Campus de São Carlos

Modelagem e simulação computacional do
motor de indução linear (M.I.L.)

Aristóteles Toline Giacomini

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MOTOR DE INDUÇÃO LINEAR (M.I.L.)

Eng.^o Eletricista Aristóteles Toline Giacomini

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016473

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga

São Carlos

1998

Class.	TESF-EESC
Cutt.	2480
Tombo	T0120198

st 0980600

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

G429m Giacomini, Aristóteles Toline
Modelagem e simulação computacional do motor de
indução linear / Aristóteles Toline Giacomini. --
São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga.

1. Motor de indução linear. 2. Simulação de MIL.
I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ARISTÓTELES TOLINE GIACOMINI**

Dissertação defendida e aprovada em 06-04-1998
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Titular **DELIO PEREIRA GUERRINI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **RENATO CRIVELLARI CREPPE**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita" - Campus de Bauru)

Prof. Doutor **DENIS VINICIUS COURY**
Coordenador da Área de Engenharia Elétrica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*À minha família,
pelo apoio e a confiança empenhados,
durante mais esta etapa de minha vida*

Ao Professor Doutor Gilio A. Simone, pelo tempo dispensado e pela contribuição fundamental a qual fez surgir novas idéias no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Senhor Jesus A. Catelli Dória, Técnico do Laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP.

Ao CNPq pela bolsa concedida, sem a qual este trabalho não seria possível.

SUMÁRIO

FIGURAS.....	v
TABELAS.....	vii
ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA.....	viii
RESUMO.....	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO I - HISTÓRICO E ESTADO DA ARTE.....	3
1. Introdução.....	3
2. Histórico: Máquinas lineares nos séculos XIX e XX.....	5
3. Diferentes tipos de motores elétricos lineares.....	10
CAPÍTULO II - MODELAGEM MATEMÁTICA DO M.I.L.....	11
Introdução.....	11
Parte I – Conceituação do M.I.L.....	11
I.1. Fenômenos típicos do M.I.L.....	11
I.2. Considerações.....	14
I.3. Desenvolvimento matemático.....	15
I.4. Circuito equivalente: Inclusão do efeito de borda longitudinal.....	21
I.5. Comentários.....	28
Parte II - Modelo Matemático do M.I.L.....	29
CAPÍTULO III - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS.....	33
1. Introdução.....	33
2. Descrição do motor.....	34
3. Procedimento experimental.....	36
CAPÍTULO IV - SIMULAÇÃO DO M.I.L. E RESULTADOS.....	42
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	54
ANEXOS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
BIBLIOGRAFIA GERAL.....	72
APÊNDICE.....	74

FIGURAS

FIGURA 1 - Processo de divisão e planificação da máquina produzindo motor linear..	4
FIGURA 2 - Motor linear com rodas. (a) indutor curto e (b) induzido curto.....	4
FIGURA 3 - Fileira de ímãs constituindo um tipo de motor linear.....	5
FIGURA 4 - (a) Comprimento ativo total e (b) Comprimento ativo parcial.....	8
FIGURA 5 - O “Electropult”.....	8
FIGURA 6 - Unidade primária sobre seu trilho.....	8
FIGURA 7 - Atividade mundial em torno da máquina linear.....	9
FIGURA 8 - A onda síncrona $b_s(x)$ e a onda do efeito de extremidade de entrada $b_e(x)$...	13
FIGURA 9 - Circuito equivalente tipo T, do M.I.L.....	26
FIGURA 10 - Esquema do M.I.L. para obtenção de parâmetros.....	28
FIGURA 11 - Modelo simplificado do M.I.L.....	34
FIGURA 12 - Esquema das ligações do enrolamento do motor [13].....	34
FIGURA 13 - Sonda monofásica.....	37
FIGURA 14 - Sonda trifásica.....	37
FIGURA 15 - Motor de indução linear (M.I.L.) [13].....	37
FIGURA 16 - Bancada de medições para o M.I.L.....	37
FIGURA 17 - Indutâncias relacionadas com a fase A em função do deslocamento (x).....	38
FIGURA 18 - Indutâncias relacionadas com a fase B em função do deslocamento (x).....	38
FIGURA 19 - Indutâncias relacionadas com a fase C em função do deslocamento (x).....	38
FIGURA 20 - Indutâncias mútuas do secundário em função do deslocamento (x).....	38
FIGURA 21 - Indutância própria do secundário em função do deslocamento (x).....	39
FIGURA 22 - Curva da força em função da velocidade.....	43
FIGURA 23 - Curva da velocidade em função do tempo.....	43
FIGURA 24 - Curva da força em função da velocidade.....	43
FIGURA 25 - Curva da velocidade em função do tempo.....	43
FIGURA 26 - Força em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 50 V.....	44
FIGURA 27 - Velocidade em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 50 V.....	44
FIGURA 28 - Força em função velocidade para $m = 5$ kg e tensão de 50 V.....	45
FIGURA 29 - Força em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 100 V.....	45

FIGURA 30 - Velocidade em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 100 V.....	46
FIGURA 31 - Força em função velocidade para $m = 5$ kg e tensão de 100 V.....	46
FIGURA 32 - Força em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 50 V.....	47
FIGURA 33 - Velocidade em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 50 V.....	47
FIGURA 34 - Força em função velocidade para $m = 10$ kg e tensão de 50 V.....	48
FIGURA 35 - Força em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 100 V.....	48
FIGURA 36 - Velocidade em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 100 V.....	49
FIGURA 37 - Força em função velocidade para $m = 10$ kg e tensão de 100 V.....	49
FIGURA 38 - Força em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 50 V.....	50
FIGURA 39 - Velocidade em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 50 V.....	50
FIGURA 40 - Força em função velocidade para $m = 20$ kg e tensão de 50 V.....	51
FIGURA 41 - Força em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 100 V.....	51
FIGURA 42 - Velocidade em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 100 V.....	52
FIGURA 43 - Força em função velocidade para $m = 20$ kg e tensão de 100 V.....	52
FIGURA 44 - Velocidade em função do tempo[03].....	53
FIGURA 45 - Força em função do tempo [03].....	53
FIGURA 46 - Força em função velocidade [03].....	53
FIGURA 47 - Diagrama de blocos do simulink (esquematização).....	65
FIGURA 48 - Tela do diagrama de blocos da corrente ipa.....	66
FIGURA 49 - Tela do diagrama de blocos da obtenção da posição (x).....	66

TABELAS

TABELA 1 - Medida das tensões, realizadas com a sonda da figura 12.....	57
TABELA 2 - Medida das correntes, realizadas com a sonda da figura 12.....	58
TABELA 3 - Medida das tensões do secundário, realizadas pela sonda da figura 12 e 13.	59
TABELA 4 - Medida das correntes no secundário, realizadas pela sonda, figura 12 e 13..	61
TABELA 5 - Indutâncias em função da posição x , utilizando os dados das tabelas 2 e 3...	63
TABELA 6 - Indutâncias em função da posição x , utilizando os dados das tabelas 4 e 5...	64

ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

B_{me}	- valor de pico de uma onda viajante na extremidade de entrada
B_{ms}	- é o valor de pico da onda viajante síncrona
c	- constante
C.A.	- corrente alternada
C.C.	- corrente continua
cv	- cavalo vapor
$\cos \varnothing$	- fator de potência
d	- espessura do secundário
D	- coeficiente de atrito
e_s	- força eletromotriz
E_1	- tensão induzida no estator negligenciando o efeito de extremidade longitudinal
E_{me}	- valor de pico da f.e.m. no entreferro devido ao efeito de extremidade
E_{ms}	- valor de pico da f.e.m. induzida pela densidade de fluxo magnético
f.e.m	- força eletromotriz
f.m.m	- Força Magnetomotriz
f_x	- força propulsora
F	- força desenvolvida
F_{max}	- força de partida (força de ruptura)
g	- espessura do entreferro
ipa	- corrente de primário na fase a
ipb	- corrente de primário na fase b
ipc	- corrente de primário na fase c
isa	- corrente de secundário na fase a
isb	- corrente de secundário na fase b
isc	- corrente de secundário na fase c
I_0	- corrente de magnetização
I_1	- corrente de entrada r.m.s.
k_C	- fator de Carter
k_e	- fator de extremidade

k_w	- fator de enrolamento
k_{w2}	- fator de enrolamento para a harmônica fundamental espacial.
k_{we}	- fator de enrolamento para a onda do efeito de extremidade
L	- indutância
m	- massa do motor
m_f	- número de fases
m_{f1}	- número de fases do primário
M	- indutância mútua
M.I.L.	- motor de indução linear
N	- número de espiras por fase
N_p	- número de espiras por par de pólo por fase
N_{pe}	- número de espiras por par de pólo / fase para a onda do efeito de extremidade
p	- pares de pólo
P	- potência
q	- número de ranhuras por pólo por fase
R	- resistência
s_{cr}	- escorregamento crítico
T_e	- constante de atenuação da onda
v	- velocidade
v_{end}	- velocidade na extremidade de entrada
v_s	- velocidade linear, ou velocidade síncrona
V_x	- velocidade de movimento na direção do deslocamento x
w_c	- passo da bobina
x	- deslocamento genérico de um ponto qualquer.
X	- reatância
Z	- impedância
Δ	- variação
δ	- ângulo entre a onda da densidade de fluxo magnético e a do efeito de extremidade
f	- frequência de entrada
η	- rendimento do motor de indução linear
σ_{Al}	- condutividade
τ	- passo polar
τ_e	- passo polar para a onda da extremidade de entrada
$\mathfrak{R}$	- relutância

RESUMO

O Motor de Indução Linear (M.I.L.) vem, de longa data, sendo analisado e utilizado em aplicações normalmente de tração elétrica. No Brasil é estudado por poucas pessoas e o pioneirismo no assunto coube aos Professores Morency Arouca e Délio Pereira Guerrini, nos anos iniciais da década de 70, no Departamento de Engenharia Elétrica na EESC/USP.

Assim, utilizando um protótipo construído pelo Professor Guerrini, desenvolveu-se este trabalho com vistas a complementar sua documentação.

O trabalho consiste na Modelagem Matemática, Obtenção dos Parâmetros e Simulação Computacional, com algumas constatações experimentais.

ABSTRACT

The Linear Induction Motor (L.I.M.) has been analyzed and applied specially in electrical traction. In Brazil, it was studied very well by a few persons, the pioneers of L.I.M. were the Professors Morency Arouca and Délio Pereira Guerrini, in the early 70's, at the Department of Electrical Engineering of the E.E.S.C./U.S.P.

Thus, this work has been developed on top of a reduced model of the L.I.M. that was built by Professor Guerrini. The objective of this work is to continue the analysis of the L.I.M.

The work is comprised of three parts: Mathematical Modeling, Obtainment of the Parameters and the Computational Simulation, with some experimental checking.

INTRODUÇÃO

Este trabalho visa a elaboração de um modelo matemático com um equacionamento adequado, através do qual será realizada a simulação computacional, considerando para tanto todas as regiões de funcionamento do Motor de Indução Linear, que daqui para a frente poderá ser citado apenas como M.I.L. Em sequência são analisados os resultados obtidos, na medida do possível, com os resultados do modelo real, idealizado por GUERRINI (1972) [13], bem como com trabalhos mais recentes, como CHANGAN [03].

Para tanto, será utilizado um equacionamento análogo ao do motor de indução trifásico rotativo, como o modelo utilizado por TURNER [34], já que nesse artigo há uma similaridade com o modelo real reduzido sob análise, isto é, um motor de indutor curto, face única (single-sided) e secundário (linor) de ferro laminado, sobreposto por uma capa de alumínio, que é a placa de reação, simulando desta forma a gaiola de esquilo.

O objetivo de simular o M.I.L., ou qualquer outro sistema, é a previsão de problemas que possam surgir quando da construção, seja de um modelo físico reduzido, seja de um modelo real. No caso deste trabalho, espera-se contribuir para a melhoria do modelo reduzido existente no Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, retomando o assunto.

Para se obter os parâmetros elétricos do M.I.L., utilizaram-se sondas que substituíram, estaticamente a placa de reação, no entreferro. Tais sondas, com as mesmas dimensões das bobinas do primário e com número de espiras conhecido, permitiram a avaliação das indutâncias próprias e mútuas, envolvidas, como função do deslocamento.

De posse dos resultados, foi utilizado o programa de elaboração de gráficos denominado ENERGRAF. Os dados utilizados no programa foram processados por meio de regressão geométrica e linear, obtendo-se as equações das indutâncias em função da posição.

Há pelo menos dois caminhos a se considerar com vistas à simulação do M.I.L. O primeiro, que envolve integração espacial, como o Método dos Elementos Finitos, cujo material pesquisado está em Bibliografia Geral, foi descartado tendo em vista as dificuldades materiais relativas ao desenvolvimento e utilização de programas desta natureza, tanto em termos de *software* quanto em termos de *hardware*; o segundo, que envolve integração temporal, como os métodos de Adams-Bashfort, Euler, Runge-Kutta, etc... Optou-se pelo segundo, haja vista a quantidade de referências, bem como a maior acessibilidade ao método.

Desta maneira pode-se implementar a simulação computacional do M.I.L., como foi desde o início a proposta de trabalho, desenvolvido nesta dissertação.

A seguir o trabalho é dividido em capítulos, os quais são:

- Capítulo I - Histórico e Estado da Arte;

Neste capítulo é tratado o surgimento do M.I.L. e suas variações e aplicações durante os séculos XIX e XX.

- Capítulo II - Modelagem Matemática do M.I.L.;

É feita a modelagem matemática do M.I.L., baseada no Método dos Circuitos Magneticamente Acoplados, de forma análoga ao motor de indução trifásico, gaiola de esquilo.

- Capítulo III - Obtenção dos Parâmetros;

Neste capítulo obteve-se por meio de medição e cálculo, os parâmetros necessários para a simulação do M.I.L.

- Capítulo IV – Simulação do M.I.L. e Resultados;

Apresentam-se aqui os resultados obtidos na simulação do M.I.L.; são mostrados também alguns resultados experimentais obtidos nas referências.

- Capítulo V – Conclusões.

Dentro das conclusões analisam-se os resultados das simulações frente aos resultados práticos e de simulações existentes nas referências.

CAPÍTULO I – HISTÓRICO E ESTADO DA ARTE

1. - INTRODUÇÃO

No âmbito das máquinas elétricas, a grande maioria é projetada para produzir movimento de rotação, explorando, desse modo, os benefícios da circularidade, do qual o homem tem tirado vantagens desde a descoberta da roda. As forças de eletromagnetismo também podem ser empregadas para produzir movimento linear, como por exemplo em uma máquina de indução linear na qual o primário (indutor), consiste de uma série de bobinas, conduzindo correntes impostas por uma fonte de alimentação trifásica e o secundário (induzido), uma placa condutora sobre uma base ferromagnética, a qual recebe ação por indução (de correntes e tensões). [17]

Um método simples de introdução às máquinas lineares é comparando-a com uma máquina de indução convencional, pois o primário, guarda uma analogia com o estator da máquina de rotação convencional. [17]

Um motor linear pode ser definido como sendo o resultado de uma máquina rotativa, a qual tenha sido cortada ao longo de um plano e estendida, como a máquina de indução da figura 1 [16], este é um processo imaginário da transformação da máquina rotativa em linear. Isto não significa que as máquinas lineares não possam ter partes rotativas e, além disso, elas podem ser do tipo induzido curto ou indutor curto, como mostrado na figura 2 [13].

Tanto o sistema da figura 3, como outros sistemas similares, incluindo aqueles que contém ímãs permanentes, são considerados como sendo embreagens e não motores. Se as bobinas do sistema mostrado na figura 3 são estacionárias, e a corrente nelas é ligada e desligada em seqüência, assim como as correntes induzidas nestas, e produzem força sobre o condutor secundário, somente então este é considerado um motor linear. Os motores lineares devem cumprir as leis que regem a *conversão eletromecânica de energia*. [16] e [17]

Primeiramente, têm-se muitas aplicações para os dispositivos lineares que não apresentem saída de energia de natureza mecânica, porque não existe movimento, não podendo serem definidas como máquinas. No caso de máquinas elétricas lineares, o efeito da linearização são novos fenômenos, os quais geralmente reduzem seu desempenho abaixo daquele correspondente às máquinas rotativas convencionais (fatores de extremidade longitudinal e transversal, correntes nas bordas, etc.). Se a energia elétrica é a alimentação de uma máquina a fim de produzir apenas força, esta é considerada como dentro da definição de um motor linear. [16] e [17]

Na figura 3, é possível observar uma fileira de ímãs (permanentes ou eletroímãs com alimentação C.C.) que são deslocados mecanicamente, fornecendo a força que o condutor secundário não possui, constituindo desta maneira um *motor linear* [16].

FIGURA 1 - Processo imaginário de planificação da máquina rotativa, produzindo um motor linear. [16]

FIGURA 2 - Motor linear com rodas. (a) indutor curto e (b) induzido curto. [13]

FIGURA 3 - Fileira de ímãs constituindo um tipo de motor linear. [16]

2. - HISTÓRICO: MÁQUINAS LINEARES NOS SÉCULOS XIX E XX

Após a descoberta das Leis de Indução por FARADAY (1831), os engenheiros não demoraram a pesquisar este fenômeno, e um gerador C.A. foi produzido por HIPPOLYTE PIXII, em 1832, sendo este considerado o precursor de nossas modernas estações de força; possuindo no secundário (saída) bobinas estacionárias, com uma montagem de ímãs rotativos de maneira a induzir forças eletromotrizes. Esta foi uma contribuição particularmente notável, para o começo da década de 30 do século XIX, pois somente eram conhecidas máquinas do tipo êmbolo e cilindro, e engenhosos conversores lineares / rotativos, tal como o Scotch Yoke, que foi inventado para converter a força gerada linearmente em uma forma que poderia fazer uso da roda muito mais utilizada. [16], [17], [25] e [26]

Fazendo um cronograma histórico das máquinas lineares temos os seguintes períodos:

1º) 1830-1850: neste período, a engenhosidade no desenvolvimento de motores e geradores, foi restrita pelo pensamento dominante de que *uma máquina deveria parecer-se com uma máquina*. Mesmo que muito bons, quando os motores elétricos rotativos eram projetados, seus inventores ainda diziam que era *a proeza* definir o passo polar duplo. Devido a ALLAN (1850), uma máquina magnética em particular, possuía na verdade armaduras magnéticas organizadas como êmbolos, com um eixo metálico elevado e quatro cilindros. Wheatstone (1841), é a referência mais remota relativa a máquinas lineares, que foi encontrada na bibliografia. [16], [17] e [25]

2º) 1851-1880: neste período, em que foi colocado um considerável esforço de reserva na inovação, foi dada ênfase ao *rendimento*. Ninguém pode ler a respeito do

desenvolvimento do motor elétrico no século XIX sem sentir grande admiração pela pura engenhosidade dos inventores. As máquinas CC vieram primeiro, largamente usadas devido á descoberta da eletrogalvanização e das lâmpadas de arco de carbono. [17]

3º) 1881-1900: neste período TESLA inventou a máquina de indução (1888) a qual dominou o mundo dos dispositivos elétricos. É de interesse histórico observar que um físico chamado BAILEY demonstrou um simples motor de indução bifásico em Londres, Inglaterra (1882), finalizando com as palavras *entretanto isto nunca terá qualquer valor prático*. Tem-se em 1890, a referência mais específica ao aparecimento de máquinas lineares numa patente concedida pelo Prefeito de Pittsburgh, referindo-se a máquinas de indução lineares. Logo a seguir, em 1895 uma patente da Weaver, Jacquard, e a Electric Shuttle Company, a qual julgando pelo seu título, tinha grandes esperanças para seu uso como um dispositivo de impulsionamento para os carros nas máquinas têxteis de entrelaçamento. [16], [17], [25] e [32]

4º) 1901-1940: foi o período de desenvolvimento mais ativo do M.I.L., segundo revela a literatura das patentes requeridas, sendo a maioria em relação a dispositivos de propulsão para lançamentos, embora comercialmente nenhum tenha obtido sucesso, devido ao custo elevado do sistema elétrico comparado ao de outros sistemas. Contudo, uma considerável engenhosidade foi mostrada pelos engenheiros têxteis, os quais foram suficientemente versáteis para avançar a idéia dos motores de dupla face (double-sided), motores com chapas no *rotor* e motores tubulares. Em 1905, existiam duas propostas distintas para o uso de motores de indução linear como um mecanismo de propulsão em ferrovias, sendo que a primeira, propunha seções curtas do primário embutidas nos trilhos, que poderiam ser ligados assim que exigidos, e o segundo propunha uma unidade primária carregada a bordo do veículo com a grade de reação do rotor laminado sobre os trilhos [30] e [31]. O primeiro motor tubular, surgido em 1917, era de fato uma máquina de relutância C.C. com bobinas de primário chaveadas, planejado para ser um lançador de mísseis, sendo que nunca passou em desenvolvimento do modelo. Sugeriu-se em 1923, um motor de indução plano como um propulsor para o sistema de movimentação contínuo de carros para rodar abaixo da rua 42, entre o

Time Square e a Grande Estação Central, em Nova York, para tanto foi construído um trilho para testes, porém nunca vindo a dar resultados. [17] e [25].

5º) 1941-1997: este é o período com maior número de pesquisas e trabalhos, bem como no desenvolvimento de projetos, pois, com o início da Segunda Guerra Mundial (1939), pesquisas de novas tecnologias, ainda que visando a aplicação militar, são um ponto de destaque no desenvolvimento tecnológico da humanidade, pois muitos projetos e pesquisas são modificados para as mais diversas aplicações, que vão desde a medicina até a agricultura e viagens espaciais, logo após a guerra. A primeira aplicação em grande escala foi com o desenvolvimento do lançador de aviões da Westinghouse (1946), o Electropult. O sistema de bobina do primário foi montado sobre o carro e o secundário, constituído de um enrolamento em ranhuras numa estrutura ferro magnética. A figura 4 [17], mostra que o comprimento ativo da forma primitiva de um motor linear é reduzido uma vez acontecido movimento. Na figura 5, é mostrado o Electropult, um motor linear utilizado para tracionar aeronaves em porta aviões, sendo esta uma de suas principais aplicações. Na figura 6, tem-se um avião atracado à unidade primária por uma fisga. Em 1954, a Real Força Aérea, em Farnborough, Inglaterra, projetou um motor linear muito interessante devido a necessidade de se desenvolver um motor C.C. linear para aeronaves. Em 1961, experiências adicionais iniciadas pela pesquisa espacial em uma tentativa para ultrapassar as velocidades espaciais de corpos celestes, tal como o meteorito, que poderiam se chocar com capsulas espaciais em *hiper velocidades*, isto é, na ordem de 50.000 a 260.000 km/h [16], [17], [25] e [32]. Com o final dos anos 60, começam a surgir publicações especializadas sobre máquinas lineares e máquinas de indução linear, principalmente artigos de Laithwaite, Poloujadoff, Yamamura, Lipo, Nondahl, Boldea, Nasar, Gieras, Eastham, Dawson, entre outros nas décadas de 70, 80 e 90. No Brasil existem poucos grupos de pesquisa e estudo de máquinas lineares, destacando-se os estudos feito por Guerrini e, atualmente, por Simone e seus colaboradores, que nada ficam a dever aos estudos estrangeiros.

FIGURA 4 - (a) Comprimento ativo total e (b) comprimento ativo parcial. [17]

FIGURA 5 - O "Electropult". [17]

FIGURA 6 - Avião atrelado ao M.I.L. [17]

Um fato sabido é que a tecnologia avança de maneira similar ao da evolução das formas de vida, e a eliminação do improvável constitui o coração do processo. Um outro fato é que a tradição consagra-se em grande parte ao modo pelo qual progredimos e, em ciência e engenharia, as coisas mais excitantes ocorrem quando existe uma ruptura e nasce uma tecnologia totalmente nova. [16] e [17]

Ainda que motores lineares datem de 1841, toda a *inteligência* associada ao desenvolvimento de tecnologia *convenceu-se* da maior exatidão e alto rendimento do movimento rotativo, com pequeno volume de ar entre as partes girantes cilíndricas, o que não era verificado nos lineares até o advento do Electropult da Westinghouse¹. Fatores como a relação força/peso e custos e, posteriormente, confiabilidade, baixa manutenção e ausência de poluição superaram o rendimento e o fator de potência, como critérios de qualidade, na opção de máquinas rotativas. [16], [17], [25] e [32]

O motor linear, com sua inerente confiança, renasceu em 1946 e está aqui até hoje. Para tratar de informações mais recentes, relativamente ao interesse despertado pelo motor em questão, tem-se que em 1967, em média 7 artigos eram publicados por mês. Por volta de 1970, o número aumentou para 12 e em 1972 para 18. A figura 7 mostra a atividade mundial em torno da máquina linear, definida como o dinheiro gasto com o assunto ao longo dos anos, no período sob análise por parte de LAITHWAITE [16]. Concluiu-se que a taxa de aumento não era uma avaliação excessiva do grau de atividade em torno do assunto. [16]

FIGURA 7 - Atividade mundial em torno da máquina linear. [16]

¹ A wound rotor motor 1400 ft long, Westinghouse Eng., vol. 6, p. 160, 1946.

3. - DIFERENTES TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS LINEARES

Pelo simples exercício topológico de corte e abertura de uma máquina rotativa, como na figura 1, fica claro que, teoricamente, todo tipo de máquina rotativa pode ser *linearizada*. Isto não significa que a versão linearizada da máquina rotativa terá o mesmo sucesso que a máquina rotativa original. [16]

Todos os motores lineares que produzem movimento relativo entre primário e secundário, ambos com núcleo ferromagnético, possuem normalmente, entre as duas partes, uma fina camada de ar (entreferro de ar). Contudo, há motores lineares, como os de dupla face, nos quais somente o primário contém material ferromagnético, assim, um *entreferro equivalente* é definido que será utilizado na avaliação do comprimento magnético quando se realizam cálculos. Esta técnica é somente uma extensão daquela usada em projetos convencionais, onde o efeito da entrada da ranhura no aço do estator e do rotor são considerados usando o coeficiente de Carter² o qual multiplica o entreferro físico por um número maior do que a unidade aplicada em um comprimento efetivo do entreferro. [01], [09], [13], [16], [17], [27] e [32]

Pode-se agora definir máquinas *Magnéticas* e *Eletromagnéticas*, com os conceitos de primário e secundário, pois, se ocorrer durante a operação de uma máquina, uma força magnetomotriz (f.m.m.) *em cada lado* do entreferro, esta máquina é um dispositivo eletromagnético. Neste contexto, um ímã permanente é considerado como uma fonte de f.m.m., e não importa se uma f.m.m. sobre um lado é induzida do outro, ou se é fornecida diretamente. Por outro lado, se existe f.m.m. sobre *um lado* somente da interface, assim então a máquina é meramente magnética. [16]

² F. W. Carter, Note on air-gap and interpolar induction, *J. Inst. Elect. Eng. (London)*, vol. 29, p. 925, 1900.

CAPÍTULO II - MODELAGEM MATEMÁTICA DO M.I.L.

INTRODUÇÃO

Uma modelagem do M.I.L., independentemente de sua forma construtiva, é necessária para obter expressões matemáticas, que sirvam de plataforma para a realização de sua simulação computacional.

De uma maneira geral, o modelo matemático inicial é pobre e os resultados da simulação apresentam alguma diferença, em relação aos valores obtidos experimentalmente. Se forem aplicadas correções convenientes ao modelo matemático, de forma progressiva, em geral chega-se a uma melhor aproximação entre aqueles resultados.

Neste capítulo, em sua Parte I, são expostos os conceitos mais importantes associados ao M.I.L., com seu equacionamento; na Parte II é desenvolvido o modelo matemático, pelo método dos circuitos magneticamente acoplados, à partir do qual, utilizando os parâmetros cuja obtenção é mostrada no Capítulo III, realiza-se a simulação computacional, mostrada no Capítulo IV.

PARTE I

CONCEITUAÇÃO DO M.I.L.

I.1. - Fenômenos Típicos do M.I.L. [01], [09], [10], [11], [35] e [36]

GIERAS, DAWSON E EASTHAM [11], contribuem fortemente para o entendimento do M.I.L., tanto no aspecto físico, quanto na formalização desses fenômenos.

No motor de indução rotativo as posições relativas entre pontos do rotor e do estator repetem-se continuamente, não havendo variações bruscas da relutância do circuito magnético e as variações que ocorrem são periódicas e de baixa intensidade. Por outro lado, no M.I.L. está presente, entre outros fenômenos, o *efeito longitudinal de extremidade*, que é provocado por:

- (a) o comprimento finito do pacote laminado do núcleo ferromagnético do enrolamento do primário e a mudança repentina na relutância magnética do entreferro em ambas as extremidades (de entrada e de saída);
- (b) a conseqüente não uniformidade da dependência da velocidade da distribuição de corrente induzida no secundário e a distribuição do fluxo no entreferro ao longo do comprimento da máquina.

Com base em YAMAMURA [35] e [36], GIERAS mostra em [11] que o efeito longitudinal de extremidade, pode ser interpretado como uma onda viajante amortecida de densidade de fluxo magnético no entreferro, como é visto na figura 8, de acordo com a equação a seguir:

$$b(x, t) = B_{ms} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + B_{me} e^{-\frac{x}{T_e}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau_e} x + \delta\right) \quad (01)$$

onde:

B_{ms} : valor de pico da onda viajante;

$v_s = 2\tau f$: velocidade síncrona, no sentido positivo do deslocamento (x) [09];

τ : passo polar do enrolamento do primário;

$\omega = 2\pi f$ (frequência angular) e f é a frequência das tensões de alimentação;

B_{me} : valor de pico de uma onda viajante amortecida na extremidade de entrada, no sentido positivo do deslocamento (x) com a velocidade $v_{end} = 2\tau_e f$

τ_e : passo polar (onda na extremidade de entrada), depende das condições de operação;

T_e : constante de atenuação da onda.

(obs.: o primário mover-se-á, então, no sentido negativo do deslocamento (x), e parte de B_{ms} refere-se a onda de campo fundamental e a parte de B_{me} refere-se a onda do efeito longitudinal de extremidade).

FIGURA 8 - A onda síncrona $b_s(x)$ e a onda do efeito de extremidade $b_e(x)$ para $\tau_e \leq \tau$ [11].

O passo polar τ , para a onda viajante com velocidade síncrona é constante; já o passo polar τ_e , para a onda na extremidade de entrada, depende das condições de operação. A onda de extremidade de entrada, além da constante de atenuação T_e , tem sua fase alterada por um ângulo δ em relação à onda que se move com velocidade síncrona.

Ambas as ondas induzem força eletromotriz no enrolamento primário, como segue:

$$e = e_s + e_e = -E_{ms} \cos(\omega t) - E_{me} \cos(\omega t) \quad (02)$$

onde:

e_s e E_{ms} são relacionadas a B_{ms} ;

e_e e E_{me} são relacionadas a B_{me} .

O fator de extremidade é estabelecido de acordo com:

$$e = -E_{ms}(1 - k_e)\cos(\omega t) \quad (03)$$

ou

$$k_e = \frac{E_{me}}{E_{ms}} \quad (04)$$

I.2. - Considerações [01], [09], [10], [11]

Têm-se considerações a serem seguidas para o desenvolvimento matemático, que são:

- (a) a onda do efeito de extremidade é efetivamente igual a zero, depois da distância $2p\tau_e$ (p : pares de pólos), isto é, induz uma f.e.m. somente dentro dos limites da distância de $0 \leq x \leq 2p\tau_e$, isto é, região ativa,
- (b) todas as quantidades magnéticas e elétricas variam senoidalmente com o tempo,
- (c) para velocidades até v_0 , onde $0 \leq v_0 < v_s$, a onda de efeito de extremidade não induz tensão no enrolamento primário,
- (d) no limite, $T_e \rightarrow \infty$ e $\tau_e = \tau$, a onda do efeito de extremidade da entrada cancela a onda viajante com velocidade síncrona, isto é, $B_{me} = B_{ms}$,
- (e) o fluxo de acoplamento para cada fase é o mesmo.

Segundo GIERAS [11], não se observou a existência de influência dos efeitos de extremidade sobre o desempenho do M.I.L. para baixas velocidades, devido a (c). A consideração (d), representa uma condição limitante e é usada para estabelecer a mesma f.e.m. induzida em cada enrolamento de fase.

O passo polar $\tau_e > \tau$, em caso de motores de baixa velocidade, significa que a onda do efeito de extremidade viaja mais rápido do que a onda movendo-se com velocidade síncrona.

Segundo YAMAMURA [35], uma força positiva é então produzida em velocidade síncrona. Este efeito foi confirmado experimentalmente [04] e [05], embora a magnitude da força positiva em escorregamento zero seja muito pequena. Em muitos casos, por exemplo em GIERAS [08], a força positiva é neutralizada tanto pela perda de potência mecânica quanto por uma força frenante ou contrária ao movimento devido às altas harmônicas espaciais. Tanto para projetistas, quanto para usuários de M.I.L., forças negativas devido ao efeito de extremidade em M.I.L. de alta velocidade ou intermediária são muito mais importantes do que as pequenas forças positivas para $\tau_e > \tau$ em alguns M.I.L. de baixa velocidade. Portanto, esta força positiva será desprezada na análise do fator do efeito de extremidade.

I.3. - Desenvolvimento Matemático [01], [09], [10], [11] e [36]

O valor instantâneo da f.e.m. no entreferro por fase, devido à onda da densidade de fluxo magnético deslocando-se com velocidade síncrona, do motor de indução linear (M.I.L.), com largura L e com número efetivo de espiras por fase $N k_w$, é igual a:

$$e_s = -p N_p k_w L \frac{d}{dt} \left\{ \left[\int_0^T B_{ms} \sin \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx \right] \sin \omega t \right\} = -2\pi / N k_w \frac{2}{\pi} \tau L B_{ms} \cos(\omega t) \quad (05)$$

$$\therefore e_s = -E_{ms} \cos(\omega t) \quad (06)$$

onde:

N_p : número de espiras por par de pólo por fase;

N : número de espiras por fase;

k_w : fator de enrolamento;

E_{ms} : valor de pico da f.e.m. induzida pela densidade de fluxo magnético, movendo-se com velocidade síncrona.

Para a f.e.m. devido à onda da densidade de fluxo magnético do efeito de extremidade, o fluxo magnético por pólo é diferente em cada intervalo correspondente a meio comprimento de onda τ_e . Para intervalos $(2k-2)\tau_e \leq x \leq (2k-1)\tau_e$, onde $k = 1, 2, 3, \dots$ e os seguintes valores de fluxo magnético por pólo podem ser estabelecidos, usando a consideração (b) mostrada anteriormente:

(i) para $k = 1$ (o primeiro pólo):

$$\Phi_{e1} = LB_{me} \sin(\omega t) \int_0^{\tau_e} e^{-x/\tau_e} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_e} x + \delta\right) dx = \frac{LB_{me} \sin(\omega t)}{\frac{1}{\tau_e^2} + \left(\frac{\pi}{\tau_e}\right)^2} \left(1 + e^{-\tau_e/\tau_e}\right) f(\delta) \quad (07)$$

(ii) para $k = 2$ (o terceiro pólo):

$$\Phi_{e3} = LB_{me} \sin(\omega t) \int_{2\tau_e}^{3\tau_e} e^{-x/\tau_e} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_e} x + \delta\right) dx = \frac{LB_{me} \sin(\omega t)}{\frac{1}{\tau_e^2} + \left(\frac{\pi}{\tau_e}\right)^2} \left(e^{-2\tau_e/\tau_e} + e^{-3\tau_e/\tau_e}\right) f(\delta) \quad (08)$$

e assim sucessivamente até:

(iii) para $k = p$ (o penúltimo pólo)

$$\begin{aligned} \Phi_{p-1} &= LB_{me} \sin(\omega t) \int_{(2p-2)\tau_e}^{(2p-1)\tau_e} e^{-x/\tau_e} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_e} x + \delta\right) dx = \\ &= \frac{LB_{me} \sin(\omega t)}{\frac{1}{\tau_e^2} + \left(\frac{\pi}{\tau_e}\right)^2} \left(e^{-(2p-2)\tau_e/\tau_e} + e^{-(2p-1)\tau_e/\tau_e}\right) f(\delta) \end{aligned} \quad (09)$$

onde:

$$f(\delta) = \frac{1}{\tau_e} \sin \delta + \frac{\pi}{\tau_e} \cos \delta \quad (10)$$

O valor instantâneo da f.e.m. induzida no entreferro, por fase, pela onda do efeito de extremidade, é então calculado de acordo com a equação a seguir:

$$e_e = -\sum_{k=1}^p N_{pe} k_{we} \frac{d\Phi_{e(2k-1)}}{dt} \quad (11)$$

Fazendo $\Phi_{e(2k-1)} = \Phi_{e2k}$, tem-se:

$$e_e = -2\pi f \frac{N}{p} \frac{\tau_e}{\tau} k_{we} \frac{L \cdot B_{me}}{\frac{1}{T_e^2} + \left(\frac{\pi}{\tau_e}\right)^2} f(\delta) \cos(\omega t) \cdot 2 \left(e^{-\tau_e/T_e} + e^{-3\tau_e/T_e} + e^{-5\tau_e/T_e} + \dots + e^{-(2p-1)\tau_e/T_e} \right) \quad (12)$$

onde:

N_{pe} : nº de espiras/par de pólo/fase para a onda do efeito de extremidade de entrada;

k_{we} : fator de enrolamento para a onda do efeito de extremidade de entrada.

Substituindo a expressão para a soma de termos exponenciais na equação (12), tem-se:

$$e_e = -2\pi f N k_{we} \frac{\left(\frac{\tau_e}{\tau}\right) \cdot L B_{me}}{\frac{1}{T_e^2} + \left(\frac{\pi}{\tau_e}\right)^2} f(\delta) 2e^{-\frac{p\tau_e}{T_e}} \frac{\sinh\left(\frac{p\tau_e}{T_e}\right)}{p \cdot \sinh\left(\frac{p\tau_e}{T_e}\right)} \cos(\omega t) = -E_{me} \cos(\omega t) \quad (13)$$

E_{me} = valor de pico da f.e.m. no entreferro devido ao efeito de extremidade de entrada.

O valor de pico da densidade de fluxo magnético da onda do efeito de extremidade de entrada é aproximadamente igual a B_{ms} , isto é, $B_{me} = B_{ms}$ para $x = 0$.

A f.e.m. total induzida no enrolamento primário, e o fator do efeito de extremidade, de acordo com (02), (03), (06), (10) e (13), e fazendo-se $B_{me} \approx B_{ms}$ em $x = 0$, a seguinte expressão para a f.e.m. total induzida no enrolamento primário pode ser obtida:

$$e = -\sqrt{2} E_s \cos \omega t - \sqrt{2} E_s (-k_e) \cos \omega t = -\sqrt{2} E_s (1-k_e) \cos \omega t \quad (14)$$

onde:

(i) o valor rms da f.e.m. devido ao campo viajante de amplitude B_{ms} é:

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N k_w \frac{2}{\pi} L \tau B_{ms} \quad (15)$$

(ii) o fator do efeito de extremidade de entrada, então torna-se:

$$k_e = -\frac{k_{we}}{k_w} \frac{\frac{\pi \tau_e}{\tau^2}}{\frac{1}{T_e^2} + \left(\frac{\pi}{\tau_e}\right)^2} f(\delta) \cdot e^{\frac{-p\tau_e}{T_e} \frac{\sinh\left(\frac{p\tau_e}{T_e}\right)}{p \cdot \sinh\left(\frac{\tau_e}{T_e}\right)}} \quad (16)$$

Esta é a fórmula final para o novo fator do efeito de extremidade longitudinal.

O fator de enrolamento para a onda do efeito de extremidade é determinado similarmente ao utilizado para as harmônicas espaciais das máquinas de indução, isto é:

$$k_{we} = \frac{\text{sen}\left(\frac{\tau}{\tau_e} \frac{\pi}{2m}\right)}{q \cdot \text{sen}\left(\frac{\tau}{\tau_e} \frac{\pi}{2mq}\right)} \text{sen}\left(\frac{\tau}{\tau_e} \frac{\pi}{2} \frac{w_e}{\tau}\right) \quad (17)$$

onde:

q : número de ranhuras por pólo por fase;

m : número de fases;

w_c = passo da bobina.

O passo polar τ_e e a constante de atenuação T_e podem ser determinadas, usando-se as expressões dadas por YAMAMURA [35]:

$$\tau_e = \frac{2\pi}{D} \quad (18)$$

e

$$T_e = \frac{2gk_c}{Cgk_c - v\mu_0\sigma_{Al}d} \quad (19)$$

onde:

$$C = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(x_1)^4 + 16.(x_2)^2} + (x_2)^2} \quad (20)$$

e

$$D = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(x_1)^4 + 16.(x_2)^2} - (x_1)^2} \quad (21)$$

onde:

$$x_1 = \frac{\mu_0 v \sigma_{Al} d}{k_c g}$$

e

(22)

$$x_2 = \frac{\omega \mu_0 \sigma_{Al} d}{k_c g}$$

As equações (19), (20) e (21), são válidas para o M.I.L. de dupla face (indutor) com alumínio no secundário. A espessura do entreferro é g , a espessura do secundário é d , a condutividade é σ_{Al} e k_c é o fator de Carter. O M.I.L. de dupla camada no secundário (alumínio/aço maciço), $k_c(g+d)$ deverá substituir $k_c g$ e d_R' deverá substituir d , sendo a espessura equivalente da dupla camada do secundário para avaliação da resistência à correntes parasitas (Foucault). A espessura equivalente pode ser estimada pela distribuição do campo eletromagnético no secundário, de uma maneira similar à usada para o M.I.L. de dupla face [07].

O ângulo δ entre a onda da densidade de fluxo magnético viajante com velocidade síncrona e a onda do efeito de extremidade de entrada, pode ser determinado pela aplicação das duas condições de contorno a seguir:

- (i) Sob a condição (c), não existe efeito de extremidade ($k_e = 0$) em $v = v_0$, onde $0 \leq v_0 \leq v_s$.

Fazendo $\delta = \delta_0$ para $k_e = 0$, a equação (10), torna-se:

$$1/T_e \sin \delta_0 + \pi/\tau_e \cos \delta_0 = 0 \quad (23)$$

onde δ_0 é dado por:

$$\delta_0 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\pi \frac{T_e}{\tau_e} \right)_{v=v_0} \quad (24)$$

- (ii) Usando a condição (d), isto é, $B_{me} = B_{ms}$ para $T_e \rightarrow \infty$ e $\tau_e = \tau$, isto pode ser mostrado, de (20), que $k_{we} = k_w$, e da equação (18) com:

$$\lim_{T_e \rightarrow \infty} e^{\frac{-p\tau_e}{T_e}} = 1 \quad (25)$$

e

$$\lim_{T_e \rightarrow \infty} \frac{\sinh \left(\frac{p\tau_e}{T_e} \right)}{p \cdot \sinh \left(\frac{\tau_e}{T_e} \right)} = 1 \quad (26)$$

tornando o fator do efeito de extremidade:

$$k_e = -\cos \delta \quad (27)$$

Na prática, velocidades síncronas mais altas estão, aproximadamente, em torno de 150 m/s. Nesta velocidade, o ângulo δ é assumido como sendo de 180° ($k_e = 1$). Portanto, o ângulo δ pode ser aproximado por:

$$\delta = \delta_0 + c v_e \quad (28)$$

onde δ_0 é dado por (24), e a constante c por:

$$c \approx \frac{1}{150} \tan^{-1} \left(\pi \frac{T_e}{\tau_e} \right)_{v=v_0} \quad (29)$$

com

$$v_e = \frac{v - v_0}{v_s - v_0} \quad \text{para } v > v_0 \quad (30)$$

e

$$v_e = 0 \quad \text{para } v \leq v_0$$

Dados de testes indicam que $v_0 = 0,5v_s$ para M.I.L. de alta velocidade ($v_s = 150$ m/s), ou seja $k_e = 0$ para $v = v_0$.

I.4. - Circuito Equivalente: Inclusão do Efeito Longitudinal de Extremidade de Entrada [09] e [11]

Uma forma de se apresentar o efeito longitudinal de extremidade de entrada é utilizando o circuito equivalente do M.I.L., no qual é incluído um ramo representativo deste efeito, como é mostrado por GIERAS [09] e [11], podendo ser obtidas informações relativas à sua operação em regime permanente. Este efeito pode ser atenuado colocando-se, adequadamente, no M.I.L. real um enrolamento compensador do efeito do efeito de extremidade de entrada, ainda que esta compensação só será efetiva para a velocidade considerada no seu projeto, como citado por POLOUJADOFF [27] e YAMAMURA [36].

Algumas considerações complementares são necessárias neste ponto. Corrigindo a impedância do secundário, pode-se incluir o efeito transversal de borda no circuito elétrico equivalente, e para incluir o efeito de extremidade longitudinal de entrada no circuito equivalente, conecta-se uma impedância dependente do escorregamento (s) em paralelo com o ramo de magnetização.

As seguintes relações são necessárias ao desenvolvimento matemático do M.I.L.:

- densidade da corrente de linha do primário

$$A_{my} = (m_1 I_1 N_1 \sqrt{2}) / \tau_p \quad (31)$$

onde:

m_1 = número de fases do primário;

I_1 = corrente de entrada rms;

N_1 = número de espiras do primário por fase;

p = número de pares de pólos.

- potência eletromagnética

A potência eletromagnética transmitida do primário através do entreferro ao secundário, é:

$$P_{elm} = P_m + \Delta P_2 = F_{elm} v_s \quad (32)$$

onde:

P_m = potência mecânica;

ΔP_2 = perdas no enrolamento secundário;

F_{elm} = força eletromagnética desenvolvida.

- potência que atravessa o entreferro (potência convertida) [32]

$$P_e = F_x \cdot (dx/dt) \quad (33)$$

onde:

F_x = força propulsora;

x = deslocamento genérico de um ponto qualquer no linor.

Obs.: o M.I.L. é uma máquina assíncrona e para sua operação como motor, este exige que $V_{rx} < V_{sx}$, e portanto, tem-se:

$$P_e = F_x (2 \tau f) (1-s) \quad (34)$$

equação que estabelece a relação entre a potência convertida e os parâmetros eletromecânicos da máquina operando como motor. A presença dos efeitos de extremidade impedem qualquer análise da força propulsora F_x .

- relação entre a força eletromagnética F_{elm} e a força total, ou força propulsora F_x

$$F = F_x + \Delta F_m = \frac{1}{v} (P_m + \Delta P_m) \quad (35)$$

- força eletromagnética (F)

Se a resistência do enrolamento primário é desprezível e o circuito magnético não é saturado, a força eletromagnética F_{elm} pode ser expressa como uma função do escorregamento, pela fórmula de Kloss como:

$$F_{elm} = \frac{2 \cdot F_{max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} \quad (36)$$

onde:

s_{cr} é o escorregamento crítico correspondente a força máxima F_{max} .

- velocidade linear

$$v = 2f\tau \left\{ 1 - s_{cr} \left[\frac{F_{max}}{F_{elm}} - \sqrt{\left(\frac{F_{max}}{F_{elm}} \right)^2 - 1} \right] \right\} \quad (37)$$

e segundo SIMONE [32], a velocidade linear da parte móvel do M.I.L., é dada por:

$$v_{rx} = (1 - s)v_{sx} \quad (38)$$

- impedância do secundário referida ao primário, correspondente às perdas de potência

$$Z_2'(s) = R_2'(s) + j X_2'(s) = k_{tr} Z_2(s) \quad (39)$$

onde k_{tr} é o fator de razão entre o número de espiras do secundário e do primário

Com as relações anteriores, e com o equacionamento matemático a seguir, poderá se obter um modelo, e sabendo que o motor possui enrolamentos primário e secundário, bem como as relações entre eles, e fazendo uma análise destes fatores, é mostrado a seguir o equacionamento para modelar o motor.

A impedância do enrolamento primário é dada por:

$$Z_1 = R_1 + j X_1 \quad (40)$$

e a impedância do secundário referida ao primário, é dada pela equação a seguir:

$$Z_2' = R_2' + j X_2' = \frac{Z_2'(s)}{s} = \frac{1}{s} R_2'(s) + j X_2'(s) \quad (41)$$

com uma impedância para o ramo de magnetização dada por:

$$Z_0 = R_0 + j X_0 \quad (42)$$

sendo que R_1 e X_1 podem ser encontrados da mesma maneira que para o motor de indução convencional. A reatância de dispersão do primário é uma soma dada por:

$$X_1 = X_{ls} + X_{le} + X_{ld} \quad (43)$$

onde:

X_{ls} = reatância de dispersão da ranhura;

X_{le} = reatância de dispersão nas saliências;

X_{ld} = reatância de dispersão diferencial (devido as harmônicas espaciais superiores no entreferro).

Sabendo-se que para cada M.I.L. existe uma impedância de secundário, tem-se neste caso um modelo genérico, em que deverá ser observado o tipo específico de motor a ser simulado.

No ramo de magnetização da figura 9, tem-se o seguinte equacionamento para R_0 e X_0 :

$$R_0 = \frac{R_{Fe} \cdot X_g^2}{R_{Fe}^2 + X_g^2} \quad (44)$$

$$X_0 = \frac{R_{Fe}^2 \cdot X_g}{R_{Fe}^2 + X_g^2} \quad (45)$$

onde:

$$R_{Fe} = \frac{m_1 \cdot E_1^2}{\Delta P_{lFe}} \rightarrow \text{resistência representando as perdas no núcleo primário};$$

$$X_g = E_1 / I_0 \rightarrow \text{reatância mútua (entreferro); em paralelo.}$$

com:

ΔP_{lFe} : perdas no núcleo primário (histerese, correntes parasitas e adicionais);

E_1 : tensão induzida no enrolamento do primário (f.e.m. através do ramo da impedância vertical) desprezando o efeito de extremidade longitudinal;

I_0 : corrente de magnetização.

Portanto, a impedância total resultante do ramo secundário e do ramo vertical, é dada pela equação:

$$Z_t = \frac{Z_0 \cdot Z'_2}{Z_0 + Z'_2} \quad (46)$$

Devido aos efeitos de extremidade, a f.e.m. E_1 do enrolamento primário (valor rms) é reduzida a:

$$E'_1 = E_1 (1 - k_e) \quad (47)$$

A equação de E_1' mostra que, onde os efeitos de extremidade longitudinal de entrada são considerados e a f.e.m. E_1 é usada ao invés de E_1' , é necessário acrescentar uma impedância (Z_e) dependente do escorregamento em paralelo com as impedâncias Z_0 e Z_2' , isto é:

$$Z_e = \frac{1 - k_e}{k_e} Z_t \quad (48)$$

a qual inclui o efeito de extremidade longitudinal de entrada.

A queda de tensão através das impedâncias Z_e e Z_t , em paralelo, é igual a $E_1' = (1 - k_e) I_1 Z_t$. De posse de (E_1'), e utilizando-a com (40) e (41), é possível encontrar a componente no entreferro, considerando os efeitos de extremidade, isto é:

$$B_{mz} = \frac{E_1 \cdot (1 - k_e)}{4 \cdot \sigma_f \cdot f \cdot N_1 \cdot k_{w1} \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot L_i} \quad (49)$$

O circuito equivalente tipo T do M.I.L., incluindo o efeito de extremidade longitudinal é mostrado na figura 9 a seguir:

FIGURA 9 - Circuito equivalente tipo T, do M.I.L. [09].

As perdas em um M.I.L., devido aos efeitos de extremidade são dadas por:

$$\Delta P_e = m_1 \frac{(1 - k_e) \cdot E_1^2}{9 \text{Re}[Z_t]} \quad (50)$$

A potência eletromagnética que atravessa o entreferro do M.I.L., é dada por:

$$P_{elm} = m_1 \left[\frac{(1 - k_e) \cdot E_1}{|Z'_2|} \right]^2 \cdot \frac{R'_2(s)}{s} = m_1 (1 - k_e)^2 (I'_2)^2 \frac{R'_2(s)}{s} \quad (51)$$

O efeito de extremidade reduz a potência eletromagnética, segundo o fator de proporção em $(1 - k_e)^2$. A potência absorvida da rede é dada pela equação a seguir:

$$P_{in} = \Delta P_1 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_e + \Delta P_{str} + P_{elm} \quad (52)$$

onde:

ΔP_1 : perdas da potência ativa no enrolamento primário;

ΔP_{Fe} : perdas da potência ativa no núcleo primário;

ΔP_{str} : perdas por dispersão.

Observa-se que o efeito de extremidade longitudinal de entrada causa um aumento na potência absorvida da rede, assim reduzindo o rendimento do motor de indução linear, isto é:

$$\eta = \frac{1}{P_{in}} \left[m_1 (1 - k_e)^2 \frac{R'_2(s)}{s} (1 - s) \frac{E_1^2}{|Z'_2|} - \Delta P_m \right] \quad (53)$$

O fator de potência, considerando apenas a primeira harmônica de tensão e corrente ($\cos \phi$), também tem seu valor decrescido ligeiramente, isto é, sua equação fica:

$$\cos \phi = \frac{\Re[Z_1 + Z_t(1 - k_e)]}{|Z_1 + Z_t(1 - k_e)|} \quad (54)$$

Portanto, tem-se a equação a seguir para a força propulsora total, dada por:

$$F_x = \frac{m_1}{v_s} \left[\frac{(1 - k_e) \cdot E_1}{|Z'_2|} \right]^2 \cdot \frac{R'_2(s)}{s} - \Delta F_m \quad (55)$$

sabendo-se que:

$$v_s = 2 f \tau = 2 \tau / T = \omega \tau / \pi \quad (56)$$

onde:

v_s : velocidade linear da *harmônica fundamental* da onda de f.m.m. viajante, produzida pelo enrolamento primário, chamada de *velocidade síncrona*, e esta no M.I.L. depende da frequência de I_1 e de τ , independentemente do número de pólos $2p$;

ΔF_m : força proporcional às perdas mecânicas.

O M.I.L. move-se com velocidade linear $v < v_s$ ao longo de x .

A equação (55) para a força propulsora permanece inalterada, e as forças calculadas usando-se o circuito da figura 9, considerando ou não os efeitos de extremidade longitudinal. Assumindo $v_0 = 0,5 v_s$, os cálculos finais de F_x , considerando os efeitos de extremidade longitudinal, são muito próximos dos obtidos por meio de medidas, conforme GIERAS [09].

Na figura 10, tem-se um modelo esquematizado do motor de indução linear, contendo placa de reação, enrolamento, e demais partes.

FIGURA 10 - Esquema do motor de indução linear para obtenção de parâmetros.

1.5. COMENTÁRIOS

Para o M.I.L. com grande número de pólos, os efeitos de extremidade longitudinal são desprezíveis.

A força F_{max} corresponde ao conjugado de partida (força de ruptura) em um motor de indução rotativo.

Para um passo polar τ maior e uma maior força máxima $F_{\max}$, existe uma velocidade linear maior em regime no M.I.L., com força fixa F_{elm} e uma frequência fixa de entrada f .

Para motores de indução linear com um secundário com parâmetros distribuídos, como por exemplo um produzido de aço maciço e para o secundário com enrolamento (camada) do tipo *gaiola*, o número de espiras por fase do secundário dado por $N_2 = 0,5$ e para o fator de enrolamento do secundário para a harmônica espacial fundamental tem-se $k_{w2} = 1$.

As equações de R_0 e X_0 permitem a transformação da conexão paralela de R_{Fe} e $j X_g$ em uma conexão série.

PARTE II

MODELO MATEMÁTICO DO M.I.L.

INTRODUÇÃO

Neste capítulo é obtida uma modelagem adequada do M.I.L., necessária à realização de sua simulação.

Num exercício de analogia, a partir de conceitos envolvidos na modelagem matemática do *motor de indução trifásico rotativo*, em que se utiliza o *método dos circuitos magneticamente acoplados*, mesmo para o motor com rotor *gaiola de esquilo*, foi construído o modelo matemático do M.I.L.. Para tanto, algumas modificações foram associadas aos conceitos de TURNER [34].

Naquilo que diz respeito ao enrolamento primário, a analogia com o *estator* é direta. Com relação ao secundário, este foi analisado como se fosse uma *gaiola de esquilo*, à qual se atribuiu a configuração hipotética trifásica.

Assim, do ponto de vista da parte elétrica do modelo matemático, há seis equações diferenciais, relacionando tensões e correntes, considerando as *fases do enrolamento do secundário* em curto-circuito.

A seguir apresentam-se as equações desenvolvidas a partir das tensões e correntes:

● Equações de tensão do primário:

$$v_{pa} = R_p \cdot i_{pa} + L_{paa} \cdot \rho i_{pa} + M_{pba} \cdot \rho i_{pb} + M_{pca} \cdot \rho i_{pc} + M_{spaa} \cdot \rho i_{sa} + \frac{dM_{spaa}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sa} + \\ + M_{spba} \cdot \rho i_{sb} + \frac{dM_{spba}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sb} + M_{spca} \cdot \rho i_{sc} + \frac{dM_{spca}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sc} \quad (57)$$

$$v_{pb} = R_p \cdot i_{pb} + M_{pab} \cdot \rho i_{pa} + L_{pbb} \cdot \rho i_{pb} + M_{pcb} \cdot \rho i_{pc} + M_{spab} \cdot \rho i_{sa} + \frac{dM_{spab}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sa} + \\ + M_{spbb} \cdot \rho i_{sb} + \frac{dM_{spbb}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sb} + M_{spcb} \cdot \rho i_{sc} + \frac{dM_{spcb}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sc} \quad (58)$$

$$v_{pc} = R_p \cdot i_{pc} + M_{pac} \cdot \rho i_{pa} + M_{pbc} \cdot \rho i_{pb} + L_{pcc} \cdot \rho i_{pc} + M_{spac} \cdot \rho i_{sa} + \frac{dM_{spac}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sa} + \\ + M_{spbc} \cdot \rho i_{sb} + \frac{dM_{spbc}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sb} + M_{spcc} \cdot \rho i_{sc} + \frac{dM_{spcc}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sc} \quad (59)$$

● Equações de tensão do secundário:

$$v_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + M_{psaa} \cdot \rho i_{pa} + \frac{dM_{psaa}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pa} + M_{psba} \cdot \rho i_{pb} + \frac{dM_{psba}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pb} + \\ + M_{psca} \cdot \rho i_{pc} + \frac{dM_{psca}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pa} + L_{saa} \cdot \rho i_{sa} + \frac{dL_{saa}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sa} + \\ + M_{sba} \cdot \rho i_{sb} + M_{sca} \cdot \rho i_{sc} = 0 \quad (60)$$

$$v_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + M_{psab} \cdot \rho i_{pa} + \frac{dM_{psab}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pa} + M_{psbb} \cdot \rho i_{pb} + \frac{dM_{psbb}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pb} + \\ + M_{pscb} \cdot \rho i_{pc} + \frac{dM_{pscb}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pa} + M_{sab} \cdot \rho i_{sa} + L_{sbb} \cdot \rho i_{sb} + \\ + \frac{dL_{sbb}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sb} + M_{scb} \cdot \rho i_{sc} = 0 \quad (61)$$

$$v_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + M_{psac} \cdot \rho i_{pa} + \frac{dM_{psac}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pa} + M_{psbc} \cdot \rho i_{pb} + \frac{dM_{psbc}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pb} + \\ + M_{pscc} \cdot \rho i_{pc} + \frac{dM_{pscc}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{pa} + M_{sac} \cdot \rho i_{sa} + M_{sbc} \cdot \rho i_{sb} + \\ + L_{scc} \cdot \rho i_{sc} + \frac{dL_{scc}}{dx} \cdot V_x \cdot i_{sc} = 0 \quad (62)$$

● Equações explicitando as correntes de primário:

$$i_{pa} = 1/L_{paa} \cdot \left[\int (v_{pa} - R_p \cdot i_{pa}) dt - M_{pba} \cdot i_{pb} - M_{pca} \cdot i_{pc} - M_{spaa} \cdot i_{sa} \cdot (1 + V_X) + \right. \\ \left. - M_{spba} \cdot i_{sb} \cdot (1 + V_X) - M_{spca} \cdot i_{sc} \cdot (1 + V_X) \right] \quad (63)$$

$$i_{pb} = 1/L_{pbb} \cdot \left[\int (v_{pb} - R_p \cdot i_{pb}) dt - M_{pab} \cdot i_{pa} - M_{pcb} \cdot i_{pc} - M_{spab} \cdot i_{sa} \cdot (1 + V_X) + \right. \\ \left. - M_{spbb} \cdot i_{sb} \cdot (1 + V_X) - M_{spcb} \cdot i_{sc} \cdot (1 + V_X) \right] \quad (64)$$

$$i_{pc} = 1/L_{pcc} \cdot \left[\int (v_{pc} - R_p \cdot i_{pc}) dt - M_{pac} \cdot i_{pa} - M_{pcb} \cdot i_{pb} - M_{spac} \cdot i_{sa} \cdot (1 + V_X) + \right. \\ \left. - M_{spbc} \cdot i_{sb} \cdot (1 + V_X) - M_{spcc} \cdot i_{sc} \cdot (1 + V_X) \right] \quad (65)$$

● Equações explicitando as correntes de secundário:

$$i_{sa} = -\frac{1}{R_s} \cdot \left[M_{psaa} \cdot \rho i_{pa} + M_{psba} \cdot \rho i_{pb} + M_{psca} \cdot \rho i_{pc} + L_{saa} \cdot \rho i_{sa} + M_{sba} \cdot \rho i_{sb} + \right. \\ \left. + M_{sca} \cdot \rho i_{sc} + V_x \cdot \left(\frac{dM_{psaa}}{dx} \cdot i_{pa} + \frac{dM_{psba}}{dx} \cdot i_{pb} + \frac{dM_{psca}}{dx} \cdot i_{pc} + \frac{dL_{saa}}{dx} \cdot i_{sa} \right) \right] \quad (66)$$

$$i_{sb} = -\frac{1}{R_s} \cdot \left[M_{psab} \cdot \rho i_{pa} + M_{psbb} \cdot \rho i_{pb} + M_{pscb} \cdot \rho i_{pc} + L_{sbb} \cdot \rho i_{sb} + M_{sab} \cdot \rho i_{sa} + \right. \\ \left. + M_{scb} \cdot \rho i_{sc} + V_x \cdot \left(\frac{dM_{psab}}{dx} \cdot i_{pa} + \frac{dM_{psbb}}{dx} \cdot i_{pb} + \frac{dM_{pscb}}{dx} \cdot i_{pc} + \frac{dL_{sbb}}{dx} \cdot i_{sb} \right) \right] \quad (67)$$

$$i_{sc} = -\frac{1}{R_s} \cdot \left[M_{psac} \cdot \rho i_{pa} + M_{psbc} \cdot \rho i_{pb} + M_{pscc} \cdot \rho i_{pc} + M_{sac} \cdot \rho i_{sa} + M_{sbc} \cdot \rho i_{sb} + \right. \\ \left. + L_{scc} \cdot \rho i_{sc} + V_x \cdot \left(\frac{dM_{psac}}{dx} \cdot i_{pa} + \frac{dM_{psbc}}{dx} \cdot i_{pb} + \frac{dM_{pscc}}{dx} \cdot i_{pc} + \frac{dL_{scc}}{dx} \cdot i_{sc} \right) \right] \quad (68)$$

● Equação de Conversão Eletromecânica de Energia:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \{ [i] \cdot \left(\frac{d}{dx} [M(x)] \right) \cdot [i] \} \quad (69)$$

● Forma matricial da equação (69):

$$F = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} i_{pa} & i_{pb} & i_{pc} & i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} L_{paa} & M_{pab} & M_{pac} & M_{spaa} & M_{spba} & M_{spca} \\ M_{pba} & L_{pbb} & M_{pbc} & M_{spab} & M_{spbb} & M_{spcb} \\ M_{pca} & M_{pcb} & L_{pcc} & M_{spac} & M_{spbc} & M_{spcc} \\ M_{psaa} & M_{psba} & M_{psca} & L_{saa} & M_{sba} & M_{sca} \\ M_{psab} & M_{psbb} & M_{pscb} & M_{sab} & L_{sbb} & M_{scb} \\ M_{psac} & M_{psbc} & M_{pscc} & M_{sac} & M_{sbc} & L_{scc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \right\} \quad (70)$$

● Desenvolvimento da equação (70):

E resolvendo o sistema acima e fazendo as devidas simplificações, baseadas nas considerações acima, tem-se a equação final para a força:

$$F = \frac{1}{2} \left[i_{pa} \cdot i_{sa} \frac{d}{dx} M_{psaa}(x) + i_{pa} \cdot i_{sb} \frac{d}{dx} M_{psab}(x) + i_{pa} \cdot i_{sc} \frac{d}{dx} M_{psac}(x) + \right. \\ \left. + i_{pb} \cdot i_{sa} \frac{d}{dx} M_{psba}(x) + i_{pb} \cdot i_{sb} \frac{d}{dx} M_{psbb}(x) + i_{pb} \cdot i_{sc} \frac{d}{dx} M_{psbc}(x) + \right. \\ \left. + i_{pc} \cdot i_{sa} \frac{d}{dx} M_{psca}(x) + i_{pc} \cdot i_{sb} \frac{d}{dx} M_{pscb}(x) + i_{pc} \cdot i_{sc} \frac{d}{dx} M_{pscc}(x) + \right. \\ \left. + (i_{sa})^2 \frac{d}{dx} L_{saa}(x) + (i_{sb})^2 \frac{d}{dx} L_{sbb}(x) + (i_{sc})^2 \frac{d}{dx} L_{scc}(x) \right] \quad (71)$$

● Equação dinâmica (2ª Lei de Newton):

$$F - (D \cdot V_X) = m \cdot \frac{dV_X}{dt} \Rightarrow \quad \therefore \quad V_X = \frac{1}{m} \int [F - (D \cdot V_X)] \cdot dt \quad (72)$$

onde:

m = massa envolvida;

D = coeficiente de atrito.

Resta, neste ponto, a obtenção dos parâmetros do M.I.L., para que seja realizada sua simulação. A obtenção dos parâmetros é realizada no Capítulo III.

CAPÍTULO III - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é descrever o procedimento adotado para a obtenção dos parâmetros elétricos do M.I.L. que, aplicados ao modelo matemático obtido no Capítulo II, permitirão o desenvolvimento da simulação computacional do motor sob análise.

O método experimental utilizado neste capítulo encontra bases em TURNER [34] e no conjunto de trabalhos de SIMONE, aplicado ao M.I.L. desenvolvido por GUERRINI [13].

A obtenção dos parâmetros incluiu um trabalho de medições e análise dos artigos [03], [13], [34] e [37] e dos resultados obtidos. As indutâncias do M.I.L. variam com a posição. Uma exceção é feita às indutâncias próprias do primário, isto é, indutâncias próprias por fase e as mútuas entre fases desse enrolamento, que são invariantes, analogamente ao estator do motor de indução rotativo. No secundário, diferente do motor convencional, as indutâncias próprias por fase e mútuas entre fases apresentam variações, devido à assimetria estrutural do M.I.L. As indutâncias mútuas primário/secundário, fase a fase, variam com a posição.

Utilizaram-se dois dispositivos, que foram denominados *sonda monofásica* (figura 11) e *sonda trifásica* (figura 12), constituídas de uma base isolante de mesma espessura que a placa de reação, tendo na primeira uma bobina de mesmas dimensões que as do primário e número de espiras conhecido (10 espiras) e a segunda, três bobinas com o mesmo número de espiras da primeira, justapostas como no enrolamento trifásico do primário. Em ambas as sondas o fio condutor utilizado é de bitola $0,322 \text{ mm}^2$ (22 AWG).

O processo experimental consiste da substituição da placa de reação de alumínio do secundário do M.I.L., pela sonda monofásica e a realização das medidas de tensão e corrente, que forem necessárias à obtenção das indutâncias, movimentando passo a passo a sonda, de

forma a determinar suas relações com a posição, desde a entrada até a saída. A figura 11 é um esboço deste processo.

FIGURA 11 - Modelo simplificado do M.I.L. [34]

Por outro lado, a sonda trifásica foi utilizada visando a avaliação das indutâncias mútuas dentro do virtual enrolamento trifásico do secundário.

Após obter as tabelas 1 a 4, em Anexos, foram calculados ponto a ponto os valores de todas as indutâncias que dependem da posição, aplicou-se o programa ENERGRAF, com vistas à obtenção das funções polinomiais, equações (77) a (88), que melhor representam tais indutâncias em função da posição.

2. DESCRIÇÃO DO MOTOR

O motor a ser simulado e que é base para a obtenção dos parâmetros, é o que foi desenvolvido por GUERRINI [13], cujos dados estão no quadro 1 abaixo e o esquema das ligações do motor é mostrado na figura 12 a seguir.

FIGURA 12 - Esquema das ligações do enrolamento do motor [13].

Alimentação:	trifásica
Número de pólos:	2
Número de ranhuras do indutor:	12
Ranhuras por pólo por fase:	2
Lados de bobina por ranhura:	1
Número de espiras por bobina:	50
Bitola do condutor	20 AWG
Tipo de enrolamento:	trifásico - Y
Tamanho do passo polar:	$\tau_p = 75 \text{ mm}$
Tipo do passo polar:	Pleno
Comprimento ativo do indutor:	55 mm
Profundidade das ranhuras:	20 mm
Largura das ranhuras:	6 mm
Espessura dos dentes:	6,5 mm
Ranhuras por fase:	4
Espiras por fase de enrolamento:	200
Velocidade síncrona:	9 m/s
Suporte ferromagnético do indutor, espessura:	20 mm
Espessura da placa de alumínio do induzido:	0,8 mm
Entreferro médio:	1,8 mm

QUADRO 1 - Características do Motor de Indução Linear (M.I.L.) [13].

O motor é do tipo indutor curto, isto é, com enrolamento de tamanho limitado, de fácil execução, apresentando o problema da transmissão da energia elétrica da fonte de alimentação para o indutor, devendo ser feita por contatos deslizantes [13] e [34].

O projeto do indutor deste motor de indução linear, figura 15, é idêntico ao de um motor convencional de 0,5 c.v., com as modificações necessárias, baseando-se neste caso na Teoria dos Motores de Indução Linear. O problema de aquecimento que ocorre no motor convencional, é praticamente desprezado no M.I.L., pois o induzido (secundário) tem partes que são cobertas e descobertas pelo indutor (primário), sendo o calor imediatamente dissipado no ar livre. Uma modificação dos enrolamentos previu a possibilidade de densidades de corrente da ordem de 9 A/mm^2 , com o cuidado de não saturação dos dentes do indutor. Este protótipo de indutor simples daria com entreferro normal cerca de 40 kgf [13].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1) Com as sondas das figuras 13 e 14 e o esquema dos enrolamentos, figura 12, têm-se:

1.1) Ligando A, N => energiza-se a fase 1

1.2) Caminhando com a sonda, e marcando em centímetros com uma régua fixada no induzido, conforme a figura 16. A seguir relaciona-se o número de espiras do enrolamento do indutor, por fase, com o número de espiras da sonda, repetindo este procedimento para as outras fases (b e c). Utilizando o conjunto de equações a seguir, relaciona-se as tensões obtidas com as indutâncias próprias e mútuas.

$$\frac{V_{FN}}{N_F \cdot K_W} = \frac{E_{SONDA}}{N_{SONDA}} \quad (73)$$

$$L = \frac{N_F^2}{\Re} \quad (74)$$

$$M = \frac{N_1 \cdot N_2}{\Re} \quad (75)$$

$$V_2 = X \cdot I_1 \quad (76)$$

2) Estabelece-se a relação entre as fases A, B e C.

Ligar A e colocar a sonda embaixo da fase B. A seguir, repetir para C, isto é, ligar a fase A e colocar a sonda em C. Fazer o mesmo procedimento para as fases B e C.

3) Os resultados obtidos, são apresentados nas tabelas 1 a 4, em Anexos.

4) De (76), e com $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, têm como resultados as tabelas 5 e 6, em Anexos, com as indutâncias calculadas com a posição em cada ponto.

5) Com os resultados de L, e utilizando o programa ENERGRAF, obtêm-se os polinômios que representam as indutâncias em função do deslocamento x , do motor. As indutâncias são representadas pelas equações (77) a (88). As figuras 17 a 21 mostram o comportamento das indutâncias com a posição.

FIGURA 13 - Sonda monofásica

FIGURA 14 - Sonda trifásica

FIGURA 15- Motor de indução linear (M.I.L.)

FIGURA 16 - Bancada de medições para o M.I.L.

FIGURA 17 - Indutâncias relacionadas com a fase A e suas mútuas em função do deslocamento (x). FIGURA 18 - Indutâncias relacionadas a fase B e suas mútuas em função do deslocamento (x). FIGURA 19 - Indutâncias relacionadas a fase C e suas mútuas em função do deslocamento (x). FIGURA 20 - Indutâncias mútuas do secundário em função do deslocamento (x).

FIGURA 21 - Indutância própria do secundário em função do deslocamento (x).

• Equacionamento das indutâncias:

$$\begin{aligned} Mpsaa(x) = & -0,868 \text{ E-3} + 42,72 \text{ E-3} \cdot x - 237,8 \text{ E-3} \cdot x^2 + 231,6 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & + 952,3 \text{ E-3} \cdot x^4 - 1,478 \cdot x^5 - 1,008 \cdot x^6 + 2,602 \cdot x^7 - 1,102 \cdot x^8 \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} Mpsab(x) = & 0,469 \text{ E-3} - 2,584 \text{ E-3} \cdot x + 85,01 \text{ E-3} \cdot x^2 + 61,10 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & - 668,50 \text{ E-3} \cdot x^4 + 1,238 \text{ E-3} \cdot x^5 + 1,330 \cdot x^6 - 541,10 \text{ E-3} \cdot x^7 + \\ & - 1,034 \cdot x^8 + 710,00 \text{ E-3} \cdot x^9 + - 62,44 \text{ E-3} \cdot x^{10} \end{aligned} \quad (78)$$

$$\begin{aligned} Mpsac(x) = & 1,892 \text{ E-3} + 25,580 \text{ E-3} \cdot x + 35,710 \text{ E-3} \cdot x^2 - 641,700 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & + 1,065 \cdot x^4 + 413,500 \text{ E-3} \cdot x^5 - 1,814 \cdot x^6 + 376,300 \text{ E-3} \cdot x^7 + \\ & + 1,363 \cdot x^8 - 1,105 \cdot x^9 + 282 \text{ E-3} \cdot x^{10} \end{aligned} \quad (79)$$

$$\begin{aligned} Mpsbb(x) = & 0,813 + 30,570 \text{ E-3} \cdot x - 231,10 \text{ E-3} \cdot x^2 + 392,00 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & + 516,90 \text{ E-3} \cdot x^4 - 1,3 \cdot x^5 + 394,3 \text{ E-3} \cdot x^6 - 1,482 \cdot x^7 + \\ & + 3,974 \cdot x^8 - 2,828 \cdot x^9 + 533,3 \text{ E-3} \cdot x^{10} \end{aligned} \quad (80)$$

$$\begin{aligned} Mpsba(x) = & 0,777 \text{ E-3} + 18,06 \text{ E-3} \cdot x - 49,84 \text{ E-3} \cdot x^2 - 205,6 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & + 667,0 \text{ E-3} \cdot x^4 + 132,3 \text{ E-3} \cdot x^5 - 1,31 \cdot x^6 + 305,5 \text{ E-3} \cdot x^7 + \\ & + 894,1 \text{ E-3} \cdot x^8 - 451,3 \text{ E-3} \cdot x^9 \end{aligned} \quad (81)$$

$$\begin{aligned} Mpsbc(x) = & 0,763 \text{ E-3} - 16,49 \text{ E-3} \cdot x + 190,90 \text{ E-3} \cdot x^2 - 257,0 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & - 335,7 \text{ E-3} \cdot x^4 + 368,100 \text{ E-3} \cdot x^5 + 646,300 \text{ E-3} \cdot x^6 + \\ & - 456,700 \text{ E-3} \cdot x^7 - 459,500 \text{ E-3} \cdot x^8 + 320,70 \text{ E-3} \cdot x^9 \end{aligned} \quad (82)$$

$$\begin{aligned} \text{Mpscc}(x) = & 1,26 \text{ E-3} + 46,31 \text{ E-3} \cdot x - 491,3 \text{ E-3} \cdot x^2 + 1,686 \cdot x^3 + \\ & - 2,228 \cdot x^4 + 1,834 \cdot x^5 + - 3,54 \cdot x^6 + 4,838 \cdot x^7 + \\ & - 1,868 \cdot x^8 - 673,8 \text{ E-3} \cdot x^9 + 396,6 \text{ E-3} \cdot x^{10} \end{aligned} \quad (83)$$

$$\begin{aligned} \text{Mpsca}(x) = & 1,246 \text{ E-3} - 15,8 \text{ E-3} \cdot x + 193,60 \text{ E-3} \cdot x^2 - 521,20 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & + 75,81 \text{ E-3} \cdot x^4 + 967,6 \text{ E-3} \cdot x^5 - 388,7 \text{ E-3} \cdot x^6 + \\ & - 843,7 \text{ E-3} \cdot x^7 + 534,8 \text{ E-3} \cdot x^8 \end{aligned} \quad (84)$$

$$\begin{aligned} \text{Mpscb}(x) = & 1,182 \text{ E-3} + 30,13 \text{ E-3} \cdot x - 185,1 \text{ E-3} \cdot x^2 + 148,7 \text{ E-3} \cdot x^3 + \\ & + 622,1 \text{ E-3} \cdot x^4 - 417,9 \text{ E-3} \cdot x^5 - 1,313 \cdot x^6 + 863,1 \text{ E-3} \cdot x^7 + \\ & + 954,1 \text{ E-3} \cdot x^8 - 702,9 \text{ E-3} \cdot x^9 \end{aligned} \quad (85)$$

$$\text{Lsaa}(x) = 16,2 \text{ E-3} + 1,812 \text{ E-3} \cdot x \quad (86)$$

$$\text{Lsbb}(x) = 16,2 \text{ E-3} + 1,812 \text{ E-3} \cdot x \quad (87)$$

$$\text{Lscc}(x) = 16,2 \text{ E-3} + 1,812 \text{ E-3} \cdot x \quad (88)$$

As expressões a seguir são utilizadas na simulação do M.I.L.

- Equacionamento das derivadas:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpsaa}(x) = & 42,72 \text{ E-3} - 0,4756 \cdot x + 0,6948 \cdot x^2 + 3,8092 \cdot x^3 - 7,39 \cdot x^4 + \\ & - 6,048 \cdot x^5 + 18,214 \cdot x^6 - 8,816 \cdot x^7 \end{aligned} \quad (89)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpsab}(x) = & -2,584 \text{ E-3} + 0,17 \cdot x + 0,1883 \cdot x^2 - 2,674 \cdot x^3 + 6,19 \text{ E-3} \cdot x^4 + \\ & + 7,98 \cdot x^5 - 3,7877 \cdot x^6 - 8,272 \cdot x^7 + 6,39 \cdot x^8 - 0,6244 \cdot x^9 \end{aligned} \quad (90)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpsac}(x) = & 2,558 \text{ E-2} + 7,142 \text{ E-2} \cdot x - 1,9251 \cdot x^2 + 4,26 \cdot x^3 + 2,0675 \cdot x^4 + \\ & - 10,884 \cdot x^5 + 2,6341 \cdot x^6 + 10,904 \cdot x^7 - 9,945 \cdot x^8 + 2,82 \cdot x^9 \end{aligned} \quad (91)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpsbb}(x) = & 3,057 \text{ E-2} - 0,4622 \cdot x + 1,176 \cdot x^2 + 2,0676 \cdot x^3 - 6,5 \cdot x^4 + \\ & + 2,3658 \cdot x^5 - 10,374 \cdot x^6 + 31,792 \cdot x^7 - 25,452 \cdot x^8 + 5,333 \cdot x^9 \end{aligned} \quad (92)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpsba}(x) = & 1,806 \text{ E-2} - 9,968 \text{ E-2} \cdot x - 0,6168 \cdot x^2 + 2,668 \cdot x^3 + 0,6615 \cdot x^4 + \\ & - 7,86 \cdot x^5 + 2,1385 \cdot x^6 + 7,1528 \cdot x^7 - 4,0617 \cdot x^8 \end{aligned} \quad (92)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpsbc}(x) = & - 1,649 \text{ E-2} + 0,3818 \cdot x - 0,771 \cdot x^2 - 1,3428 \cdot x^3 + 1,8405 \cdot x^4 + \\ & + 3,8778 \cdot x^5 - 3,1969 \cdot x^6 - 3,6776 \cdot x^7 + 2,8863 \cdot x^8 \end{aligned} \quad (93)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpcc}(x) = & 4,631 \text{ E-2} - 0,9826 \cdot x + 5,058 \cdot x^2 - 8,912 \cdot x^3 + 9,17 \cdot x^4 + \\ & - 21,24 \cdot x^5 + 33,866 \cdot x^6 - 14,944 \cdot x^7 - 6,0642 \cdot x^8 + 3,966 \cdot x^9 \end{aligned} \quad (94)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpsca}(x) = & - 1,58 \text{ E-2} + 0,3872 \cdot x - 1,5636 \cdot x^2 + 0,3032 \cdot x^3 + 4,838 \cdot x^4 + \\ & - 2,3322 \cdot x^5 - 5,9059 \cdot x^6 + 4,2784 \cdot x^7 \end{aligned} \quad (95)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \text{Mpscb}(x) = & 3,013 \text{ E-2} - 0,3702 \cdot x + 0,4461 \cdot x^2 + 2,4884 \cdot x^3 - 2,0895 \cdot x^4 + \\ & - 7,878 \cdot x^5 + 6,0417 \cdot x^6 + 7,6328 \cdot x^7 - 6,3261 \cdot x^8 \end{aligned} \quad (96)$$

$$\frac{d}{dx} \text{Lsaa}(x) = \frac{d}{dx} \text{Lsbb}(x) = \frac{d}{dx} \text{Lscc}(x) = 1,812 \text{ E-3} \quad (97)$$

CAPÍTULO IV – SIMULAÇÃO DO M.I.L. E RESULTADOS

Com o modelo matemático e os parâmetros do M.I.L. já obtidos, são mostrados a seguir os procedimentos adotados em sua simulação.

Os programas SIMULINKTM e MATLABTM foram utilizados com base em seus manuais [33], permitindo a realização de cálculos sofisticados com uma interface gráfica; algumas informações neste sentido encontram-se em Anexos.

A seguir, têm-se os resultados das simulações, cujas curvas simuladas obtidas, foram da velocidade versus tempo, força versus tempo e força versus velocidade, para o M.I.L., utilizando massas de 5,3 kg, 10 kg e 20 kg e tensões de 50 V e 100 V, para todas as massas utilizadas nas simulações, cujas curvas são mostradas nas figuras 26 a 43.

Em CHANGAN [03], são mostradas as curvas, aqui apresentadas nas figuras 44 a 46, que dão bases e certa confiabilidade aos resultados obtidos neste trabalho, isto no aspecto qualitativo.

Os dados de placa do M.I.L. simulado estão no quadro 1, página 35. Para ser realizada uma comparação com os resultados experimentais, recorreu-se a GUERRINI [13], que apresenta as curvas de velocidade versus tempo e força versus velocidade, mostradas nas figuras 22 a 25.

Foi constatado que o escorregamento é da ordem de 35 % e a velocidade, em regime permanente, é de 5,8 m/s, atingida após um tempo de 4,5 s, apenas com a massa de 5,3 kg. As figuras 22 e 23 foram obtidas para massa de 11 kg e tensão de 180 V, e as figuras 24 e 25 para massa de 5,3 kg e tensão de 180 V.

Parte I – Gráficos resultantes das medidas de [13]:

FIGURA 22 – Curva da força em função da velocidade. [13]

FIGURA 23 – Curva da velocidade em função do tempo. [13]

FIGURA 24 – Curva da força em função da velocidade. [13]

FIGURA 25 – Curva da velocidade em função do tempo. [13]

Parte II – Gráficos resultantes das simulações:

FIGURA 26 – Força em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 27 – Velocidade em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 28 – Força em função da velocidade para $m = 5$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 29 – Força em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 30 – Velocidade em função do tempo para $m = 5$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 31 – Força em função da velocidade para $m = 5$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 32 – Força em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 33 - Velocidade em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 34 – Força em função da velocidade para $m = 10$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 35 - Força em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 36 – Velocidade em função do tempo para $m = 10$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 37 – Força em função da velocidade para $m = 10$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 38 – Força em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 39 – Velocidade em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 40 – Força em função da velocidade para $m = 20$ kg e tensão de 50 V.

FIGURA 41 – Força em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 42 – Velocidade em função do tempo para $m = 20$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 43 – Força em função da velocidade para $m = 20$ kg e tensão de 100 V.

FIGURA 44 – Velocidade em função do tempo [03].

FIGURA 45 – Força em função do tempo [03].

FIGURA 46 – Força em função da velocidade [03].

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Comparando os resultados da simulação realizada neste trabalho, na forma de gráficos, figuras 26 a 43, com os resultados, também de simulação, apresentados por CHANGAN [03] nas figuras 44 a 46, é possível observar uma semelhança no comportamento dos motores de indução lineares simulados, seja em termos da velocidade, seja em termos da força, ambas em função do tempo, ainda que se tratem de motores lineares com números de pólos e potências bem distintos. É importante frisar que as simulações, embora realizadas por meios diferentes, partiram de uma analogia muito forte com o motor de indução trifásico rotativo, de rotor *gaiola de esquilo*.

Com relação à comparação entre resultados de simulação deste trabalho e experimentais, de GUERRINI [13] nas figuras 22 a 26, as curvas, de evolução no tempo, da velocidade do MIL mostram grande similaridade no que diz respeito à forma. No aspecto quantitativo, ficam evidentes as diferenças, já que nos gráficos representativos da evolução da velocidade, simuladas, há ocorrência de baixos escorregamentos, enquanto que, nos casos experimentais mostrados, o escorregamento é elevado (0,35).

É importante, neste ponto, deixar evidente que a causa preponderante de tal diferença é a ausência, no modelo matemático desenvolvido, de uma correção relativa ao *efeito de extremidade longitudinal*.

A inclusão dessa correção, certamente, além de diminuir as diferenças entre os resultados de simulação e experimentais, enriquecerá sobremaneira o modelo matemático para o MIL sob estudos.

O presente trabalho apresenta como contribuições à análise do MIL, a consideração fundamental de seu secundário como um virtual *enrolamento trifásico em curto*, bem como por ter realizado a simulação a partir, diretamente, do modelo trifásico, sem aplicar

transformações, as quais são muito comuns na análise de motores rotativos. Tentou-se, de início, colocar o modelo na forma de *equações de estado*, o que exigiria a inversão de uma matriz literal de ordem 6, tarefa complicada mesmo para *softwares* de processamento simbólico em um computador Pentium 100 MHz (a grosso modo $6! = 720$ operações), como foi constatado, com o uso do MATHCAD para a inversão da matriz de ordem 5 o processo consumiu cerca de uma hora e, para a inversão da matriz de ordem 6, após três horas de processamento não houve resposta alguma.

A continuação deste trabalho, com a correção sugerida no modelo matemático e a utilização de um sistema de aquisição de dados, para medições das grandezas elétricas e de grandezas mecânicas, tanto na fase de obtenção dos parâmetros, quanto durante a operação do MIL, permitirá uma análise mais completa do MIL, levando até a possíveis alterações de projeto do MIL sob estudos, inclusive aplicando o Método dos Elementos Finitos, num refinamento do cálculo dos parâmetros.

ANEXOS

TABELA 1 - Medida das tensões, realizadas com a sonda da figura 12

X (m)	Vpsaa (V)	Vpsab (V)	Vpsac (V)	Vpsbb (V)	Vpsba (V)	Vpsbc (V)	Vpscc (V)	Vpsca (V)	Vpscb (V)
0,000	0,0997	0,0239	0,2088	0,1421	0,1019	0,0644	0,1587	0,0823	0,1458
0,005	0,1037	0,0448	0,2497	0,1402	0,1142	0,0374	0,1576	0,0918	0,1593
0,010	0,0992	0,0789	0,3077	0,1304	0,1312	0,0315	0,1436	0,1060	0,1727
0,015	0,0865	0,1186	0,3621	0,1201	0,1493	0,0847	0,1254	0,1196	0,1868
0,020	0,0545	0,1618	0,4092	0,0959	0,1657	0,1268	0,0906	0,1331	0,1989
0,025	0,0268	0,2170	0,4725	0,0582	0,1819	0,1777	0,0542	0,1468	0,2105
0,030	0,0280	0,2553	0,4974	0,0228	0,1858	0,2423	0,0180	0,1592	0,2110
0,035	0,0627	0,3040	0,4789	0,0249	0,1744	0,2937	0,0334	0,1711	0,1658
0,040	0,1026	0,3553	0,4353	0,0613	0,1598	0,3625	0,0699	0,1840	0,1231
0,045	0,1365	0,4149	0,3724	0,1209	0,1262	0,4153	0,1084	0,1963	0,0694
0,050	0,1728	0,4702	0,3148	0,1593	0,0795	0,4450	0,1966	0,2094	0,0222
0,055	0,2078	0,4932	0,2526	0,2007	0,0281	0,4672	0,2013	0,2108	0,0525
0,060	0,2492	0,4956	0,1943	0,2412	0,0420	0,4742	0,2451	0,1948	0,1081
0,065	0,2987	0,4799	0,1404	0,2842	0,0812	0,4585	0,2804	0,1738	0,1458
0,070	0,3302	0,4304	0,0867	0,3260	0,1358	0,4095	0,3244	0,1310	0,2068
0,075	0,3677	0,3678	0,0334	0,3604	0,1836	0,3611	0,3489	0,0754	0,2719
0,080	0,3801	0,3047	0,0298	0,3679	0,2591	0,3071	0,3526	0,0205	0,3316
0,085	0,3752	0,2515	0,0712	0,3618	0,3068	0,2572	0,3463	0,0443	0,3717
0,090	0,3516	0,1944	0,1271	0,3396	0,3683	0,2028	0,3223	0,1020	0,4288
0,095	0,3148	0,1419	0,1586	0,3024	0,4118	0,1433	0,2898	0,1489	0,4695
0,100	0,2750	0,0831	0,1891	0,2604	0,4610	0,0988	0,2519	0,1985	0,4605
0,105	0,2277	0,0331	0,2005	0,2130	0,4856	0,0475	0,1727	0,2601	0,4274
0,110	0,1837	0,0397	0,1999	0,1827	0,4816	0,0241	0,1367	0,3115	0,3938
0,115	0,1380	0,0792	0,1908	0,1323	0,4587	0,0613	0,0972	0,3676	0,3486
0,120	0,0898	0,1210	0,1756	0,0938	0,4053	0,0937	0,0714	0,4159	0,2801
0,125	0,0389	0,1671	0,1624	0,0484	0,3630	0,1286	0,0401	0,4518	0,2324
0,130	0,0142	0,1876	0,1505	0,0225	0,2948	0,1473	0,0185	0,4652	0,1925
0,135	0,0284	0,1995	0,1397	0,0213	0,2194	0,1600	0,0307	0,4522	0,1485
0,140	0,0689	0,1950	0,1280	0,0275	0,1421	0,1613	0,0547	0,4102	0,0949

TABELA 1 - Medida das tensões, realizadas com a sonda da figura 12 (cont.)

0,145	0,1025	0,1846	0,1138	0,0517	0,0979	0,1553	0,0722	0,3784	0,0618
0,150	0,1305	0,1721	0,1004	0,0789	0,0548	0,1347	0,0807	0,3349	0,0230
0,155			0,0907	0,1026		0,1214	0,0831	0,2817	0,0383
0,160			0,0828	0,1144		0,1051	0,0742	0,2255	0,0699
0,165			0,0715			0,0811	0,0635	0,1789	0,0979
0,170									0,1095
0,175									0,1146

TABELA 2 - Medida das correntes, realizadas com a sonda da figura 12

X (m)	Ipsaa (A)	Ipsab (A)	Ipsac (A)	Ipsbb (A)	Ipsba (A)	Ipsbc (A)	Ipscc (A)	Ipsca (A)	Ipscb (A)
0,000	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,88	1,17	1,17
0,005	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,88	1,17	1,17
0,010	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,17
0,015	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,17
0,020	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,17
0,025	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,17
0,030	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,17
0,035	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,17
0,040	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,17
0,045	0,95	1,23	1,23	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,050	0,95	1,23	1,24	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,055	0,95	1,23	1,24	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,060	0,95	1,23	1,24	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,065	0,95	1,23	1,24	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,070	0,95	1,23	1,24	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,075	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,080	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,085	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18

TABELA 2 - Medida das correntes, realizadas com a sonda da figura 12 (cont.).

0,090	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,095	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,100	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,105	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,110	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,115	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,120	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,125	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,130	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,135	0,95	1,23	1,27	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,140	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,145	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,150	0,95	1,23	1,25	0,94	1,22	1,21	0,89	1,17	1,18
0,155			1,25	0,94		1,21	0,89	1,17	1,18
0,160			1,25	0,94		1,21	0,89	1,17	1,18
0,165			1,25			1,21	0,89	1,17	1,18
0,170									1,18
0,175									1,18

TABELA 3- Medida das tensões do secundário, realizadas com a sonda da figura 12 e da figura 13

X (m)	Vsab (V)	Vsac (V)	Vsbc (V)	Vsba (V)	Vsca (V)	Vscb (V)	Vs (V)
0,000	0,576	0,260	0,528	0,648	0,127	0,336	0,81
0,005	0,575	0,265	0,514	0,648	0,115	0,332	0,82
0,010	0,577	0,275	0,473	0,652	0,071	0,318	0,82
0,015	0,581	0,239	0,430	0,558	0,072	0,330	0,82
0,020	0,583	0,239	0,420	0,618	0,073	0,327	0,82
0,025	0,580	0,249	0,417	0,615	0,088	0,346	0,83

TABELA 3- Medida das tensões do secundário, realizadas com a sonda da figura 12 e da figura 13 (cont.).

0,030	0,513	0,261	0,411	0,597	0,015	0,342	0,83
0,035	0,511	0,246	0,399	0,622	0,058	0,339	0,83
0,040	0,509	0,282	0,399	0,620	0,088	0,335	0,84
0,045	0,508	0,297	0,411	0,616	0,076	0,325	0,84
0,050	0,514	0,286	0,365	0,606	0,070	0,314	0,84
0,055	0,522	0,298	0,404	0,591	0,072	0,275	0,84
0,060	0,512	0,252	0,404	0,615	0,088	0,328	0,84
0,065	0,514	0,248	0,404	0,635	0,076	0,344	0,85
0,070	0,515	0,244	0,394	0,593	0,058	0,346	0,88
0,075	0,526	0,241	0,412	0,572	0,061	0,361	0,90
0,080	0,523	0,220	0,408	0,556	0,053	0,362	0,92
0,085	0,524	0,192	0,409	0,532	0,102	0,373	0,93
0,090	0,534	0,191	0,408	0,503	0,146	0,360	0,94
0,095	0,540	0,200	0,408	0,501	0,143	0,357	0,96
0,100	0,540	0,187	0,404	0,500	0,144	0,358	0,99
0,105	0,541	0,193	0,406	0,525	0,144	0,356	1,00
0,110	0,535	0,200	0,404	0,490	0,133	0,341	1,00
0,115	0,471	0,209	0,410	0,415	0,092	0,340	1,03
0,120	0,471	0,167	0,361	0,420	0,105	0,346	1,03
0,125	0,471	0,126	0,391	0,472	0,104	0,334	1,04
0,130	0,470	0,131	0,385	0,482	0,109	0,389	1,05
0,135	0,597	0,139	0,392	0,480	0,109	0,338	1,05
0,140	0,592	0,142	0,438	0,476	0,111	0,332	1,06
0,145	0,603	0,162	0,469	0,473	0,116	0,340	1,06
0,150	0,587	0,175	0,474	0,475	0,086	0,397	1,06
0,155	0,586	0,171	0,476	0,472	0,146	0,387	1,07
0,160	0,587	0,167	0,453	0,475	0,160	0,348	1,07
0,165	0,588	0,160	0,442	0,462	0,146	0,356	1,07
0,170	0,598	0,170	0,491	0,465	0,162	0,366	1,08
0,175		0,183	0,528	0,468	0,147	0,410	1,08

TABELA 3- Medida das tensões do secundário, realizadas com a sonda da figura 12 e da figura 13 (cont.).

0,180		0,188		0,472	0,166	0,418	1,08
0,185				0,475		0,428	1,08
0,190						0,411	1,09
0,195						0,393	1,09
0,200							1,09
0,205							1,09
0,210							1,09
0,215							1,09
0,220							1,09
0,225							1,09

TABELA 4 - Medida das correntes no secundário, realizadas com as sondas da figura 12 e da figura 13

X (m)	Isab (mA)	Isac (mA)	Isbc (mA)	Isba (mA)	Isca (mA)	Iscb (mA)	Is (A)
0,000	1	1	1	2	1	2	0,66
0,005	1	1	1	2	1	2	0,67
0,010	1	1	1	1	1	2	0,67
0,015	1	1	1	1	1	2	0,67
0,020	1	1	1	1	1	2	0,67
0,025	1	1	1	1	1	2	0,67
0,030	1	1	1	1	1	2	0,67
0,035	1	1	1	1	1	2	0,67
0,040	1	1	1	1	1	2	0,68
0,045	1	1	1	1	1	1	0,68
0,050	1	1	1	1	1	1	0,68
0,055	1	1	1	1	1	1	0,68

TABELA 4 - Medida das correntes no secundário, realizadas com as sondas da figura 12 e da figura 13 (cont.).

0,060	1	1	1	1	1	1	0,68
0,065	1	1	1	1	1	1	0,69
0,070	1	1	1	1	1	1	0,71
0,075	1	1	1	3	1	1	0,73
0,080	1	1	1	2	1	1	0,74
0,085	4	1	1	2	1	1	0,75
0,090	2	1	1	2	1	1	0,76
0,095	2	1	1	1	1	1	0,77
0,100	2	1	1	1	1	1	0,80
0,105	1	1	1	1	1	1	0,81
0,110	1	1	3	1	1	1	0,81
0,115	1	1	3	1	1	1	0,83
0,120	1	1	3	1	1	1	0,83
0,125	1	1	3	1	1	1	0,84
0,130	1	1	3	1	1	1	0,85
0,135	1	1	3	1	1	1	0,85
0,140	1	1	3	1	1	1	0,85
0,145	1	1	3	1	1	1	0,85
0,150	1	1	3	1	1	1	0,85
0,155	1	1	3	1	1	1	0,85
0,160	1	1	3	1	1	1	0,85
0,165	1	1	3	1	1	1	0,85
0,170	1	1	3	1	1	1	0,86
0,175		1	3	1	1	1	0,86
0,180		1		1	1	1	0,86
0,185				1		1	0,86
0,190						1	0,87
0,195						1	0,87
0,200							0,87
0,205							0,87

TABELA 5 - Indutâncias em função da posição (x), utilizando os dados das tabelas 1 e 2.

x (m)	Mpsaa (mH)	Mpsab (mH)	Mpsac (mH)	Mpsbb (mH)	Mpsba (mH)	Mpsbc (mH)	Mpscc (mH)	Mpsca (mH)	Mpscb (mH)
0,000	-1,39	0,26	2,25	-2,00	-1,11	-0,71	-2,39	-0,93	-1,65
0,005	-1,45	0,48	2,69	-1,98	-1,24	-0,41	-2,38	-1,04	-1,81
0,010	-1,38	0,85	3,32	-1,84	-1,43	-0,04	-2,14	-1,20	-1,96
0,015	-1,21	1,28	3,90	-1,69	-1,62	0,93	-1,87	-1,36	-2,12
0,020	-0,76	1,74	4,41	-1,35	-1,80	1,39	-1,35	-1,51	-2,25
0,025	-0,37	2,34	5,09	-0,82	-1,98	1,95	-0,81	-1,66	-2,39
0,030	0,39	2,75	5,36	-0,32	-2,02	2,66	-0,27	-1,80	-2,39
0,035	0,88	3,28	5,16	0,35	-1,90	3,22	0,50	-1,94	-1,88
0,040	1,43	3,83	4,69	0,86	-1,74	3,97	1,04	-2,09	-1,40
0,045	1,91	4,47	4,02	1,71	-1,37	4,55	1,62	-2,23	-0,78
0,050	2,41	5,07	3,37	2,25	-0,86	4,88	2,60	-2,37	-0,25
0,055	2,90	5,32	2,70	2,83	-0,31	5,12	3,00	-2,39	0,59
0,060	3,48	5,34	2,08	3,40	0,46	5,20	3,65	-2,21	1,22
0,065	4,17	5,17	1,50	4,01	0,88	5,03	4,18	-1,97	1,64
0,070	4,61	4,64	0,93	4,60	1,48	4,49	4,83	-1,48	2,32
0,075	5,13	3,97	0,35	5,09	2,00	3,96	5,20	-0,85	3,06
0,080	5,31	3,29	-0,32	5,19	2,82	3,37	5,25	-0,23	3,73
0,085	5,24	2,71	-0,76	5,10	3,34	2,82	5,16	0,50	4,18
0,090	4,91	2,10	-1,35	4,79	4,00	2,22	4,80	1,16	4,82
0,095	4,39	1,53	-1,68	4,27	4,48	1,57	4,32	1,69	5,28
0,100	3,84	0,90	-2,01	3,67	5,01	1,08	3,75	2,25	5,18
0,105	3,18	0,36	-2,13	3,01	5,28	0,52	2,57	2,95	4,80
0,110	2,56	-0,43	-2,12	2,58	5,24	0,26	2,04	3,53	4,43
0,115	1,93	-0,85	-2,02	1,87	4,99	-0,67	1,45	4,17	3,92
0,120	1,25	-1,30	-1,86	1,32	4,41	-1,03	1,06	4,71	3,15
0,125	0,54	-1,80	-1,72	0,68	3,95	-1,41	0,60	5,12	2,61
0,130	0,20	-2,02	-1,60	0,32	3,20	-1,61	-0,28	5,27	2,16
0,135	-0,40	-2,15	-1,48	-0,18	2,39	-1,75	-0,46	5,13	1,67
0,140	-0,96	-2,10	-1,36	-0,39	1,54	-1,77	-0,82	4,65	1,07
0,145	-1,43	-1,99	-1,21	-0,73	1,06	-1,70	-1,08	4,29	0,69
0,150	-1,82	-1,86	-1,07	-1,11	0,60	-1,48	-1,20	3,80	0,26

TABELA 6 - Indutâncias em função da posição (x), após calcular com as equações baseadas nos dados da tabela 3 e da tabela 4.

X(m)	Msab	Msac	Msba	Msbc	Msca	Mscb	Ls
0,000	1,528	0,735	1,087	1,352	0,382	0,920	0,016277
0,005	1,525	0,727	1,087	1,352	0,389	0,920	0,016255
0,010	1,531	0,729	1,080	1,360	0,382	0,926	0,016232
0,017	1,541	0,735	1,087	1,367	0,382	0,933	0,016232
0,020	1,546	0,742	1,080	1,360	0,400	0,933	0,016232
0,025	1,538	0,735	1,087	1,360	0,400	0,940	0,016232
0,031	1,520	0,742	1,087	1,360	0,400	0,926	0,016232
0,035	1,528	0,742	1,087	1,360	0,404	0,926	0,016232
0,040	1,528	0,748	1,087	1,381	0,400	0,926	0,016232
0,045	1,543	0,735	1,095	1,381	0,404	0,933	0,016434
0,050	1,536	0,727	1,087	1,400	0,400	0,926	0,016430
0,055	1,536	0,735	1,102	1,396	0,400	0,920	0,016430
0,060	1,528	0,727	1,102	1,400	0,389	0,933	0,016430
0,065	1,528	0,720	1,095	1,400	0,360	0,926	0,016430
0,070	1,528	0,720	1,102	1,400	0,360	0,918	0,016430
0,075	1,536	0,720	1,102	1,400	0,360	0,933	0,016381
0,080	1,528	0,720	1,087	1,400	0,360	0,933	0,016384
0,085	1,520	0,716	1,095	1,400	0,382	0,940	0,016384
0,090	1,520	0,729	1,095	1,400	0,375	0,955	0,016384
0,095	1,536	0,749	1,109	1,389	0,379	0,947	0,016384
0,100	1,520	0,735	1,102	1,389	0,382	0,950	0,016384
0,105	1,528	0,735	1,120	1,381	0,382	0,944	0,016384
0,110	1,528	0,741	1,109	1,381	0,400	0,948	0,016384
0,115	1,528	0,735	1,101	1,381	0,400	0,940	0,016384
0,121	1,528	0,741	1,114	1,389	0,400	0,955	0,016384
0,125	1,543	0,754	1,131	1,381	0,404	0,933	0,016336
0,130	1,565	0,754	1,160	1,381	0,433	0,940	0,016334
0,135	1,584	0,779	1,176	1,389	0,440	0,926	0,016388
0,140	1,600	0,800	1,190	1,400	0,440	0,926	0,016388

TABELA 6 - Indutâncias em função da posição (x), após calcular com as equações baseadas nos dados da tabela 3 e da tabela 4 (cont.).

0,145	1,600	0,800	1,190	1,400	0,456	0,933	0,016334
0,150	1,600	0,800	1,190	1,400	0,456	0,940	0,016337
0,155	1,600	0,793	1,190	1,400	0,470	0,933	0,016470
0,160	1,609	0,800	1,200	1,411	0,470	0,948	0,016468
0,165	1,600	0,808	1,205	1,411	0,470	0,944	0,016468
0,170	1,600	0,808	1,205	1,418	0,470	0,971	0,016468
0,176		0,800	1,200	1,418	0,463	1,000	0,016400
0,187		0,808	1,200		0,463	1,000	0,016396
0,185			1,200			1,000	0,016499
0,190						1,007	0,016497
0,195						1,007	0,016474

A seguir são demonstrados alguns itens do programa de simulação, sendo que na figura 47, esta o diagrama de blocos, na figura 48, esta a tela da corrente i_{pa} que é similar para i_{pb} e i_{pc} , e na figura 49, esta a tela da obtenção de x .

FIGURA 47 – Diagrama de blocos do simulink (esquemática).

FIGURA 48 – Tela do diagrama de blocos da corrente i_{pa} . FIGURA 49 – Tela do diagrama de blocos da obtenção de x .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS³

- [01] BOLDEA, I.; NASAR, S.A.(1985). *Linear motion electromagnetic systems*. New York, John Wiley, p.79-128, 265-305.
- [02] CABRITA, C. P.; RODRIGUES, A. L. (1989). O motor linear de indução como acionamento de baixa velocidade. *Electricidade*, n. 252, p. 31-38, jan.
- [03] CHANGAN, L.; EASTHAM, T. R.; DAWSON, G. E. (1993). Transient and dynamic performance of a linear induction motor. In: *Proceedings of the IEEE Industry Applications*, 28th, Toronto, Canadá, v. 1, p. 266-273.
- [04] DAWSON, G. E.; EASTHAM, A. R. (1981). The comparative performance of single-sided linear induction motors with squirrel-cage, solid steel and aluminum-capped reaction rail. IEEE Industry Applications Society Meeting, 16th., Philadelphia, *IEEE Conference Record*, 81CH1678-2, p. 323-329, Oct.
- [05] EASTHAM, A. R.; DAWSON, G.E.; PRINGLE, D. M.; DAVIDSON, J. A. (1980). Comparative experimental evaluation of the performance of a slim with a solid-steel reaction rail and with an aluminum - capped reaction rail. *CIGGT Report*, Queen's University, Kingston, p. 80-87.

³As referências bibliográficas e a bibliografia estão de acordo com a referência a seguir:

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (1996). *Diretrizes para a elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. São Carlos. 2^a edição.

-
- [06] ELLIOTT, D. G.; KLIMAN, G. B. (1974). Linear induction motor experiments in comparison with mesh/matrix analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 93, n. 5, p. 1624-1633, Oct.
- [07] GIERAS, J. F. (1983). Simplified theory of double-sided linear induction motor with squirrel-cage electric secondary. *Proc. IEE - Part B*, v. 130, n. 6, p. 424-430.
- [08] GIERAS, J. F. (1984). Equipment for testing single-sided flat linear induction machines. *Electrotechnical Review*, n. 3, p. 84-89.
- [09] GIERAS, J. F. (1994) *Linear induction drives*. Oxford, Clarendon Press, p. 52-87, 140-169.
- [10] GIERAS, J. F.; DAWSON, G. E.; EASTHAM, A. R. (1986). Performance calculation for single-sided linear induction motors with a double-layer reaction rail under constant current excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 22, n. 1, p. 54-62, Jan.
- [11] GIERAS, J. F.; DAWSON, G. E.; EASTHAM, A. R. (1987). A new longitudinal end effect factor for linear induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 2, n. 1, p. 152-159, Mar.
- [12] GROOT, D. J. (1993). Dimensional analysis of the linear induction motor. *IEE Proceedings-B*, v. 140, n. 4, p. 273-280, July.
- [13] GUERRINI, D. P. (1972). *Contribuição ao estudo de motores lineares de indução*. São Carlos, p. 62, Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP).
- [14] HASEBE, S.; KANO, Y. (1987). Effect of the velocity of secondary on eddy current and body force in annular type lin. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 23, n. 5, p. 2835-2837, Sept.

-
- [15] IDIR, K.; DAWSON, G. E.; EASTHAM, A. R. (1993). Modeling and performance of linear induction motor with saturable primary. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 29, n. 6, p. 1123-1128, Nov./Dec.
- [16] LAITHWAITE, E. R. (1975). Linear electric machines - a personal view. *Proceedings of the IEEE*, v. 63, n. 2, p. 250-290, Feb.
- [17] LAITHWAITE, E. R.; NASAR, S. A. (1970). Linear - motion electrical machines. *Proceedings of the IEEE*, v. 58, n. 4, p. 531-542, Apr.
- [18] LIPO, T. A.; NONDAHL, T. A.. (1979). Pole-by-pole d-q model of a linear induction machine. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 98, n. 2, p. 629-642, Mar./Apr.
- [19] NASAR, S. A.; DEL CID JR., L. (1973). Propulsion and levitation forces in a single-sided linear induction motor for high-speed ground transportation. *Proceedings of the IEEE*, v. 61, n. 5, p. 638-646, May.
- [20] NONAKA, S.; FUJII, N. (1987). Simplified two-dimensional analysis of linear induction motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 23, n. 5, p. 2832-2834, Sept.
- [21] NONAKA, S.; HIGUCHI, T. (1988). Design of single-sided linear induction motors for urban transit. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 37, n. 3, p. 167-173, Aug.
- [22] NONDAHL, T. A.; LIPO, T. A. (1979). Transient analysis of a linear induction machine using the d-q pole-by-pole model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 98, n. 4, p. 1366-1374, July/Aug.
- [23] NORTH, G. G. (1973). Harmonic analysis of a short stator linear induction machine using a transformation technique. In: *IEEE Transactions on Winter Power Meeting*, New York, N. Y., paper T 72 061-5, p. 1733-1743.

-
- [24] OOI, B. T. (1973). A generalized machine theory of the linear induction motor. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 92, n. 4, p. 1252-1259, July/Aug.
- [25] POLOUJADOFF, M. (1971). Linear induction machines: I - history and theory of operation. *IEEE Spectrum*, p. 72-80, Feb.
- [26] POLOUJADOFF, M. (1971). Linear induction machines: II - applications. *IEEE Spectrum*, p. 79-86, Mar.
- [27] POLOUJADOFF, M. (1980). *The theory of linear induction machinery*. Oxford, Clarendon Press.
- [28] RODRIGUES, A. L.; CABRITA, C. P. (1989). Distribuição do campo de indução magnética no entreferro do motor linear de indução. *Electricidade*, n. 256, p. 233-242, maio.
- [29] SCHIEBER, D. (1973). Principles of operation of linear induction devices. *Proceedings of the IEEE*, v. 61, n. 5, p. 647-656, May.
- [30] SIMONE, G. A. et al. (1995). Motores de indução lineares: estudo e aplicações. *Eletricidade Moderna*, p. 58-69, jan.
- [31] SIMONE, G. A.; CREPPE, R. C.; SERNI, P.; SOUZA, C. R. (1996). A força propulsora e o fator de relação kr na máquina de indução linear. *Congresso Brasileiro de Automação*, p. 1459-1463.
- [32] SIMONE, G. A.; CREPPE, R. C.; SERNI, P.; SOUZA, C. R. (1996). Máquinas de indução lineares dotadas de placa de relação - uma técnica de projeto. *Congresso Brasileiro de Automação*, p. 1465-1468.

-
- [33] SIMULINK (1996). *Dynamic system simulation for matlab®*. Math Works Inc.
- [34] TURNER, D. R.; LOYE, T. H. (1981). The transient performance of linear induction motors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 100, n. 12, p. 4958-4964, Dec.
- [35] YAMAMURA, S. (1978). *Theory of linear induction motors*. Second Edition, Tokyo, University of Tokyo Press.
- [36] YAMAMURA, S.; ITO, H.; ISHIKAWA, Y. (1972). Theories of the linear induction motor and compensated linear induction motor. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 91, n. 4, p. 1700-1710, July/Aug.
- [37] ZHANG, Z.; EASTHAM, T. R.; DAWSON, G. E. (1993). LIM dynamic performance assessment from parameter identification. In: *Proceedings of the IEEE Industry Applications*, 28th, Toronto, Canadá, v. 1, p. 295-300.

BIBLIOGRAFIA GERAL

Estas obras têm muito a contribuir para o estudo do M.I.L., neste trabalho foram apenas consultadas sem profundidade.

NEHL, T. W.; et al. (1982). Dynamic simulation of radially oriented permanent magnet type electronically operated synchronous machines with parameters obtained from finite element field solutions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 18, n. 2, p. 172-182, Mar./Apr.

AKMESE, R.; EASTHAM, J. F. (1994). Finite element modelling of tubular dc brushless machines at standstill. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 5, p. 3672-3674, Sept.

DENG, Z.; NASAR, S. A.; BOLDEA, I. (1986). Fields in permanent magnet linear synchronous machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, v.22, n. 2, p. 107-112, Mar.

EASTHAM, J. F.; HILL-COTTINGHAM, R. J.; LEONARD, P. J. (1994). Comparison of the use of simple space transient and finite element analysis of linear induction motor calculation. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 5, p. 3687-3689, Sept.

FOUAD, F. A.; NEHL, T. W.; DEMERDASH, N.A. (1981). Magnetic field modeling of permanent magnet type electronically operated synchronous machines using finite elements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 100, n. 9, p. 4125-4135, Sept.

-
- JESUS, J. M. F. (1988). A model for saturation in induction machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 3, n. 3, p. 682-687, Sept.
- PAVLIK, D.; et al. (1988). A Finite element technique for calculating the magnet sizes and inductances of permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 3, n. 1, p. 116-122, Mar.
- SMITH, A. C.; WILLIAMSON, S.; SMITH, J. R. (1990). Transient currents and torques in wound rotor induction motors using finite element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 25, n. 3, p. 160-173, May.
- STURGENS, J. P.; ZHU, M.; MACDONALD, D. C. (1992). Finite element simulation of a generator on load during and after a three phase fault. *IEEE Transactions on Energy Conservation*, v. 7, n. 4, p. 787-793, Dec.
- WILLIAMSON, S.; ROBINSON, M. J. (1991). Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 138, n. 5, p. 264-276, Sept.

APÊNDICE

Os equipamentos utilizados para as medições necessárias foram: dois multímetros modelo ET-2070 da Minipa, dois multímetros modelo ET-2700 da Minipa e um Varivolt monofásico da Sociedade Técnica Paulista S.A. modelo VM-215.

Os equipamentos utilizados para a utilização destes programas foram, um Pentium de 100 MHz , um Pentium MMX de 200MHz, e dois 486 DX4 - 100.