

Projeto de um elevador com contrapeso utilizando um motor de indução linear

T. R. Fernandes Neto, R. S. T. Pontes, L. M. Menezes, H. A. Oliveira

GRUPO: ☐ A ☐ B ☒ C ☐ D ☐ E

TEMA: Sistemas Elétricos e Eletrônica de Potência

PALAVRAS CHAVE: eletrônica de potência, inversor trifásico, motor de indução linear, transporte vertical, controle digital.

RESUMO - Este trabalho apresenta a concepção de um protótipo de elevador com cabo, utilizando o motor de indução linear (MIL) como máquina de tração e conseqüentemente o desenvolvimento de um inversor para o acionamento do MIL. Desta maneira o desenvolvimento de um inversor específico para a alimentação do motor linear, propicia diversas formas de acionamento do elevador, através de uma escolha adequada dos níveis de tensão eficaz, do defasamento angular e da frequência da tensão fundamental de saída. Como resultado procura-se estabelecer um novo paradigma para o transporte vertical, através de uma inovadora técnica de construção e arranjo do sistema com um motor linear como contrapeso, permitindo o aumento da confiança, conforto e velocidade.

ABSTRACT - This work looks at a conception of a roped elevator prototype, using a linear induction motor (LIM) as traction machine and hence a development of a linear drive. Thus the development of a specific inverter to feeding the linear motor, allows several ways to drive the elevator, through a suitable choice of the RMS voltage levels, an angular phase displacement and a fundamental frequency of the output voltage. As result tries to establish a new paradigm of the vertical conveying, through a new construction technique and arrangement of the system with counterweight allowing an increase of trustworthy, comfort and costless.

INTRODUÇÃO

Atualmente na grande maioria das aplicações, onde o movimento de translação é necessário utiliza-se um motor elétrico rotativo como fonte de força motriz, para a transformação do movimento rotativo em um movimento linear, se faz

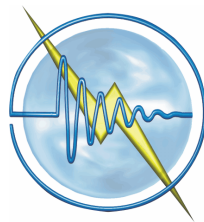
necessária à utilização de um complexo sistema mecânico formado por engrenagens, eixos e roscas sem fim. Estes sistemas mecânicos para transmissão de energia, quando utilizados diretamente, produzem grandes perdas, acentuado desgaste devido ao atrito das partes mecânicas, mesmo com a utilização de fluidos de baixa viscosidade para a lubrificação, aumentando desta forma os custos operacionais, principalmente os relativos à manutenção. Portanto a utilização de um motor elétrico que desenvolva diretamente o movimento de translação, para aplicações de transporte, resultaria em menor custo operacional, maior confiabilidade e menor manutenção.

Este trabalho busca o desenvolvimento de um novo sistema de transporte vertical utilizando um motor de indução linear, alimentado por um conversor específico, no qual se implanta a técnica de acionamento desejada.

ESTUDO DO MOTOR DE INDUÇÃO LINEAR

Os motores lineares podem ser compreendidos como sendo o resultado de uma máquina rotativa, a qual tenha sido cortada ao longo de um plano axial e estendida, como pode ser vista na Fig. 1, seu desenvolvimento teve início concomitantemente com o das máquinas elétricas rotativas, no final do século atrasado, assim para cada tipo máquina elétrica rotativa (síncrona, indutância, relutância e corrente contínua) existe uma equivalente linear. Segundo Laithwaite e Nasar (1970) foram concedidas patentes de motores lineares em 1890 a Mayor Pittsburh – USA que descreve uma máquina bastante rudimentar.

No início, dificuldades no seu acionamento levaram a um uso restrito com poucas e singelas



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

aplicações, enquanto o acionamento da máquina de corrente alternada rotativa, ocorria com facilidade em tensão e frequência fixas. Outros problemas devido aos efeitos de extremidade longitudinal e lateral existentes na máquina lineares não permitiram a popularização de seu uso em aplicações rotineiras, fazendo a máquina linear, constar basicamente como referência teórica, por quase toda a primeira metade do século XX.



Fig. 1. Obtenção de um motor linear a partir de um rotativo.

Os desenvolvimentos da eletrônica de potência associada aos microprocessadores permitiram controlar a velocidade, ajustar a força propulsora e controlar a frenagem do motor linear, isto com eficiência e segurança. Desta forma algumas aplicações estão tornando-se vantajosas quando comparadas com as equivalentes acionadas por motores elétricos rotativos.

As perspectivas de aplicações futuras dos motores lineares no parque industrial são cada vez mais promissoras, podendo ser citadas: prensas, pontes rolantes, esteiras transportadoras, bate-estacas, bombeamento de metais líquidos, máquinas ferramentas, portas móveis, abertura de comportas, escadas rolantes, aplicações militares e aeroespaciais, hiper-velocidade, propulsão de navios e submarinos, transporte de ferro gusa na indústria siderúrgica, aplicações biomédicas, elevadores, transporte e elevação de cargas em armazéns. [1]

O MOTOR LINEAR EM ELEVADORES

O motor linear tem sido pesquisado para uma utilização no transporte vertical, já que a característica principal é o movimento de translação, propiciando um movimento sem mecanismos de transformação, aumentando a eficiência e a confiabilidade, além de permitir a redução na chamada “casa de máquinas”.

Segundo [1] desde o início das pesquisas para a utilização do motor linear em transporte vertical, o tipo do motor elétrico (síncrono, indução e relutância) a ser usado tornou-se uma grande fonte de discussão entre os pesquisadores. Já que vários arranjos podem ser feitos na estrutura do elevador, tais como: o motor realizar o trabalho de deslocar todas as massas viajantes ou utilizar um cabo com contrapeso aliviando o motor, neste

caso o motor pode ser parte integrante do contrapeso.

Assim a utilização do motor linear em elevadores oferece: [2]

- Desempenho comparado a um motor rotativo.
- Operação suave com um maior conforto na subida e descida.
- Melhor manutenção e fácil acesso à inspeção.
- Dispensa construção da casa de máquinas.
- Economia de energia e redução da potência exigida.
- Altas velocidades.

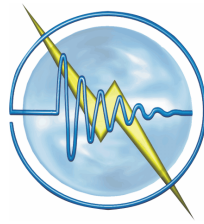
PROTÓTIPO DE UM ELEVADOR USANDO O MOTOR DE INDUÇÃO LINEAR BILATERAL

Para a comprovação teórica experimental, projetou-se um protótipo de um elevador com o acionamento por um motor de indução bilateral, que serviria de tração e contrapeso. Para início do projeto foi determinado que o motor linear fosse experimental e tivesse um tamanho reduzido devido às condições de altura do pé direito do laboratório (GPAR) do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, onde o protótipo seria instalado. Com as limitações físicas definidas, foi estudada qual topologia do motor linear deveria ser usada para o projeto. Para tanto se dimensionou primeiramente o motor linear, depois a estrutura mecânica do elevador, em seguida o inversor de acionamento e por fim o sistema de controle implantado em um microprocessador e uma unidade de processamento digital de sinal (DSP).

DIMENSIONAMENTO DO MIL

O motor a ser construído deve possuir uma baixa velocidade devido ao percurso de 3m, assim a velocidade máxima foi limitada em 1,2m/s para uma frequência de 20 Hz e uma força de 200N, para uma tensão de alimentação de 220 volts.

A partir destes dados o motor foi dimensionado segundo [1],[3-5], utilizando chapas de aço silício de grãos não orientados para construir o núcleo do indutor. O indutor deveria possuir 12 pólos magnéticos, para se utilizar toda a extensão da chapa de dimensões 450x100mm. Devido às restrições de construções mecânicas, acomodação do fio na ranhura e passo polar limitado devido à baixa velocidade, optou-se por ranhuras abertas retangulares.



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

A estrutura mecânica do elevador protótipo, foi dimensionada para um percurso de 3m, com duas paradas da cabina de passageiros ao longo do percurso e uma carga útil da cabina de passageiros de 50kg.

Utilizando (1), (2) e (3) foram obtidas as dimensões do indutor que são observadas na Tabela 1.

$$L_{\tau} = (2.p.\tau + wc + c_1) \quad (1)$$

Sendo:

- L_{τ} - Comprimento do indutor (mm)
- $2.p$ - Número de pólos
- wc - Passo da bobina (mm)
- c_1 - Largura do dente da ranhura (mm)

Tabela 1. Dimensões do indutor

Comprimento do indutor	450mm
Largura do indutor	70mm
Altura da culatra	60mm

$$h_{1y} = (0,3...0,5).\tau.Bm \quad (2)$$

Sendo:

- Bm - Densidade do fluxo magnético no entreferro (0,7- 1,2T)
- h_{1y} - Altura da culatra do primário (mm)

$$L_i = \frac{A}{L_{\tau}} \quad (3)$$

Sendo:

- A - Area do indutor (mm²)

As ranhuras do primário têm dimensão de 5mm de largura em (4), e com 30mm de profundidade. A largura dos dentes possui a mesma profundidade das ranhuras, e os dentes de entrada e saída possuem largura de 32,5mm. Os pacotes possuem 39 ranhuras .

$$t_1 = \frac{2.p.\tau}{z} \quad (4)$$

Sendo:

- t_1 - Passo da ranhura (mm)
- z - Numero de ranhuras

O enrolamento de cada pacote foi projetado para possuir uma configuração trifásica de 12 pólos para uma maior força, tendo uma distribuição de dupla camada nas trinta e três ranhuras centrais e mono camada nas seis ranhuras de extremidades segundo (5), sendo três na extremidade de entrada e três na extremidade de saída, como pode ser visto na Fig. 2.

$$z = p.m.q \quad (5)$$

Sendo:

- p - Número de pólos
- m - Número de fases
- q - Número de ranhuras por pólo por fase

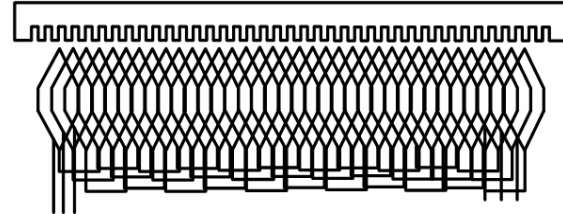


Fig. 2. Enrolamento do trifásico do MIL

Esta configuração de enrolamento e juntamente com o alongar os dentes externos, busca suavizar o os efeitos de extremidade.

O enrolamento do indutor possui 100 espiras do fio nº 22AWG (0,33mm²) segundo (6) e (7), com passo polar de 3cm.

$$N_1 = \frac{(A_{my}.\tau.p)}{3.\sqrt{2}.I_1} \quad (6)$$

Sendo:

- N_1 - Número de voltas por fase
- A_{my} - Densidade de corrente (A/m²)
- I_1 - Corrente de fase (A)

$$N_{sl} = \frac{N_1}{p.q} \quad (7)$$

Sendo:

- N_{sl} - Número de condutores em cada ranhura

O resultado final do enrolamento e do indutor do motor linear projetado pode ser visto na Fig. 3.

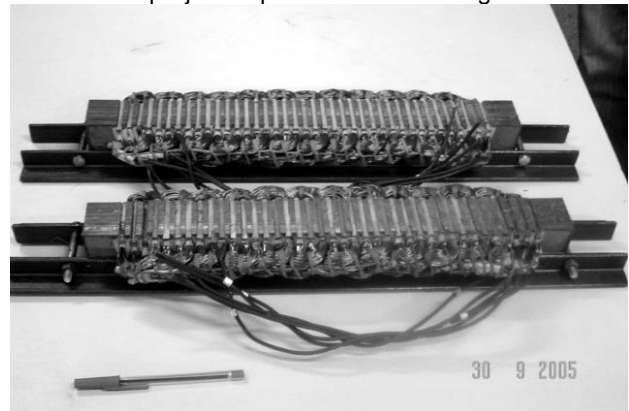
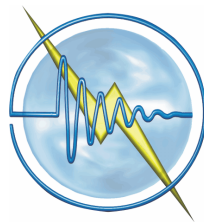


Fig. 3. Indutor do motor linear projetado

ESTRUTURA MECÂNICA

Neste protótipo o linor é composto de uma chapa de alumínio de 3000x5,6x12mm, devido à boa



condutibilidade de corrente e a má condutibilidade magnética, o alumínio faz o mesmo papel de uma gaiola de esquilo em um motor convencional.

Para o desenvolvimento da estrutura mecânica, o motor linear foi pensado como um contrapeso devido a sua característica de, massa. Desta forma imaginou-se uma estrutura de elevador de tração com contrapeso, sendo o contrapeso o próprio motor de tração.

Na Fig. 4 pode-se observar a estrutura de suporte do indutor que possui regulagem de entreferro em ambos indutores, desta maneira consegue-se um ajuste fino do entreferro entre os indutores.

Na Fig. 5 temos a estrutura final construída. Toda estrutura é composta de cantoneiras “T” em aço 1020 de ¼ pol e barras “chatas” e “metalon” também em aço 1020. O protótipo foi projetado com uma estrutura aberta no qual se pode realizar ajustes internos.

INVERSOR DOUBLE-BRIDGE

Esta pesquisa propõe uma nova topologia de inversor trifásico, fazendo necessário utilizar uma topologia em que forneça ao motor, correntes desequilibradas, menor frequência de operação com maior tensão de alimentação. Sendo assim o inversor será o inversor double-bridge como observado na Fig. 6, fornecendo ao motor as correntes desequilibradas requeridas. [6]

Assim o inversor terá uma saída de linha de 220Vrms e para uma frequência nominal de 20Hz.

As especificações do inversor projetado são apresentadas a seguir na Tabela 2. Variadas condições de alimentação (desequilíbrio da tensão de alimentação e assimetria entre fases) do MIL foram consideradas.

Tabela 2. Especificações do projeto.

Potência aparente de saída	5400VA
Tensão eficaz de alimentação	380Vac
Tensão eficaz de saída	220Vac
Frequência da rede elétrica	60Hz
Frequência de comutação	7500Hz
Frequência de saída	20Hz

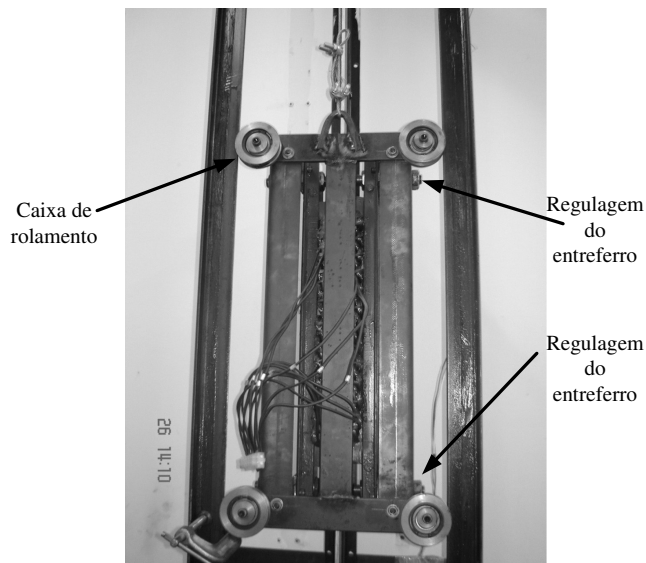


Fig. 4. Estrutura de suporte do indutor.



Fig. 5 Estrutura do elevador.

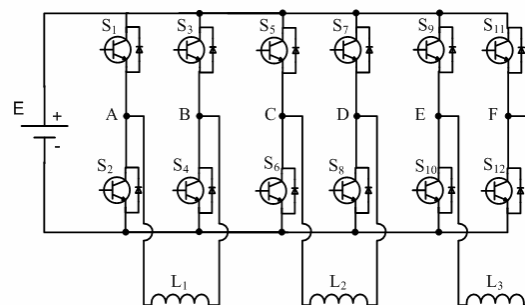
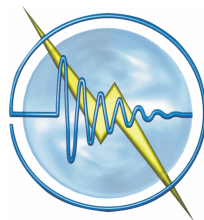


Fig. 6. Estrutura do inversor trifásico double-bridge.



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

TÉCNICA DO CONTROLE DE VELOCIDADE

A escolha de uma estratégia de controle é muito importante na determinação das características gerais de desempenho de um sistema de acionamento.

Nesta pesquisa, utiliza-se o controle de velocidade em malha aberta do motor de indução linear operando a frequência ajustável, pois o protótipo do sistema de transporte vertical tem como requisito uma partida e uma frenagem suaves (baixas aceleração e desaceleração).

A estratégia escolhida para a realização das rampas de aceleração e desaceleração foi o controle escalar, pois é mais comumente utilizada para o inversor PWM malha aberta (sem realimentação da velocidade).

A implementação do controle deste sistema foi realizada com o uso de um processador digital de sinais (DSP) da TMS320F2812 da Texas Instruments, devido a sua alta velocidade de processamento, alta capacidade de memória e realização de instruções matemáticas utilizando uma representação numérica de ponto fixo ou flutuante.

O DSP realiza um controle totalmente digital da frequência e da tensão de linha na saída do inversor, como também controla as rampas de aceleração e desaceleração do MIL. Desta maneira foi implantada, via programação do DSP, uma curva V/f digital, que permite a redução da tensão proporcionalmente à frequência da fundamental, de modo que o fluxo no entreferro se mantenha constante.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O INVERSOR DOUBLE-BRIDGE

A Fig. 7 apresenta as formas de onda de corrente de saída, a Fig. 8 apresenta as formas de onda da tensão de saída para o motor de indução linear projetado para o sistema de transporte vertical, para uma tensão eficaz de saída de 220V, uma frequência de 20Hz e uma defasagem angular de 120° graus.

A partir da técnica de controle V/f constante, foi feito um programa no DSP, para que o motor obtivesse uma partida em rampa de aproximadamente 1,5s.

A Fig. 9 e Fig. 10 apresentam as formas de onda da corrente do motor de linear projetado, para uma partida e uma parada, com uma rampa de tensão variando de 0-220-0V e a frequência variando de 0-20-0Hz, para uma defasagem de 120° graus.

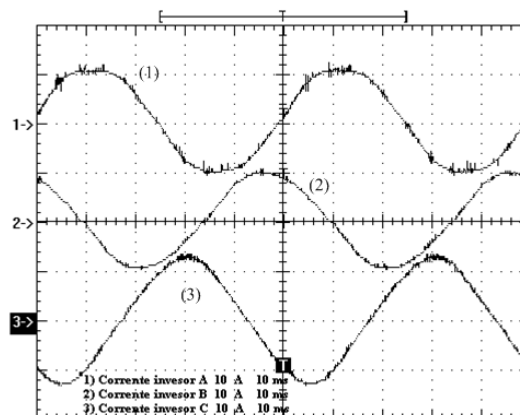


Fig. 7. Corrente de saída para o inversor double-bridge. 1)=2)=3)10A/div; 10ms/div.

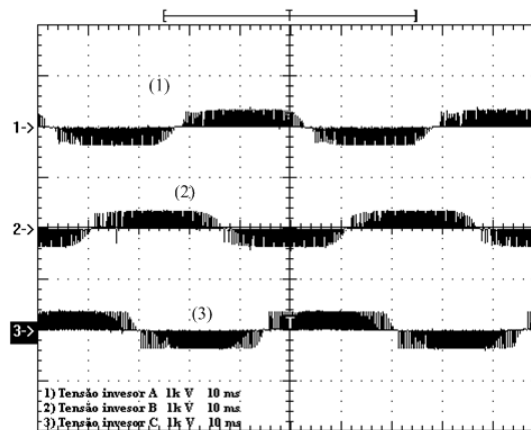


Fig. 8. Tensão de saída para o inversor double-bridge. 1)=2)=3)1kV/div; 10ms/div.

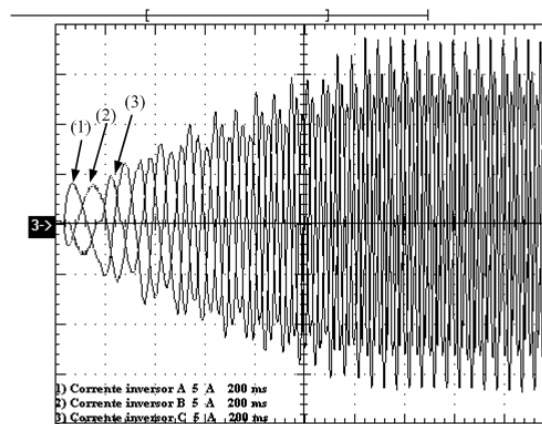
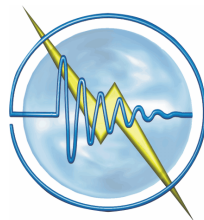


Fig. 9. Corrente do MIL, para uma rampa de aceleração. 1)=2)=3)5A/div; 200ms/div.



III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO,
EMPREGABILIDADE E EMPREENDEDORISMO

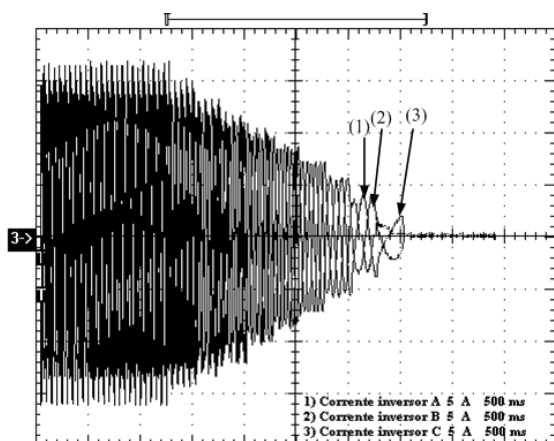


Fig.10: Corrente do MIL para uma rampa de desaceleração. 1)=2)=3)5A/div; 500ms/div.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o estudo teórico e prático de um sistema de transporte vertical utilizando o motor de indução linear. Um protótipo de elevador utilizando um MIL bilateral foi construído e ensaiado, constando da estrutura mecânica do elevador, do sistema de freio eletromagnético, do sistema de acionamento e controle de parada.

Como o inversor de tensão double-bridge corresponde a três inversores monofásicos em ponte completa, o DSP pode controlar de maneira independente cada um deles, ou seja, impor níveis de tensão eficaz, defasagem angular e frequência da tensão fundamental de saída, diferentes. Com isso seu uso no acionamento do motor linear, o torna uma ferramenta para impor diferentes condições de alimentação para estudos futuros.

Com o uso desta tecnologia, ocorrerá uma quebra de paradigma, devido a uma nova maneira de construção de elevadores, não existentes nas normas de padronizações.

Assim com a utilização do motor linear em elevadores o usuário, terá uma operação suave, um maior conforto na subida e descida, devido ao controle de velocidade feito pelo inversor, melhor manutenção, fácil acesso à inspeção, devido à topologia do motor fornecer essa facilidade, a ausência da casa de máquinas, podendo assim economizar material de construção civil, economia de energia, redução da potência exigida, devido à otimização do motor a carga e altas velocidades devido à característica do motor linear no projeto de sua velocidade final, sem alterar na força nominal do motor ou uso de motores redutores.

A aplicação desta tecnologia visa os mercados onde há armazenagem como os centros de distribuição do setor varejista, o setor portuário, aplicações industriais ou transporte vertical de passageiros.

AGRADECIMENTOS

À FUNCAP (Fundação cearense de apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico) que contribuiu com apoio financeiro necessário à realização desse trabalho e desenvolvimento científico

REFERÊNCIAS

- [1] J.F. Gieras, (1994) Linear Induction Drives, Clarendon Press, Oxford. London, UK. 298p.
- [2] J.F. Gieras; P.D. Hartzenberg, I.J. Magura and M. Wing (1993), Control of an elevator drive with a single-sided linear motor, The European Power Electronics Association, 353-358.
- [3] G.A. Simone (1989), Uma Contribuição ao Estudo dos Conversores Assíncronos Lineares, Uberlândia – MG, Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado.
- [4] G.A. Simone (2000), Máquinas de Indução Trifásicas - Teoria e Exercícios, São Paulo: Editora Érica.
- [5] E.R. Laithwaite (1976), Máquinas de Inducción Especiales, Editorial Labor, S. A., Barcelona, Espanã. 371p.
- [6] T.R. Fernandes Neto e R.S.T. Pontes (2006), Design of a vertical conveying system using a three-phase double-sided linear induction motor, Seventh international conference on industrial applications, Recife.
- [7] T.R. Fernandes Neto (2007), Sistema de transporte vertical utilizando motor de indução linear bilateral, Fortaleza – CE, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de mestrado, 194p.