de sinais e visualizados no microcomputador, com a configuração para leitura a cada 500 milissegundos. A figura 35 apresenta a velocidade média em função da tensão aplicada.



(a)



(b)

Figura 34 - Medição de tempo para deslocamento no MLIT (a) com tensão de 220V (b) com tensão de 140V.

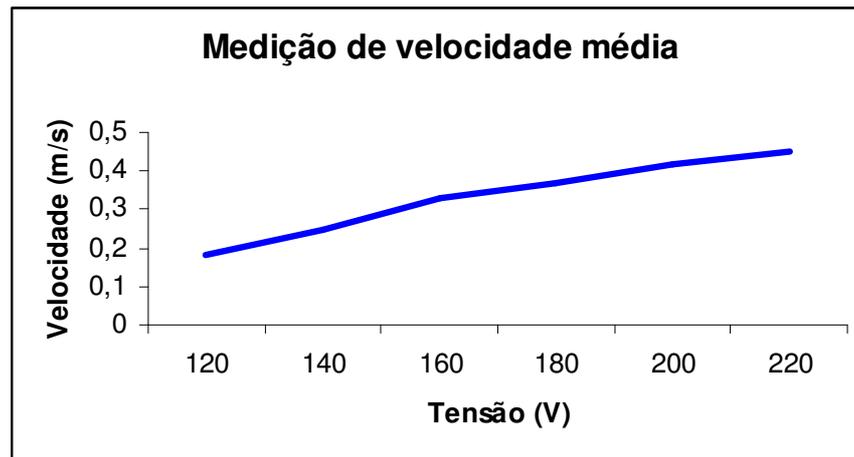


Figura 35 – Gráfico de velocidade média em função da tensão aplicada.

#### 4.4 Resultados gerais

A partir dos testes desenvolvidos foi possível realizar a tabela 6 que segue com informações que caracterizam de forma mais ampla o protótipo do MLIT. Considerou-se a ligação em triângulo devido ao melhor desempenho, ou seja, com maior velocidade de deslocamento do elemento móvel e maior força produzida.

Tabela 6- Caracterização do protótipo do MLIT desenvolvido

TENSÃO (v)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (W)	VELOCIDADE MÉDIA (m/s)	FORÇA - medição mecânica (N)	FORÇA - medição com célula de carga (N)
120	1,10	132,00	0,18	0,310	0,190
140	1,31	183,40	0,25	0,330	0,230
160	1,62	258,67	0,33	0,400	0,260
180	1,96	352,20	0,37	0,430	0,300
200	2,21	441,33	0,42	0,450	0,320
220	2,41	530,20	0,45	0,470	0,340

Avaliando as posições do elemento móvel foi verificada a concentração de aproximadamente 0,02 Tesla, nos trechos com maior força desenvolvida, comprovando o efeito da densidade de fluxo magnético no funcionamento do MLIT.

Em todos os casos foi considerado o entreferro de 2 mm, condição ideal específica para este protótipo, pois entreferros menores causariam maior vibração e, conseqüentemente, maior atrito mecânico. Entreferros maiores, por sua vez, comprometeriam a interação do campo magnético com o elemento móvel.



## 5. CONCLUSÕES

Após diversos tipos de ligações, alterações das distâncias relacionadas ao entreferro e modificação do tamanho do elemento móvel, obteve-se o protótipo do motor linear de indução trifásico com movimentação da chapa de alumínio com tensão de alimentação a partir de 90 volts. Possibilitando com o ajuste de tensão até 220 volts, alimentação trifásica em delta, o funcionamento com capacidade de movimentação de carga, conseqüentemente, possibilitando medições de força.

A simulação eletromagnética, através da análise numérica do comportamento do campo magnético do software FEMM, permitiu avaliar a distribuição das linhas de campo magnético e comparar com os resultados práticos. Observou-se, nos locais de maior fluxo magnético, a força magnética superior em relação aos trechos intermediários e na posição final

A etapa de verificação de força através da utilização da célula de carga e com a utilização de pesos, permitiu estimar a força produzida pelo componente móvel e comprovar de forma prática a medição da Força de Lorentz.

A medição de velocidade complementou o projeto, caracterizando assim, importantes parâmetros do motor linear de indução trifásico.

Para projetos futuros fica a possibilidade de automatizar e controlar o MLIT. Com objetivos comerciais, o protótipo poderá ser alterado para percorrer maiores deslocamentos, aproveitando informações obtidas neste projeto.

Fica a satisfação pelo funcionamento adequado do MLIT, recompensa pelo empenho no projeto.



## 6. REFERÊNCIAS

- 1 - RODRIGUES, A. LEÃO - Accionamentos Electromecânicos Especiais - F.C.T., Universidade Nova de Lisboa, 1973.
- 2 - NASAR, S. A.; BOLDEA, I. - Linear electric motors: theory, design, and applications - Prentice-Hall, 1987.
- 3 - FITZGERALD, A.E; KINGSLEY, JR; UMANS, STEPHEN- Máquinas Elétricas- 6ª Edição - Editora Bookman, 2006.
- 4 - SILVEIRA, MARILIA AMARAL - Notas de aula de Conversão Eletromecânica de Energia 1 - Universidade Luterana do Brasil – RS - 2007.
- 5 - KRAUS, JOHN D.; CARVER, KEITH R.- Eletromagnetismo- 6ª.Edição - Editora Guanabara Dois S.A. – Rio de Janeiro – 1978.
- 6 - SILVEIRA, MARILIA AMARAL, Estudo de um novo atuador planar - Tese de Doutorado - UFRGS, 2003.
- 7- RINALDI, VAGNER, Dissertação: Estudo de um motor Linear Tubular de Relutância Chaveado de Fluxo Transversal, UFRGS – Porto Alegre, 2004.
- 8 - BALBINOT,ALEXANDRE .BRUSAMARELLO, VALNER, Instrumentação e Fundamentos de Medidas - Volume 2 – 1ª. Edição- Editora LTC, 2007.
- 9 - NOVUS- Fabricante de equipamentos Eletrônicos. Disponível em: [HTTP://www.novus.com.br](http://www.novus.com.br). Acesso no 2º Semestre de 2010.
- 10- CEFET – FLORIANÓPOLIS – SC Prof. Valdir Noll. Disponível em <http://www.cefetsc.rct-sc.br/vnoll/fotoscondutivos.pdf> Acesso no 2º Semestre de 2010.
- 11- UFMG – LABORATÓRIO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO I – Experimentos de Instrumentação Industrial Prof. Anísio Rogério Braga – DAAE/CEFET-MG, Prof. José Carlos Rodrigues – DELT-UFMG, Profa. Carmela Maria Polito Braga – DELT-UFMG. Acesso no 2º.Semestre de 2010, disponível em: [http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/Experimentos\\_Instrumentacao.pdf](http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/Experimentos_Instrumentacao.pdf)

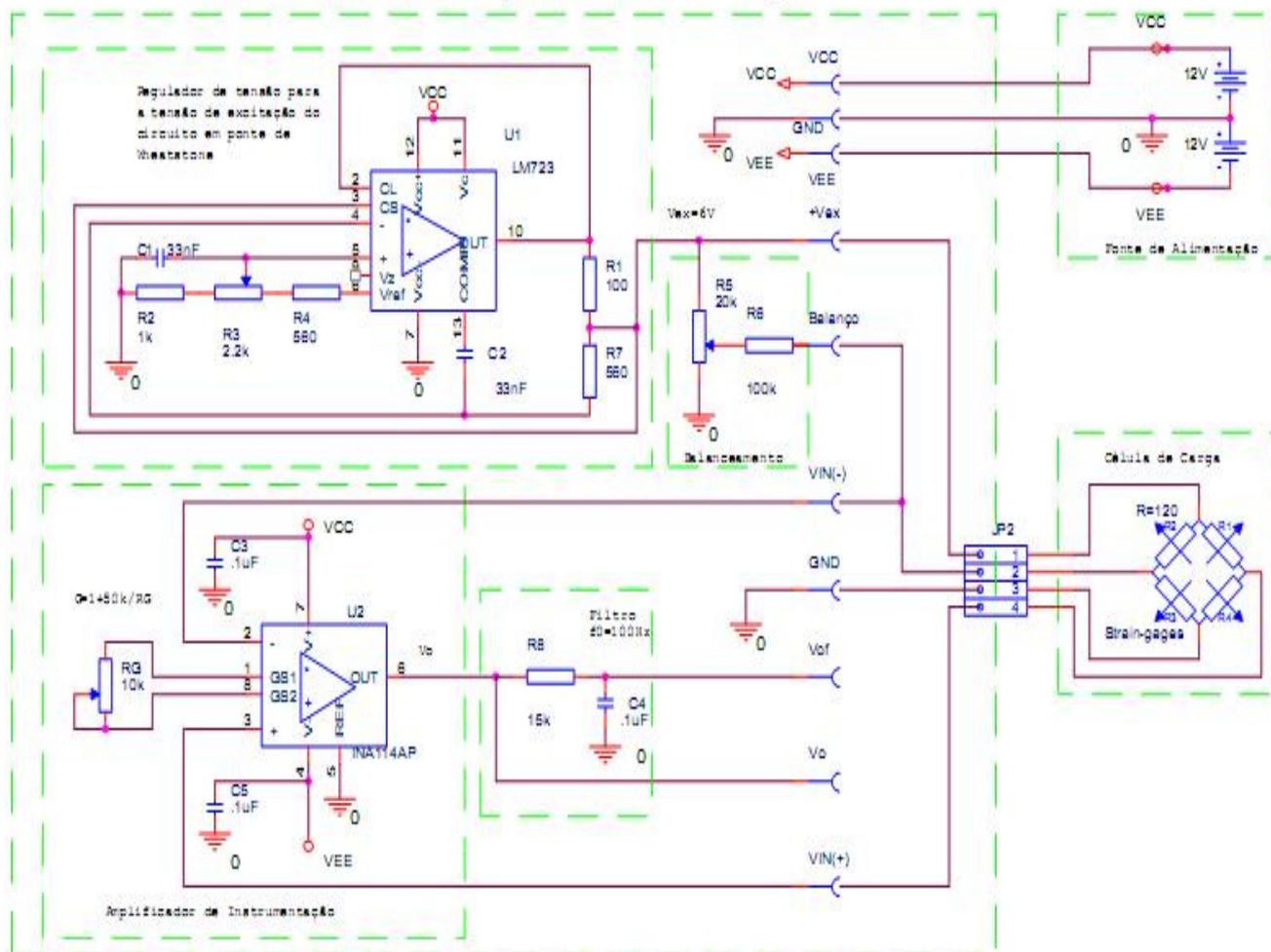


## **OBRA CONSULTADA**

SADIKU, MATTHEW N.O., ALEXANDER, CHARLES K.- Fundamentos de Circuitos Elétricos- 2ª. Ed. – Porto Alegre : Bookman, 2003.

## ANEXO A – CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO

### Módulo Condicionador para Células de Carga



Fonte: DELT/UFMG, 2010

## ANEXO B – DATASHEET LM723

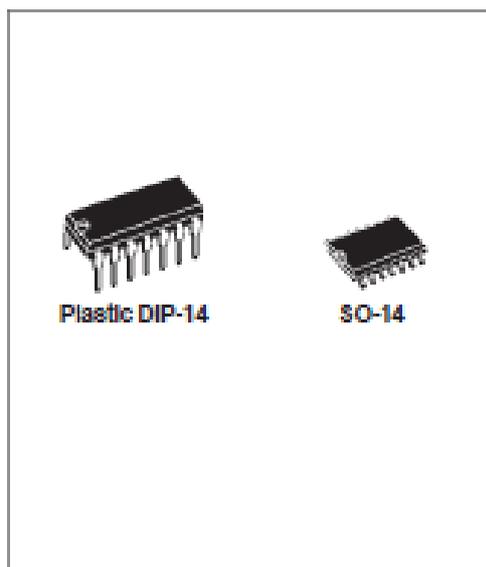
**LM723**

### HIGH PRECISION VOLTAGE REGULATOR

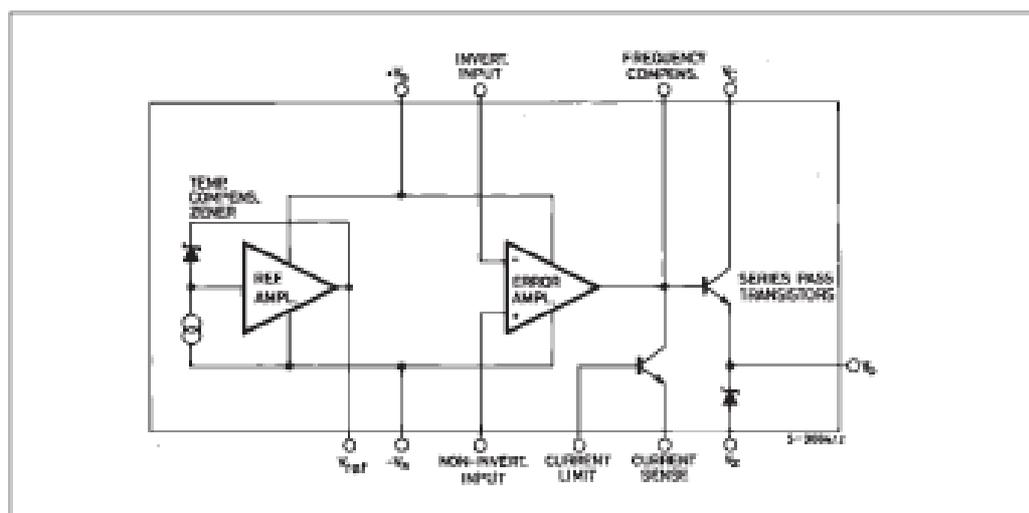
- INPUT VOLTAGE UP TO 40V
- OUTPUT VOLTAGE ADJUSTABLE FROM 2 TO 37V
- POSITIVE OR NEGATIVE SUPPLY OPERATION
- SERIES, SHUNT, SWITCHING OR FLOATING OPERATION
- OUTPUT CURRENT TO 150mA WITHOUT EXTERNAL PASS TRANSISTOR
- ADJUSTABLE CURRENT LIMITING

#### DESCRIPTION

The LM723 is a monolithic integrated programmable voltage regulator, assembled in 14-lead dual in-line plastic and SO-14 micropackage. The circuit provides internal current limiting. When the output current exceeds 150mA an external NPN or PNP pass element may be used. Provisions are made for adjustable current limiting and remote shut-down.



#### BLOCK DIAGRAM



September 1998

1/12

## ANEXO C – DATASHEET INA114

# INA114

---

### Precision INSTRUMENTATION AMPLIFIER

---

#### FEATURES

- LOW OFFSET VOLTAGE: 50 $\mu$ V max
- LOW DRIFT: 0.25 $\mu$ V/°C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 2nA max
- HIGH COMMON-MODE REJECTION: 115dB min
- INPUT OVER-VOLTAGE PROTECTION:  $\pm$ 40V
- WIDE SUPPLY RANGE:  $\pm$ 2.25 to  $\pm$ 18V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 3mA max
- 8-PIN PLASTIC AND SOL-16

#### APPLICATIONS

- BRIDGE AMPLIFIER
- THERMOCOUPLE AMPLIFIER
- RTD SENSOR AMPLIFIER
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION

#### DESCRIPTION

The INA114 is a low cost, general purpose instrumentation amplifier offering excellent accuracy. Its versatile 3-op amp design and small size make it ideal for a wide range of applications.

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. Internal input protection can withstand up to  $\pm$ 40V without damage.

The INA114 is laser trimmed for very low offset voltage (50 $\mu$ V), drift (0.25 $\mu$ V/°C) and high common-mode rejection (115dB at G = 1000). It operates with power supplies as low as  $\pm$ 2.25V, allowing use in battery operated and single 5V supply systems. Quiescent current is 3mA maximum.

The INA114 is available in 8-pin plastic and SOL-16 surface-mount packages. Both are specified for the  $-40^{\circ}$ C to  $+85^{\circ}$ C temperature range.

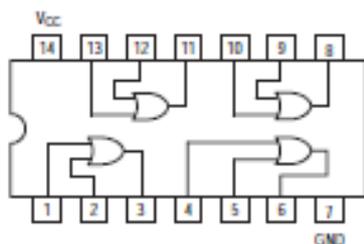
International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85714 • Street Address: 6750 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 766-1111 • Telex: 915-862-1111  
 Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAX: (520) 540-4133 (USA/Canada Only) • Cable: BURROCORP • Telex: 965-4481 • FAX: (520) 959-1515 • Immediate Product Info: (520) 965-4132

©1992 Burr-Brown Corporation
FD5-1142D
Printed in U.S.A. March, 1992

## ANEXO D – DATASHEET 74LS32

### SN74LS32

#### Quad 2-Input OR Gate



#### GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
$V_{CC}$	Supply Voltage	4.75	5.0	5.25	V
$T_A$	Operating Ambient Temperature Range	0	25	70	$^{\circ}\text{C}$
$I_{OH}$	Output Current – High			-0.4	mA
$I_{OL}$	Output Current – Low			8.0	mA



**ON Semiconductor**

Formerly a Division of Motorola

<http://onsemi.com>

**LOW  
POWER  
SCHOTTKY**



PLASTIC  
DIP  
CASE 648



SOIC  
DIP  
CASE 761A

#### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
SN74LS32N	14 Pin DIP	2000 Units/Box
SN74LS32D	14 Pin	2500/Tape & Reel