

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

Este exemplar encontra-se na redação final da tese
defendida por RENATO CRIVELLARI CREPPE

Julgadora em 17 06 92 aprovada pela Comissão

Prof. Dr. Carlos Rodrigues de Souza
Orientador

Departamento de Sistemas e Controle de Energia
UNICAMP

CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA CONVERSORES
ASSÍNCRONOS LINEARES : ANÁLISE
DA FORÇA PROPULSORA

Autor: RENATO CRIVELLARI / CREPPE n.º 63

Orientador: PROF. DR. CARLOS RODRIGUES DE SOUZA n.º 10

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica da Universidade Estadual de
Campinas, UNICAMP, como parte dos
requisitos exigidos para obtenção do
título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

JUNHO - 1992

BC 92115 16

A meus pais Carlos e Antonia

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Carlos Rodrigues de Souza pela profunda amizade, pela orientação e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Gílio Aluísio Simone pela ajuda constante, durante o desenvolver desta Tese.

Aos Professores do Departamento de Engenharia e Tecnologia Elétrica da FET - UNESP - Campus de Bauru, que tanto incentivaram na realização deste trabalho e, em especial, aos Professores Paulo José Amaral Serni, Ricardo M. Rodrigues, Edwin Avólio e José Ângelo Cagnon, que muito contribuíram para o sucesso alcançado.

Ao Supervisor de Laboratórios Milton de Freitas, pela ajuda nas montagens e auxílio na realização dos testes.

Ao Engenheiro José Alfredo Ulson pela montagem do protótipo e participação nos testes do mesmo.

A Marco Antônio Rossi, do Dep. de Engenharia e Tecnologia Elétrica da FET - UNESP - Campus de Bauru, pela arte.

RESUMO

A proposta desta Tese é estudar o funcionamento dos Conversores Assíncronos Lineares, através de um circuito elétrico equivalente que leve em conta todas as particularidades deste tipo de conversor.

O conversor é estudado a partir de um modelo matemático unidimensional que estabelece o comportamento da densidade de campo magnético no entreferro do mesmo, possibilitando a determinação de um fator para correção de efeito ligado ao comprimento finito de seu circuito magnético. Outros fatores de correção também são apresentados e comentados.

Os parâmetros do circuito elétrico são calculados segundo a teoria de projeto dos Conversores Rotativos e os fatores de correção estudados são inseridos neste circuito. Com este modelo, faz-se a simulação do funcionamento do conversor, através de uma rotina computacional desenvolvida para o cálculo da força propulsora, rendimento e fator de potência do conversor, os quais são comparados com resultados experimentais levantados em conversor linear existente no laboratório.

ABSTRACT

The objective of this Thesis is to study the performance of the Linear Induction Motors, by means of a electric equivalent circuit which take into account all phenomena involved with this family of machines.

To make possible the determination of a factor for correction of the effect due to the finite length of primary stack, the machine is studied through one-dimension model which present the behavior of the electromagnetic field in the air gap. Other correction factors are presented and discussed.

The electric circuit parameters are calculated using a model from rotary induction machines and the necessary corrections factors are inserted in the electric equivalent circuit. To simulate the machine performance a computational program is developed to calculate the thrust, efficiency and power factor and the results are compared with those obtained from tests of the prototype.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO

1.1 - Aspectos Gerais.....	1
1.2 - O Conversor Assíncrono Linear.....	2
1.3 - Topologia dos Conversores Assíncronos Lineares.....	4
1.4 - Proposta de Trabalho e Conteúdo dos Demais Capítulos.....	6

CAPÍTULO 2 : ANÁLISE UNIDIMENSIONAL DO CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR

2.1 - Introdução.....	8
2.2 - Modelo Unidimensional.....	8
2.3 - Densidade Linear de Corrente.....	10
2.4 - Densidade de Campo Magnético no Entreferro....	12
2.5 - Análise Densidade de Campo Magnético no Entreferro.....	20
2.6 - O Fator de Qualidade de Laithwaite.....	22
2.7 - O Fator de Qualidade Realístico.....	25

CAPÍTULO 3 : EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE E EFEITO TRANSVERSAL DE BORDA

3.1 - Introdução.....	27
3.2 - Efeito Transversal de Borda.....	29
3.3 - Efeito Longitudinal de Extremidade.....	34
3.4 - Número de Reynolds Magnético.....	39

**CAPÍTULO 4 - FATOR DE CORREÇÃO PARA O EFEITO LONGITUDINAL
DE EXTREMIDADE**

4.1 - Introdução.....	44
4.2 - Força Eletromotriz Induzida nos Condutores do estator.....	45
4.3 - Expressão das Forças Eletromotrizes.....	47
4.4 - Fator de Correção do Efeito Longitudinal de Extremidade.....	54
4.5 - Ângulo δ	55

**CAPÍTULO 5 : CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA CALs
CONSIDERANDO O EFEITO LONGITUDINAL DE
EXTREMIDADE**

5.1 - Introdução.....	62
5.2 - Circuito Elétrico Equivalente Tradicional.....	63
5.3 - Circuito Elétrico Equivalente para CALs.....	66
5.4 - Reatância de Dispersão do Linor.....	67
5.5 - Parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente... 69	
5.5.1 - Resistência do Enrolamento Estatórico.....	70
5.5.2 - Reatância de Dispersão do Estator.....	71
5.5.3 - Resistência Equivalente de Perdas no Ferro.....	74
5.5.4 - Reatância de Magnetização.....	76
5.5.5 - Resistência Equivalente do Linor.....	77
5.6 - Circuito Elétrico Equivalente para Dois Estatores Ativos.....	78
5.7 - Introdução do Efeito Longitudinal de Extremidade no Circuito Elétrico Equivalente.....	81
5.8 - Programa para Simulação Digital.....	84

**CAPÍTULO 6 : DESEMPENHO DO CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR
EM LABORATÓRIO**

6.1 - Introdução.....	91
6.2 - Alimentação com Corrente Eficaz Constante.....	94

6.3 - Bancada de Medição.....	95
6.4 - Resultados Experimentais.....	96
6.4.1 - Resultados dos Ensaios para Alimentação à Corrente Constante de 5,0 A.....	97
6.4.2 - Resultados dos Ensaios para Alimentação à Corrente Constante de 6,0 A.....	98
6.4.3 - Resultados dos Ensaios para Alimentação à Corrente Constante de 7,0 A.....	99
6.4.4 - Resultados dos Ensaios para Alimentação à Tensão Constante de 48 V.....	100
6.5 - Desempenho do Circuito Elétrico Equivalente Tradicional.....	101
6.6 - Desempenho do Circuito Elétrico Equivalente Considerando o Efeito Longitudinal de Extremidade.....	103
6.6.1 - Força Propulsora, Fator de Potência e Rendimento para Alimentação à Corrente Constante de 5,0 A.....	106
6.6.2 - Força Propulsora, Fator de Potência e Rendimento para Alimentação à Corrente Constante de 6,0 A.....	106
6.6.3 - Força Propulsora, Fator de Potência e Rendimento para Alimentação à Corrente Constante de 7,0 A.....	108
6.6.4 - Força Propulsora, Fator de Potência e Rendimento para Alimentação à Tensão Constante de 48,0 V.....	109
6.7 - Comentários.....	111
6.8 - Método Alternativo para Cálculo da Força Propulsora.....	112
6.8.1 - Comparação de Resultados.....	113

CAPÍTULO 7 : COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

7.1 - Introdução.....	115
-----------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
---------------------------------	-----

APÊNDICE I : CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR UTILIZADO PARA ENSAIOS	
AI.1 - Aspectos Gerais.....	122
AI.2 - Características.....	123
APÊNDICE II : CARACTERÍSTICAS DO CAL OBSERVADAS EM LABORATÓRIO	
AII.1 - Característica Magnética.....	125
AII.2 - Variação das Correntes com o Escorregamento.....	126
APÊNDICE III : DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE CAMPO B_1 E DO ÂNGULO δ COMO FUNÇÃO DO ESCORREGAMENTO	
AIII.1 - Introdução.....	131
AIII.2 - Equações.....	131
APÊNDICE IV : CÁLCULO DA FORÇA PROPULSORA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE FORÇA	
AIV.1 - Introdução.....	134
APÊNDICE V : VALORES OBTIDOS EM LABORATÓRIO	
AV.1 - Introdução.....	137
AV.2 - Tabelas.....	139
APÊNDICE VI : CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE UTILIZANDO OS ENSAIOS TRADICIONAIS	
AVI.1 - Introdução.....	147
AVI.2 - Ensaio em Vazio.....	148
AVI.3 - Ensaio com Rotor Bloqueado.....	149
AVI.4 - Cálculo dos Parâmetros do Circuito Tradicional.....	150

LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

- a_1 - distância entre os dentes do estator
 a_2 - largura interna da ranhura
→
 B - vetor densidade de campo magnético
 B_{av} - valor médio da densidade de campo magnético
 B_s - valor máximo da onda de densidade de fluxo na direção y
 B_1 - valor máximo da onda de densidade de fluxo de efeito extremidade de entrada
 b - onda de densidade de fluxo que viaja na direção y
 c - largura do estator
 c' - largura da lâmina linórica
→
 D - vetor densidade de fluxo elétrico
 d_f - densidade de corrente nos condutores do estator
→
 E - vetor campo elétrico
 E_s - valor máximo da fem induzida devido onda B_s
 E_1 - valor máximo da fem induzida devido onda B_1
 e_s - fem instantânea induzida devido onda B_s
 e_1 - fem instantânea induzida devido onda B_1
 F_{em} - força eletromotriz
 F_{mm} - força magnetomotriz
 f - frequência da fonte de alimentação
 f_e - fator de empacotamento do bloco estatórico
 f_x - força propulsora na direção do eixo x
 f_{xr} - força propulsora real na direção do eixo x
 G_e - fator de qualidade realístico
 G_l - fator de qualidade de Laithwaite
 g - entreferro mecânico
 g_o - entreferro corrigido a partir do Fator de Carter
→
 H - vetor intensidade de campo magnético
 h - espessura do linor
 h_c - altura da coroa do estator ativo

h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 - dimensões relativas à ranhura do estator
 I_F - corrente eficaz que circula por um condutor ativo
 I_1 - corrente de estator em valor eficaz, por fase
 I_{1max} - valor máximo da corrente de estator, por fase
 i_1 - corrente de primário instantânea
 \rightarrow
 J - vetor densidade de corrente
 J_s - densidade linear de corrente de um estator
 J_1, J_2 - densidade linear corrente de estator e linor, respect.
 j_1, j_2 - dens. linear corrente instantânea de estator e linor
 K_b - constante de proporcionalidade temporal
 k - constante de propagação da onda normal
 k_c - fator de Carter
 k_{ce} - fator de encurtamento do enrolamento para a onda B_1
 k_{de} - fator de distribuição de enrolamento para onda B_1
 k_e - fator de correção do Efeito Longitudinal de Extremidade
 k_s - fator de correção do Efeito Transversal de Borda
 k_w - fator de enrolamento
 k_{we} - fator de enrolamento para a onda B_1
 L - comprimento do bloco do estator
 l_{cb} - comprimento dos condutores na região da "cabeça de bobina"
 l_m - comprimento médio de um condutor ativo
 l_1 - comprimento dos condutores de estator por fase
 m - número de fases
 N_f - número de condutores ativos por estator e por fase
 N_{fp} - número espiras por pólo/por fase/por estator para a onda B_1
 N_{rm} - número de Reynolds magnético
 N_s - número de espiras por estator e por fase
 p - número de pólos
 q - número de ranhuras por pólo e por fase
 R_l - relutância magnética
 R_M - resistência associada as perdas no ferro
 R_s - resistência elétrica
 R_1 - resistência dos condutores de um estator
 R'_2 - resistência do linor observada do estator
 S_1 - Área dos condutores de estator
 s - escorregamento
 t - tempo

tb - passo de bobina
tp - passo polar
tpe - passo polar da onda de efeito de extremidade
tpa - relação entre os passos polares tp e tpe
Ve - velocidade de translação da onda de extremidade
Vol - volume de ferro do estator
Vrx - velocidade de deslocamento do linor
Vsx - velocidade síncrona do conversor
Xd - reatância de dispersão diferencial
Xf - reatância de dispersão de cabeça de bobinas
Xm - reatância de magnetização
Xr - reatância de dispersão na região das ranhuras
Xs - reatância de dispersão do estator
WF - perdas no ferro por fase
x, y, z - sistema cartesiano de coordenadas
 α_1 - comprimento de penetração da onda de extremidade de entrada
 α_2 - comprimento de penetração da onda de extremidade de saída
 γ_F - peso específico do ferro
 δ - ângulo entre onda normal e a onda de efeito de extremidade
 δ_1 - profundidade de penetração do campo magnético no estator
 δ_s - ângulo de fase da onda b
 δ_1, δ_2 - ângulo de fase onda $b_1(x,t)$ e $b_2(x,t)$, respectivamente.
 ϵ_x - constante proporcional à razão largura estator/passos polares
 ϵ_y - constante proporcional à razão aba do linor/passos polares
 η_R - rendimento real do conversor
 η_T - rendimento teórico do conversor
 λ_r - permeância específica de ranhura
 λ_s - permeância específica do circuito frontal das bobinas
 λ_t - permeância diferencial
 μ_0 - permeabilidade magnética do vácuo (\cong ar)
 ρ_c - resistividade superficial do linor corrigida
 ρ_r - resistividade superficial do linor
 ρ_v - resistividade volumétrica do linor
 ρ_1 - resistividade dos condutores do estator
 σ - condutibilidade
 Φ - Fluxo por pólo
 ω - frequência angular da fonte de alimentação
 ω_F - perda específica do ferro

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - ASPECTOS GERAIS

O interesse pela construção de conversores apresentando movimento de translação é, provavelmente, contemporâneo à invenção da máquina girante por Tesla e Ferraris. Relatos indicam a existência de um sistema para o transporte de bagagens experimentado nos E.U.A., por volta de 1891.

No começo do século, um grupo de pesquisadores iniciou um trabalho sobre um sistema de propulsão para transporte ferroviário que atualmente volta a ser experimentado. Nesse sistema, abaixo de cada carro da composição, era colocado um secundário feito de material condutor e um núcleo magnético. Nos trilhos eram dispostos alguns primários de forma tal que a distância entre eles fosse menor que o comprimento do secundário, para que sempre existisse a possibilidade de se partir o trem, não importando o local onde houvesse parado. Em locais com aclives acentuados, os primários eram colocados mais próximos, para fornecer maior potência.

Outros relatos são encontrados em diversos tipos de aplicação, inclusive sistemas lançadores de aeronaves embarcadas em porta-aviões, desenvolvidos pela marinha americana.

Atualmente, existem sistemas de transporte coletivo em

operação comercial, com capacidade de transporte de 20.000 passageiros por hora, no Canadá. Neste sistema, veículos com capacidade para 70 pessoas se deslocam com velocidades de 70 km/h com elevado nível de segurança e conforto (menor ruído e vibração), superiores aos sistemas tradicionais.

Um sistema metroviário, propulsionado por conversores lineares, também encontra-se em instalação na região metropolitana de Tóquio (Shinjuko Line). Nesta linha, os túneis apresentam um diâmetro 30 % menor que as demais linhas, devido a redução na altura dos carros, pois, o motor colocado sob estes, possui uma altura menor que a dos motores rotativos, reduzindo sensivelmente os custos de construção.

No Brasil, poucos estudos foram realizados no campo dos conversores assíncronos lineares. As pesquisas realizadas resultaram em teses e foram apresentadas pelos professores Delio Pereira Guerrini, da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Aurio Gilberto Falcone, da Escola Politécnica - USP e Gilio Aluisio Simone, da Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP.

1.2 - O CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR (CAL)

A designação "linear" utilizada neste trabalho, está ligada à forma construtiva destes conversores e não ao seu comportamento magnético. Contudo, dada a existência de grandes entreferros, os mesmos podem ser estudados como magnéticamente lineares. Apesar deste trabalho ter se limitado a observação da operação como motor, a terminologia "conversor" foi utilizada para caracterizar a capacidade dos mesmos de operarem tanto como

motores, quanto como geradores.

Os conversores assíncronos lineares representam apenas uma família das máquinas lineares, existindo também os conversores síncronos e de corrente contínua lineares. Porém, de forma semelhante aos conversores rotativos, a utilização dos conversores assíncronos (ou de indução) lineares é a que mais interesse tem despertado para aplicações onde o movimento translacional é requerido.

Quando se compara o desempenho dos conversores assíncronos rotativos e lineares, o rendimento normalmente é utilizado como elemento de consagração dos rotativos e descrédito dos lineares. Porém, para aplicações específicas, pode-se citar algumas características que estimulam sua utilização:

- i) Devido a sua construção robusta e simples, exigem pouca manutenção e oferecem elevada confiabilidade;
- ii) Não necessitam de engrenagens e sistemas mecânicos para efetuar conversão de movimento rotativo em linear;
- iii) Redução acentuada de ruídos e vibrações devido a simplificação da ligação mecânica entre primário e secundário;
- iv) Total independência da aderência entre roda e trilho e redução da altura dos veículos em sistemas de propulsão para transporte ferroviário;

v) Possibilidade de controle de velocidade e força através da alimentação por sistemas eletrônicos (inversores).

1.3 - TOPOLOGIA DOS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

Os CALs podem ser construídos, de acordo com as particularidades de cada aplicação, de formas diferentes, dando origem a uma série de filosofias de construção, tanto de seu estator quanto de seu rotor, ou melhor, seu "LINOR", seguindo assim, a sugestão do professor E. R. Laithwaite, que aplica ao secundário dos conversores assíncronos lineares o termo "linor", de forma a melhor caracterizar o tipo de movimento desenvolvido.

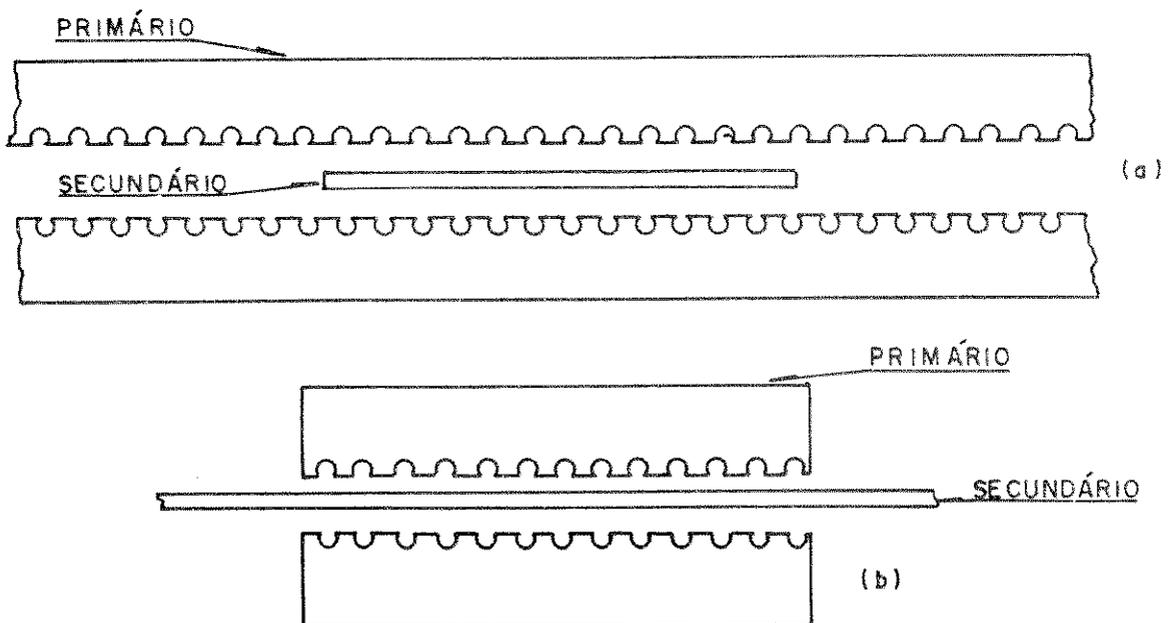


Figura 1.1 - CAL dotado de dois estatores ativos

(a) estator longo (b) estator curto

Quanto ao comprimento de estator e linor os CALs podem ser de duas modelagens: estator curto e linor longo e estator longo e linor curto. A Figura 1.1 mostra as duas possibilidades, para a situação em que os dois estatores são dotados de enrolamentos (ativos).

O linor dos CALs normalmente é construído com lâmina de material de boa condutibilidade, como o cobre, o alumínio e o ferro, ou mesmo, como uma composição de dois deles (base de ferro e capa de alumínio), sendo que, neste caso o CAL é dotado de apenas um estator (curto e móvel), ficando o ferro do linor como caminho de fechamento para as linhas de campo magnético.

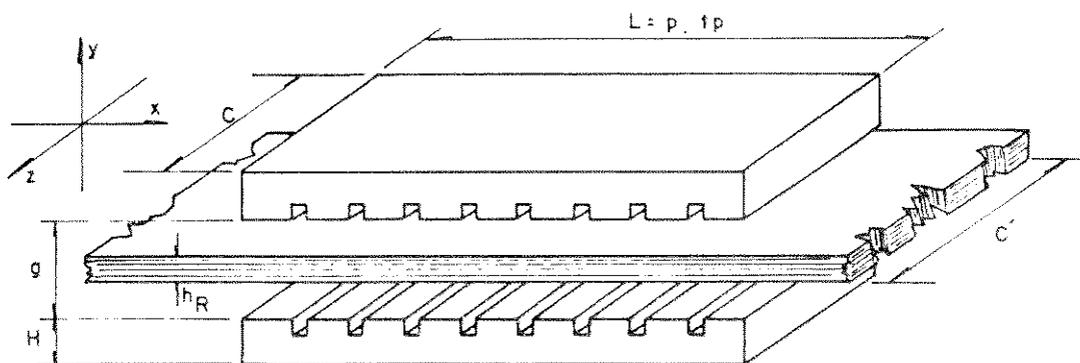


Figura 1.2 - CAL com dois estatores ativos (curtos), e linor de alumínio

O CAL de estator curto e linor longo, construído com uma simples lâmina de material condutor (alumínio), requer uma quantidade de material muito menor para sua implementação que outras modelagens, com a vantagem de oferecer os mais elevados rendimentos e a produção de pequenas forças normais entre os estatores. Assim, esta modelagem, mostrada na Figura 1.2, será a

utilizada para as análises matemáticas e levantamentos experimentais.

1.4 - PROPOSTA DE TRABALHO E CONTEÚDO DOS DEMAIS CAPÍTULOS

Esta dissertação tem por objetivo o estudo dos conversores assíncronos lineares através de um circuito elétrico equivalente, semelhante aos utilizados para o estudo dos conversores rotativos, considerando o comprimento finito de seus estatores, de forma que se possa melhor observar as diferenças entre este tipo de conversor e os rotativos.

A força propulsora desenvolvida pelo conversor assíncrono linear, seu rendimento e fator de potência são características que se deseja obter a partir do circuito elétrico equivalente, para confrontação com medições correspondentes efetivadas em máquina disponível em laboratório.

O desenvolvimento analítico, apresentados nos capítulos seguintes, destina-se a considerar todos efeitos físicos do conversor assíncrono linear que possuem importância essencial para a obtenção dos parâmetros deste circuito. Quando não se incorpora ao circuito equivalente estes efeitos, o circuito obtido não é um bom modelo para o conversor assíncrono linear.

O circuito elétrico equivalente apresentado como alternativa para o estudo dos conversores assíncronos lineares, de estator curto e linor longo de alumínio, reúne trabalhos e estudos de diferentes pesquisadores sobre as características físicas e a modelagem deste tipo de conversor, resultando em um circuito elétrico equivalente muito semelhante

ao utilizado para os conversores rotativos.

No Capítulo 2 apresenta-se o modelamento matemático dos CALs utilizando a Teoria Unidimensional, observando-se o comportamento da densidade de campo magnético no entreferro e introduzindo-se o conceito de Fator de Qualidade.

No Capítulo 3, são analisados os Efeitos de Extremidades, o fator de correção para o Efeito Transversal de Borda e o Número de Reynolds Magnético.

No Capítulo 4 é apresentado o fator para correção do Efeito Longitudinal de Extremidade a partir das forças eletromotrizes induzidas nos enrolamentos e o comportamento do ângulo entre as ondas de campo magnético.

No Capítulo 5, é construído o circuito elétrico equivalente para os CALs, com o cálculo dos parâmetros e a correção dos efeitos de extremidades. Características da rotina computacional desenvolvida são apresentadas e sua operação é mostrada através de fluxograma.

No Capítulo 6, são apresentados resultados experimentais, obtidos em laboratório, os quais são comparados com resultados correspondentes obtidos pelo circuito elétrico equivalente. Os resultados obtidos com o circuito elétrico equivalente também são comparados com outra técnica de análise.

No Capítulo 7, são feitas análises, comentários e proposição para trabalhos futuros.

Nos apêndices, além de dados experimentais, são apresentadas características do CAL construído em laboratório, equacionamentos auxiliares para a determinação da força propulsora e característica magnética do conversor.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE UNIDIMENSIONAL DO CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR

2.1 - INTRODUÇÃO

A análise dos Conversores Assíncronos Lineares (CALs) pode ser feita através de modelos uni, bi ou tridimensional. A referência [1], estudou as diversas possibilidades e constatou, a partir de testes em protótipos, que para certas finalidades, existem modelos que melhor se adaptam. O modelo unidimensional adapta-se muito bem para o estudo dos CALs na direção longitudinal, explicando convenientemente o comportamento da densidade de fluxo magnético ao longo da direção de deslocamento da lâmina linórica.

Neste Capítulo far-se-á um estudo do comportamento da densidade de campo magnético ao longo do eixo x , que é tomado como o eixo de translação do conversor, assim como o estudo do fator de qualidade, na sua proposta original, feita por E. R. Laithwaite [5]. No Capítulo 3, voltarse-á a analisar o fator de qualidade considerando o Efeito Transversal de Borda.

2.2 - MODELO UNIDIMENSIONAL

Para a análise unidimensional do conversor assíncrono

linear, algumas hipóteses iniciais são necessárias:

i) os núcleos dos indutores são construídos de forma a apresentar uma elevada resistência elétrica (núcleos laminados) e uma elevada permeabilidade magnética, sendo que, para algumas demonstrações, esta será considerada como infinita;

ii) o circuito magnético opera livre de saturação, em face à grande espessura do entreferro (g);

iii) as correntes primárias são representadas por duas lâminas de corrente que circulam somente na direção z (Figura 2.1), e tem comportamento senoidal;

iv) a onda de força magnetomotriz se translada na direção de movimento da lâmina linórica (direção x);

v) a lâmina linórica de comprimento muito grande e proporcionalmente muito fina (h), apresenta correntes induzidas que circulam somente na direção z , possuindo permeabilidade magnética semelhante a do ar (μ_0);

vi) a profundidade do núcleo de ferro na direção z é tomada como unitária (1 metro);

vii) a densidade de campo magnético é função de x e de t (tempo) e está orientada na direção y .

A Figura 2.1 mostra, em vista longitudinal, o modelo do conversor estudado.

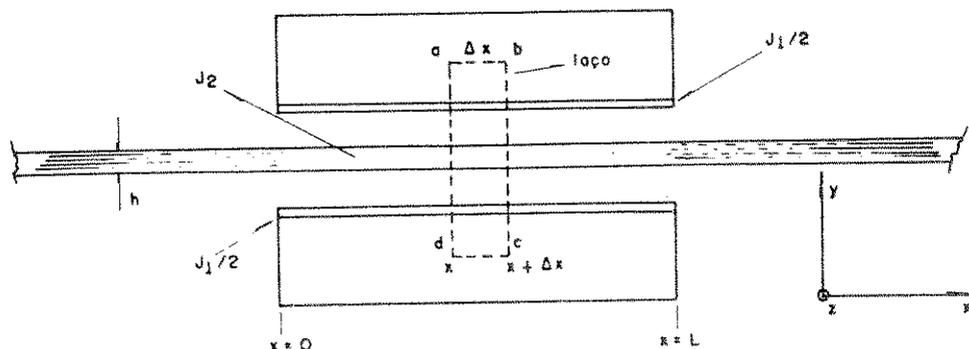


Figura 2.1 - Vista Lateral do Conversor Assíncrono Linear (CAL)

2.3 - DENSIDADE LINEAR DE CORRENTE

Os CALs são dotados, em sua maioria, de enrolamentos trifásicos inseridos em ranhuras dispostas ao longo da superfície do estator. A corrente nos enrolamentos, fica distribuída, de forma discreta, em condutores concentrados nessas ranhuras.

No estudo das máquinas elétricas, os enrolamentos trifásicos de estator podem ser substituídos por lâminas fictícias de corrente, onde a distribuição de corrente se manifesta de forma contínua pela superfície do estator. Teoricamente, a lâmina de corrente deve produzir onda fundamental de força magnetomotriz semelhante àquela que seria observada no conversor dotado de ranhuras.

O conceito de lâmina de corrente tem se mostrado muito útil no estudo dos CALs, sendo adotado por diversos pesquisadores em seus trabalhos. Adota-se, para a onda fundamental de densidade

linear de corrente do estator que se desloca na direção positiva do eixo x, a seguinte expressão [1][3]:

$$j_x = J_{MAX} \cdot \cos(\omega t - k \cdot x) \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), J_{MAX} é o valor máximo da densidade linear de corrente, em ampéres por metro, ω a frequência angular da fonte de alimentação e k a constante de propagação da onda, dada por:

$$k = \frac{\pi}{t_p} \quad (2.2)$$

O valor máximo da densidade linear de corrente para cada estator do CAL mostrado na Figura 2.1, é expresso por:

$$J_{SMAX} = \frac{J_{MAX}}{2} \quad (2.3)$$

$$J_{SMAX} = \frac{3 \cdot N_f \cdot I_{FMAX} \cdot K_w}{p \cdot t_p} \quad (2.4)$$

onde p é o número de pólos do estator, t_p o comprimento do passo polar do conversor (m), k_w o fator de enrolamento, I_{FMAX} o valor máximo da corrente que circula pelos condutores estatóricos e N_f o número de 'condutores ativos' por estator e por fase, que é igual ao dobro do número de espiras por estator e por fase (N_s).

$$N_f = 2 \cdot N_s \quad (2.5)$$

Quando a corrente que circula pelos condutores do

estator é tomada em seu valor eficaz, a densidade linear de corrente, agora em valor eficaz, em ampéres por metro, é expressa por:

$$J_s = \frac{3 \cdot N_f \cdot I_F \cdot K_w}{p \cdot t_p} \quad (2.6)$$

com

$$I_F = \frac{I_{FMAX}}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

Observa-se que a equação (2.6) apresenta a densidade linear de corrente, ou 'lâmina de corrente' para um conversor trifásico. Para um conversor de m fases a densidade linear de corrente será expressa, por:

$$J_s = \frac{m \cdot N_f \cdot I_F \cdot K_w}{p \cdot t_p} \quad (2.8)$$

2.4 - DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO

A Lei de Ampère, em sua forma diferencial, aplicada ao laço fictício praticado no conversor da Figura 2.1, fornece:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.9)$$

Como as frequências de operação dos CALs são relativamente pequenas, as correntes de deslocamento podem ser

desprezadas, e:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.10)$$

Desenvolve-se o rotacional aplicado à intensidade de campo, admitindo-se as hipóteses:

i) A densidade de campo magnético terá somente componente na direção do eixo y;

ii) A espessura do entreferro é tal que toda energia, na forma de um campo magnético, está ali armazenada.

Como resultado, a equação (2.10) pode ser escrita na forma:

$$\left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right] \vec{x} + \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] \vec{y} + \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right] \vec{z} = \left[\frac{J_1 + J_2}{g} \right] \vec{z} \quad (2.11)$$

onde J_1 e J_2 representam densidades lineares de corrente de primário e secundário (A/m), respectivamente, e g é a espessura do entreferro.

Respeitadas as hipóteses propostas, a intensidade de campo magnético na direção y será:

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \frac{J_1 + J_2}{g} \quad (2.12)$$

Definindo-se $b(x,t) = b$, como a densidade de campo magnético presente na direção y , função do deslocamento e do tempo, escreve-se:

$$\mu_0 = \frac{b(x,t)}{H_y} = \frac{b}{H_y} \quad (2.13a)$$

onde

$$H_y = \frac{b}{\mu_0} \quad (2.13b)$$

$$\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\partial b}{\partial x} = J_x + J_z \quad (2.13c)$$

Aplicando a Lei de Faraday, em sua forma diferencial, ao laço mostrado na Figura 2.1:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial b}{\partial t} \quad (2.14)$$

Desenvolvendo-se o rotacional aplicado ao vetor campo elétrico, obtém-se:

$$\left[\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right] \vec{x} + \left[\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right] \vec{y} + \left[\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right] \vec{z} = \left[- \frac{\partial b}{\partial t} \right] \vec{y} \quad (2.15)$$

Como o campo elétrico somente possui componente na direção z , resulta:

$$- \frac{\partial E_z}{\partial x} = - \frac{\partial b}{\partial t} \quad (2.16)$$

O primeiro membro da equação (2.16) pode ser trabalhado, pois b é uma função das variáveis x e t .

$$-\frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{\partial b}{\partial t} \cdot \frac{dt}{dt} - \frac{\partial b}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (2.17)$$

A derivada de x em relação ao tempo, na equação (2.17), representa a velocidade da lâmina secundária do conversor (V_{rx}).

$$-\frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{\partial b}{\partial t} - \frac{\partial b}{\partial x} \cdot V_{rx} \quad (2.18)$$

As equações (2.13c) e (2.17) podem ser operadas e agrupadas. Para isso, a densidade linear de corrente J_z , na equação (2.13c), pode ser explicitada:

$$E_z = \rho_r \cdot J_z \quad (2.19a)$$

$$J_z = \frac{E_z}{\rho_r} \quad (2.19b)$$

sendo:

$$\rho_r = \frac{\rho_v}{h} \quad (2.20)$$

A resistividade superficial da lâmina móvel (ρ_r) é determinada a partir da relação entre a resistividade volumétrica da mesma (ρ_v) e sua espessura (h). Desta forma, obtém-se:

$$\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\partial b}{\partial x} = J_z + \frac{E_z}{\rho_r} \quad (2.21)$$

ou

$$E_z = \rho_r \cdot \frac{g}{\mu_0} \frac{\partial b}{\partial x} - \rho_r \cdot J_x \quad (2.22)$$

Derivando-se a intensidade de campo elétrico E_z , em relação a x , encontra-se:

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \rho_r \cdot \frac{g}{\mu_0} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \rho_r \cdot \frac{\partial J_x}{\partial x} \quad (2.23)$$

Comparando-se as equações (2.18) e (2.23), obtém-se:

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial b}{\partial x} \cdot v_{rx} = \rho_r \cdot \frac{g}{\mu_0} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \rho_r \cdot \frac{\partial J_x}{\partial x} \quad (2.24)$$

$$\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \frac{v_{rx}}{\rho_r} \cdot \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_r} \cdot \frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\partial J_x}{\partial x} \quad (2.25)$$

A equação (2.25) descreve o comportamento da onda de densidade de campo magnético no entreferro do CAL mostrado na Figura 2.1. O terceiro termo do primeiro membro da equação (2.25) é uma derivada de $b(x,t)$ em relação ao tempo, diferindo-se dos outros termos. Portanto, para trazer a necessária homogeneidade, procede-se modificações neste termo. Sendo a solução particular da equação (2.25) do tipo:

$$b_s(x,t) = B_s \cdot \cos(\omega t - k \cdot x + \delta_s) \quad (2.26)$$

ou

$$b_s(x,t) = B_s \operatorname{Re} \left(e^{j\omega t} \cdot e^{-j(k \cdot x - \delta_s)} \right) \quad (2.27)$$

Inserindo-se as equações (2.5) e (2.26) na equação (2.25), obtém-se os valores de B_s e δ_s :

$$B_s = \frac{J_k}{\left[\left[\frac{\pi \cdot g}{t_p \cdot \mu_0} \right]^2 + \left[\frac{1}{\rho_r} \cdot (s \cdot V_{sx}) \right]^2 \right]^{1/2}} \quad (2.28)$$

$$\operatorname{tg}(\delta_s) = \frac{\pi \cdot \rho_r \cdot g}{\mu_0 \cdot t_p \cdot (s \cdot V_{sx})} \quad (2.29)$$

sendo V_{sx} a velocidade linear síncrona da densidade de campo magnético no entreferro e s o escorregamento.

A equação (2.28) permite determinar a densidade de campo magnético no entreferro de CALs operando com dois estatores dotados de enrolamentos (ativos). Nesta equação, observa-se que a densidade de campo magnético varia com o escorregamento, apresentando valores máximos para o conversor operando em velocidade síncrona ($s = 0$) e valores mínimos para o conversor bloqueado ($s = 1$).

Derivando-se $b(x,t)$, escrita na forma exponencial - equação (2.27) - em relação ao tempo, resulta:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = j \cdot \omega \cdot b \quad (2.30)$$

A equação (2.30) aplicada em (2.25), leva a uma equação diferencial de segunda ordem, não homogênea, a coeficientes constantes, do tipo:

$$\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \frac{V_{rx}}{\rho r} \cdot \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{1}{\rho r} \cdot j\omega \cdot b = \frac{\partial J_1}{\partial x} \quad (2.31)$$

A equação homogênea de (2.31), tem como raízes:

$$k_1, k_2 = \frac{\mu_0 \cdot V_{rx}}{2 \cdot g \cdot \rho r} \pm \frac{1}{2} \left[\left[\frac{\mu_0 \cdot V_{rx}}{g \cdot \rho r} \right]^2 + j \cdot \frac{4 \cdot \omega \cdot \mu_0}{g \cdot \rho r} \right]^{1/2} \quad (2.32)$$

O segundo termo do segundo membro da equação (2.32), uma raiz de número complexo, pode ser analisado separadamente, de forma a obter-se a parte real e imaginária do mesmo:

$$M + j \cdot N = \left[\left[\frac{\mu_0 \cdot V_{rx}}{g \cdot \rho r} \right]^2 + j \cdot \frac{4 \cdot \omega \cdot \mu_0}{g \cdot \rho r} \right]^{1/2} \quad (2.33)$$

Os termos M e N da equação (2.33) são números reais e, juntamente com (2.31), conduzem a:

$$k_1 = \frac{\mu_0 \cdot V_{rx} - \rho r \cdot g \cdot M}{2 \cdot \rho r \cdot g} - j \cdot \frac{N}{2} = -\frac{1}{\alpha_1} - j \cdot \frac{\pi}{t_{pe}} \quad (2.34)$$

$$k_2 = \frac{\mu_0 \cdot V_{rx} + \rho r \cdot g \cdot M}{2 \cdot \rho r \cdot g} + j \cdot \frac{N}{2} = \frac{1}{\alpha_2} + j \cdot \frac{\pi}{t_{pe}} \quad (2.35)$$

Observando-se as igualdades propostas em (2.34) e

(2.35) encontra-se:

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot pr \cdot g}{pr \cdot g \cdot M - \mu_0 \cdot Vrx} \quad (2.36)$$

$$\alpha_2 = \frac{2 \cdot pr \cdot g}{pr \cdot g \cdot M + \mu_0 \cdot Vrx} \quad (2.37)$$

$$tpe = \frac{2 \cdot \pi}{N} \quad (2.38)$$

Os termos α_1 , α_2 e tpe são todos positivos e conduzem a expressão final da onda de densidade de campo magnético que se translada pelo entreferro do CAL com velocidade síncrona Vsx . De acordo com S. Yamamura [1], a solução geral para $b(x,t)$, na equação (2.31), é:

$$\begin{aligned} b(x,t) = & B_s \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\pi \cdot x}{tp} + \delta_s\right] + \\ & + B_1 \cdot \exp\left[-\frac{x}{\alpha_1}\right] \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\pi \cdot x}{tpe} + \delta_1\right] + \\ & + B_2 \cdot \exp\left[\frac{x}{\alpha_2}\right] \cdot \cos\left[\omega t + \frac{\pi \cdot x}{tpe} + \delta_2\right] \quad (2.39) \end{aligned}$$

A equação (2.39) mostra o comportamento da densidade de campo magnético no entreferro do CAL e é composta por três ondas. A primeira, de comprimento $2 \cdot tp$, representa a onda normal de campo magnético. A segunda, de comprimento $2 \cdot tpe$, com uma constante de atenuação $1/\alpha_1$, viaja no mesmo sentido e possui a mesma frequência angular da onda normal de campo magnético e

representa o efeito longitudinal de extremidade de entrada. A terceira onda, também de comprimento $2.t_{pe}$, com uma constante de atenuação $1/\alpha^2$, possui a mesma frequência angular da onda normal, porém viaja em sentido contrário à primeira, e caracteriza o efeito longitudinal de extremidade de saída. As amplitudes B_1 e B_2 são determinadas a partir de condições de contorno.

O passo polar das ondas de efeito de extremidade (t_{pe}) é função do ponto de operação do CAL, ou seja, função do escorregamento, e sua variação pode ser observada na Figura 2.2.

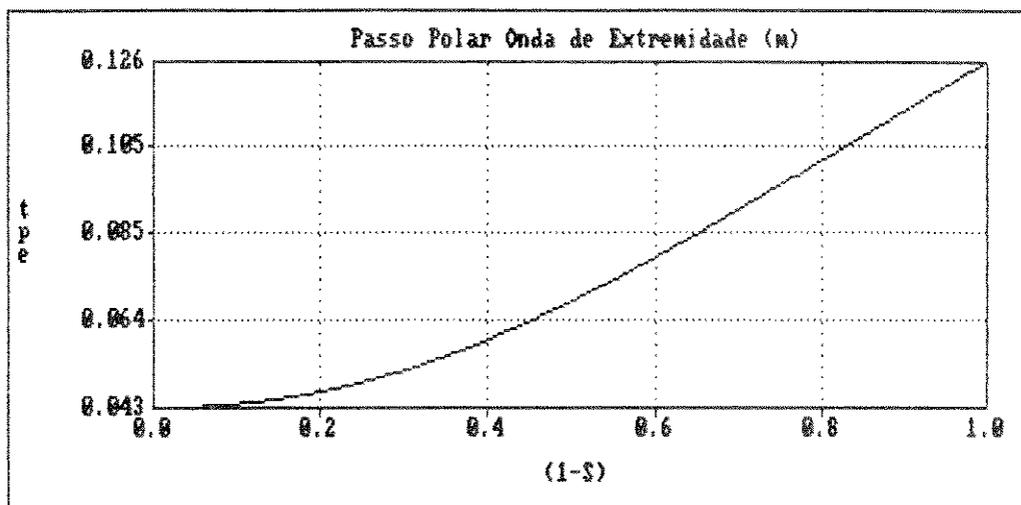


Figura 2.2 - Comportamento de t_{pe} em função do escorregamento (motor Apênd. I)

2.5 - ANÁLISE DA DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO

O segundo e o terceiro termos do segundo membro da equação (2.39) representam as distorções de campo provocadas pela descontinuidade dos blocos estáticos. Sendo que a onda $b_1(x,t)$ representa a distorção provocada pelo efeito longitudinal de

extremidade de entrada e a onda $b_2(x,t)$ pelo efeito longitudinal de extremidade de saída. Observa-se, que além de viajarem em sentidos contrários, as mesmas são amortecidas por constantes diferentes.

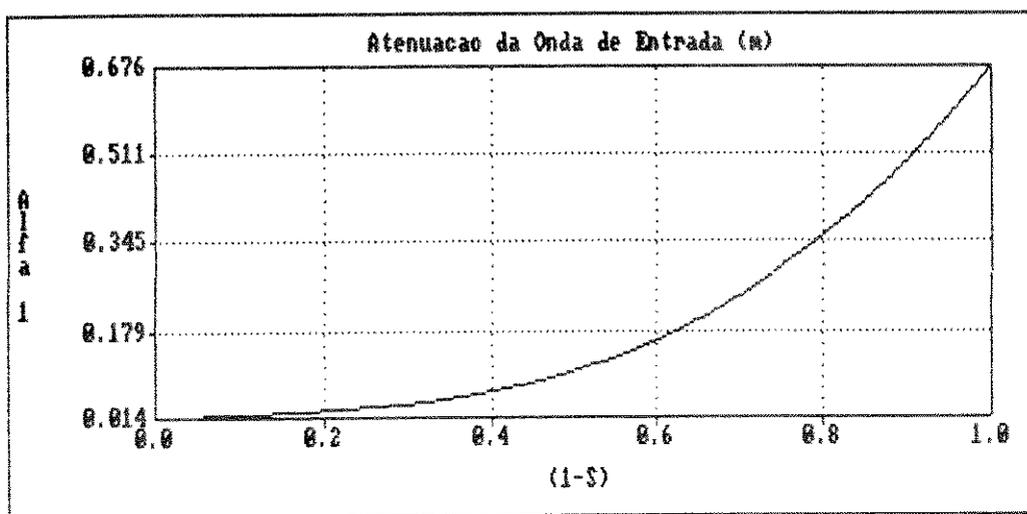


Figura 2.3 - Comprimento de Penetração α_1 (CAL Apênd. I)

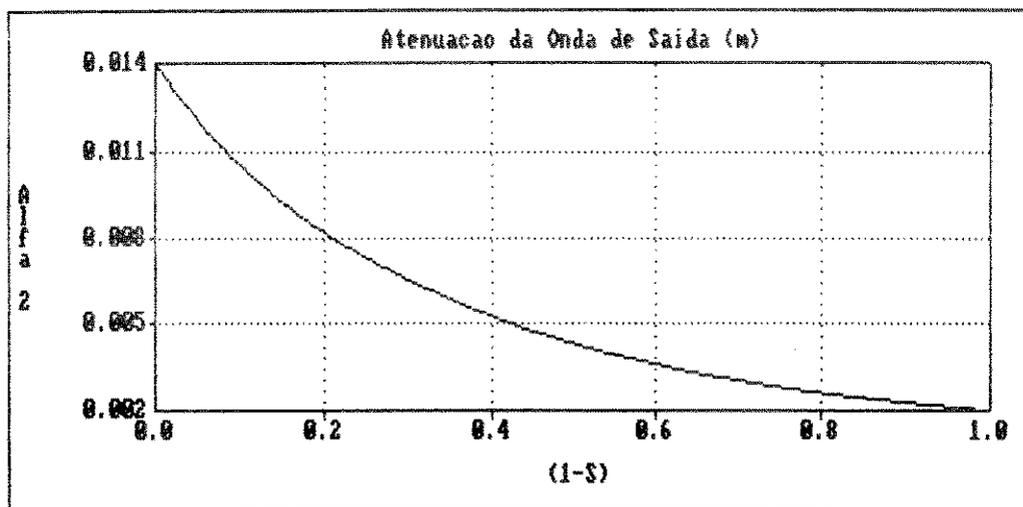


Figura 2.4 - Comprimento de Penetração α_2 (CAL Apênd. I)

Uma análise dos gráficos de α_1 e α_2 mostra que α_1

assume valores muito superiores a α_2 . Deste modo, o comprimento de penetração da onda longitudinal de extremidade de entrada é muitas vezes superior ao da onda longitudinal de extremidade de saída. Desta forma, a onda de extremidade de entrada atua em um comprimento muito grande do conversor assíncrono linear, enquanto que a atuação da onda longitudinal de extremidade de saída fica restrita a regiões muito próximas ao final dos blocos estatóricos. Devido a pequena influência desta segunda onda, a equação (2.39) pode admitir como expressão:

$$b(x,t) = B_s \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi \cdot x}{t_p} + \delta_s\right) + B_1 \cdot \exp\left[-\frac{x}{\alpha_1}\right] \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi \cdot x}{t_{pe}} + \delta_1\right) \quad (2.40)$$

Através da equação (2.40), observa-se que o efeito longitudinal de extremidade de entrada é reponsável pela maior alteração nas características da densidade de campo magnético no entreferro do CAL [1][2][3][4]. Uma análise deste efeito é primordial para o conhecimento da máquina.

2.6 - O FATOR DE QUALIDADE DE LAITHWAITE (G1)

Observando as equações de campo do conversor assíncrono linear, nota-se que seu comportamento está ligado a variáveis características importantes, tais como resistividade da lâmina linórica, espessura do entreferro, passo polar e frequência da

fonte de alimentação. Sendo que, todo o comportamento da máquina, é sensivelmente alterado quando um destes parâmetros é modificado. Desta forma, pode-se caracterizar ou qualificar um CAL através destes parâmetros.

O Fator de Qualidade (G1), proposto por E. R. Laithwaite [5], visa qualificar os sistemas conversores eletromagnéticos com base na observação de suas características elétricas e magnéticas.

A princípio, algumas propriedades, tais como o rendimento, podem levar a uma classificação dos CALs, que é objetivo a ser alcançado. No entanto, máquinas com idênticos rendimentos podem, por exemplo, apresentar tamanhos e custos diferentes, levando a uma incerteza quanto às suas 'qualidades'.

Como toda máquina elétrica pode ser analisada como a interligação de um circuito elétrico e de um circuito magnético e para cada máquina, com maior ou menor complexidade, pode-se expressar a qualidade da mesma através de elementos que qualifiquem os dois circuitos. O melhor circuito elétrico produz a maior corrente para uma dada força eletromotriz e o melhor circuito magnético, produz o maior fluxo para uma dada força magnetomotriz, aplicadas.

A Figura 2.5 mostra a interligação que se estabelece entre fluxo-fem e corrente-Fmm e, portanto, a interligação dos circuitos elétrico e magnético, através da corrente e do fluxo, sendo que o produto destas duas grandezas é responsável pela força nos conversores eletromecânicos de energia. O fator de qualidade (G1), está ligado à resistência e à relutância dos circuitos acoplados.

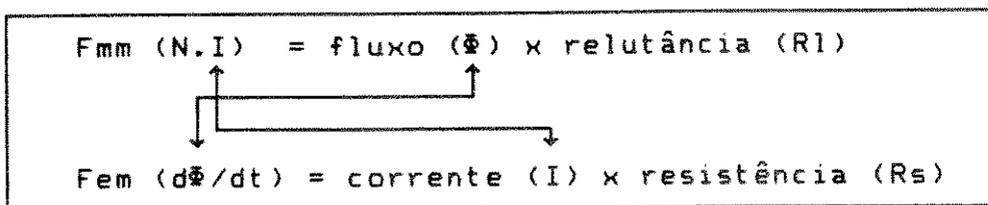


Figura 2.5 - Relação entre Circuito Elétrico e Circuito Magnético nos CALs

A equação (2.41), mostra a forma mais ampla do fator de qualidade:

$$G_l = k_b \cdot \frac{1}{R_l \cdot R_s} \quad (2.41)$$

O produto da resistência (R_s) pela relutância (R_l) na equação (2.41), possui dimensão de tempo. O fator de proporcionalidade k_b deve possuir dimensão de tempo, de forma a resultar um fator G_l adimensional. O fator de proporcionalidade natural para as máquinas que operam em corrente alternada, é a frequência angular (ω).

$$G_l = \frac{\omega}{R_l \cdot R_s} \quad (2.42)$$

A equação (2.42), particularizada para um conversor assíncrono linear de passo polar t_p , entreferro g , resistividade superficial da lâmina laminada ρ_r e frequência angular ω , resulta:

$$G_l = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot \omega}{\pi^2 \cdot \rho_r \cdot g} \quad (2.43)$$

A equação (2.43) permite observar que o fator de qualidade é diretamente proporcional à frequência do sinal de alimentação ($\omega = 2\pi.f$) e do quadrado do passo polar e inversamente proporcional ao comprimento do entreferro e a resistividade da lâmina linórica.

2.7 - O FATOR DE QUALIDADE REALÍSTICO (Ge)

O Fator de Qualidade proposto em (2.43), apesar de sua utilidade na análise dos CALs, não considera um importante fenômeno, característico destes conversores, denominado Efeito Transversal de Borda.

A presença do Efeito Transversal de Borda nos conversores assíncronos lineares é responsável por uma não uniformidade na distribuição de correntes na lâmina linórica. Essa não uniformidade provoca um aumento na resistividade da lâmina e uma redução na força propulsora.

O Efeito Transversal de Borda, analisado por diversos autores [7][9][10], normalmente é levado em conta através de fatores que modificam a resistividade linórica, como será observado no Capítulo 3. Desta forma, admitindo-se que a resistividade linórica corrigida, seja representada por ρ_{rc} , vem:

$$\rho_{rc} = \frac{\rho_r}{k_s} \quad (2.44)$$

onde k_s é o fator de correção do Efeito Transversal de Borda.

O fator k_s , modificando a resistividade da lâmina

linórica, provocará uma redução no fator de qualidade (G1) e, como se observará, levará a um comportamento do modelo matemático mais próximo do modelo real.

O fator de qualidade realístico [8], agora considerando o Efeito Transversal de Borda, é nominado por G_e e calculado, por:

$$G_e = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot \omega}{\pi^2 \cdot \rho r c \cdot g} \quad (2.45)$$

Pode-se introduzir no estudo do fator de qualidade, outros fatores [8], para representar a atuação de fenômenos como o Efeito Pelicular e o efeito da presença de ranhuras no bloco do estator, levado em conta através do 'Fator de Carter'.

CAPÍTULO 3

EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE E EFEITO TRANSVERSAL DE BORDA

3.1 - INTRODUÇÃO

Os CALs diferenciam-se dos conversores assíncronos rotativos, por apresentarem entreferro relativamente maior e, principalmente, devido aos efeitos originados pela não continuidade de seus estatores. Assim, bobinas colocadas nas extremidades dos estatores, possuem indutâncias diferentes de bobinas colocadas em sua região central, provocando diferentes valores para as indutâncias próprias e para as indutâncias mútuas do conversor. Este fenômeno denominado Efeito de Extremidade Estático, perde importância quando o comprimento do estator é muito maior do que o passo polar ou, quando os estatores são dotados de enrolamentos especiais.

O Efeito de Extremidade Dinâmico ou Efeito Longitudinal de Extremidade, é devido as correntes anormais que são induzidas na lâmina linórica em presença da variação do fluxo nas regiões de entrada e de saída do entreferro. Estas correntes serão superpostas às correntes que são induzidas na máquina rotativa equivalente (ou no conversor assíncrono linear de estator infinito). Este efeito atua fortemente na entrada e saída do

entreferro e é atenuado, de forma diferente nas regiões de entrada e de saída, à medida que se caminha para dentro dos indutores, partindo de uma ou de outra extremidade.

O Efeito Transversal de Borda, ocasionado pela distribuição não uniforme de correntes na lâmina linórica, está relacionado diretamente à região da lâmina linórica que excede à largura dos estatores. Os conversores rotativos tradicionais estão livres deste efeito, pois, seus anéis de curto-circuito possuem, normalmente, seção reta maior que as das barras rotóricas e a resistência destes anéis pode ser considerada desprezível em relação a resistência das barras.

Neste Capítulo far-se-á um estudo dos efeitos que atuam de forma mais acentuada no comportamento do CAL, analisando suas características e, para o Efeito Transversal de Borda, será utilizado um fator de correção [9]. O Efeito Longitudinal de Extremidade será analisado e um fator para sua correção será apresentado no Capítulo 4.

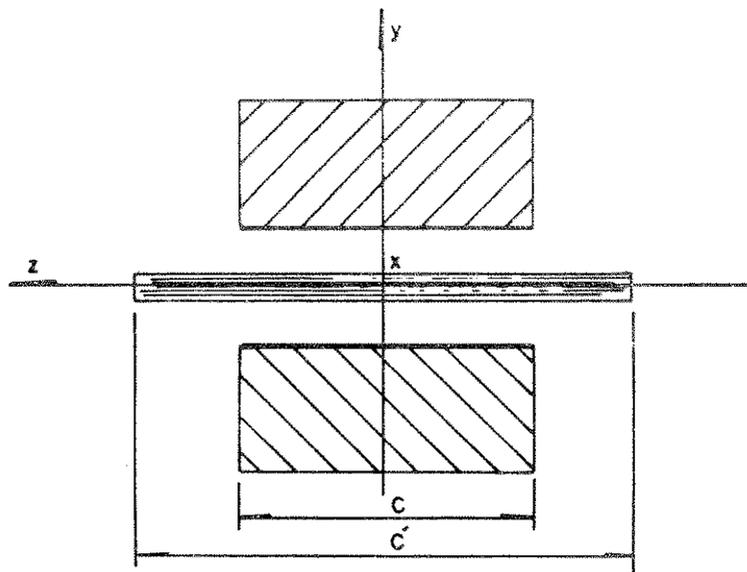


Figura 3.1 - Corte Transversal do CAL

3.2 - EFEITO TRANSVERSAL DE BORDA

Estudo Unidimensional efetuado na distribuição da densidade de fluxo no entreferro dos CALs, mostra que as correntes induzidas na lâmina linórica possuem componentes apenas na direção z . Todavia, esta hipótese não permite considerar a circulação de correntes na região da lâmina linórica que é externa ao entreferro (naqueles conversores que possuem lâmina linórica com largura maior que seus estatores), não considerando a circulação não uniforme das mesmas, ou seja, não leva em conta circulação de correntes na direção x e, tampouco, os fechamentos de linhas de correntes no linor, na região do entreferro dos CALs. Desta forma, uma potência adicional, relativa às perdas na lâmina linórica, deve ser levada em conta.

A Figura 3.1 representa, esquematicamente, um corte transversal efetuado em um CAL. Pode-se observar os blocos estatóricos fixos de largura c e a lâmina linórica de largura c' , que se translada na direção do eixo x . A relação c/c' , juntamente com a resistividade da lâmina linórica, é importante elemento no estudo do Efeito Transversal de Borda, modificando o comportamento das trajetórias das corrente estabelecidas na lâmina linórica, como pode ser observado na Figura 3.2. CALs com lâmina linórica de largura idêntica à largura dos estatores e, portanto, relação c/c' unitária, apresentam distribuição de correntes com poucas componentes que contribuem com a força propulsora final de translação (componentes na direção z). Por outro lado, CALs que apresentam relação c/c' muito menor que a unitária além de não apresentarem vantagens significativas em seu

desempenho, levam a conversores com custo construtivo elevado.

A largura ideal para a lâmina linórica pode ser determinada a partir dos fatores de correção de resistividade, como será visto a seguir.

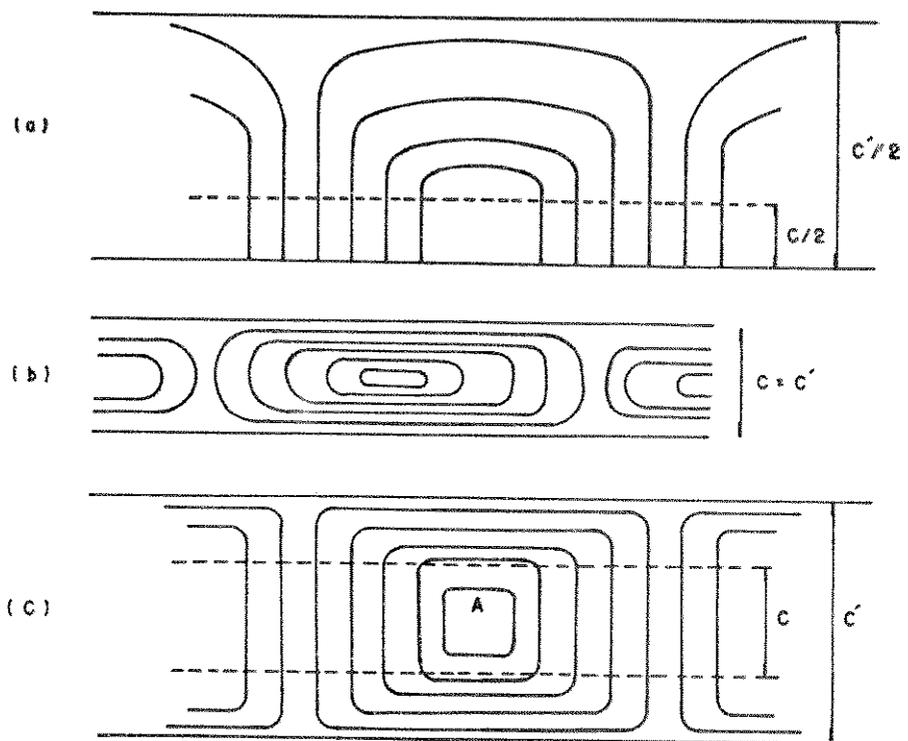


Figura 3.2 - Forma Geral das Linhas de Correntes para linores de larguras várias.

Para estabelecer-se a relação c/c' ideal para o CAL, deve-se analisar a atuação do Efeito Transversal de Borda. Este efeito é diferente em origem e natureza ao Efeito Longitudinal de Extremidade, o qual será analisado adiante, pois, não é

originário do movimento relativo entre estator e linor e não envolve fenômenos transitórios de qualquer natureza.

A determinação da resistividade da lâmina linórica deve levar em conta o Efeito Transversal de Borda e isto deve ser feito através de fatores que consideram a não uniformidade da distribuição das correntes circulantes na mesma, fatores estes que atuarão, de forma marcante, no desempenho final dos CALs.

Diversos autores analisaram o Efeito Transversal de Borda [7][9][10] e estabeleceram fatores que modificam a resistividade da lâmina linórica. Os trabalhos desenvolvidos por Russell e Norsworthy [9] e por H. Bolton [7], são os mais utilizados para o estudo do fenômeno, sendo que este último o faz de forma mais abrangente e completa.

A escolha do tratamento matemático a ser utilizado para a caracterização do Efeito Transversal de Borda deve ser feita considerando-se, principalmente, a precisão do modelo adotado. Assim, a escolha, em princípio, deverá recair sobre o tratamento proposto na referência [7]. Porém, para a maioria dos casos, a aplicação do fator proposto por Bolton [7], ou por Russel-Norsworthy[9], levam a valores muito próximos. Desse modo, o fator de correção da resistividade superficial do linor (k_s) proposto por Russell-Norsworthy deve ser aplicado, dado sua simplicidade de cálculo.

A Figura 3.3, construída com dados do conversor apresentado no Apêndice I, compara os fatores de correção segundo as técnicas discutidas acima, sendo que nesta Figura pode-se observar que o fator k_s calculado segundo teoria apresentada por Bolton varia com o escorregamento, enquanto que pela outra

teoria, o mesmo é constante, porém, a variação entre os valores calculados, no ponto de maior divergência, é menor que 1 %.

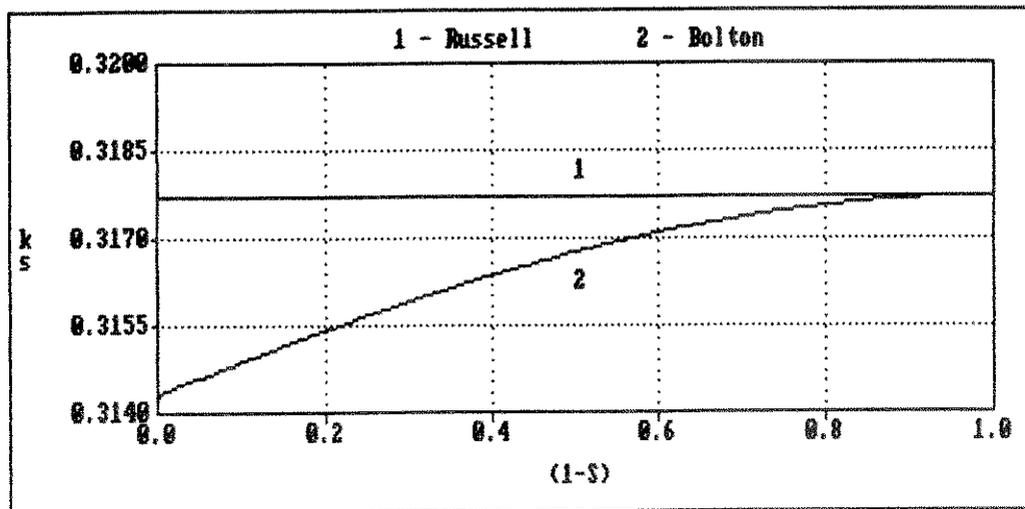


Figura 3.3 - Fator de Correção k_s (CAL Apênd. I)

O fator proposto por Russell-Norsworthy (k_s), é dado por:

$$k_s = 1 - \frac{\operatorname{tgh}(\epsilon_x)}{\epsilon_x \cdot (1 + \operatorname{tgh}(\epsilon_x) \cdot \operatorname{tgh}(\epsilon_y))} \quad (3.1)$$

onde:

$$\epsilon_x = \frac{\pi \cdot c}{2 \cdot t_p} \quad (3.2a)$$

$$\epsilon_y = \frac{\pi \cdot (c' - c)}{2 \cdot t_p} \quad (3.2b)$$

sendo c a largura do estator e c' a largura do linor e a diferença $(c' - c)$ é o comprimento das duas 'abas' laterais do CAL..

O fator estampado na equação (3.1) é função apenas de parâmetros mecânicos do CAL e sua variação se observa com a modificação do comprimento das 'abas' do conversor. A Figura 3.4 mostra o comportamento do fator k_s para diferentes passos polares (t_p), em função da largura de uma das 'abas' $(c' - c)/2$.

A Figura 3.4 permite observar que o fator k_s varia muito quando a largura da lâmina é próxima da largura do conversor e que a partir de um certo valor de 'aba', o fator k_s

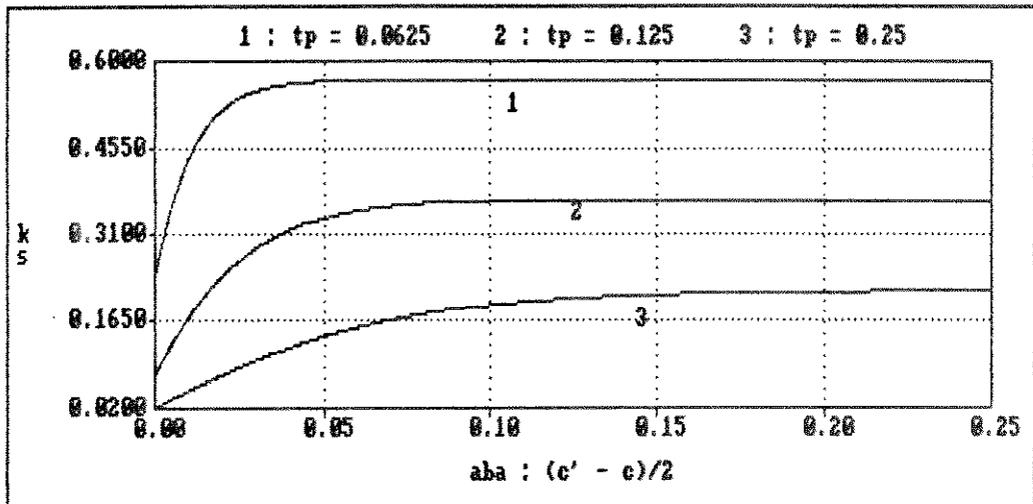


Figura 3.4 - Variação de k_s com a largura do linor
(t_p e aba em metros)

é praticamente constante, sendo, portanto, inútil qualquer aumento. Assim, pode-se estipular um valor ótimo para a largura de uma aba [1][4][17], dado por:

$$\frac{(c' - c)}{2} = \frac{t_p}{\pi} \quad (3.2c)$$

com:

$$\epsilon_y = 1 \quad (3.2d)$$

As equações (3.2c) e (3.2d) permitem determinar o valor ótimo para a largura da lâmina linórica.

3.3 - EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

A característica mais importante no estudo dos CALs é, sem dúvida, o fato destes apresentarem um circuito magnético aberto, favorecendo o aparecimento de perturbações no fluxo das regiões de entrada (Efeito Longitudinal de Extremidade de Entrada) e de saída (Efeito Longitudinal de Extremidade de Saída) do conversor, caracterizando as descontinuidades longitudinais de comportamento elétrico e magnético dos CALs. Admitindo-se que o sistema de referência está colocado no estator (e este é fixo, como mostra a Figura 3.5) e, admitindo-se que a lâmina linórica se move com velocidade V_{rx} , no sentido positivo do eixo x , de forma semelhante ao campo magnético de translação, o qual viaja com velocidade V_{sx} , o ponto do estator onde $x = 0$, caracteriza a região de entrada da lâmina no entreferro e, portanto, a extremidade de entrada e o ponto do estator onde $x = L$, caracteriza a região de saída da lâmina do entreferro, ou seja, a extremidade de saída, para um CAL de comprimento $L = p \cdot \tau_p$.

O Efeito Longitudinal de Extremidade observado nos CALs, está relacionado com o movimento da lâmina linórica em relação aos estatores e atua de forma diferente em CALs de mesmas características mecânicas e diferentes velocidades.

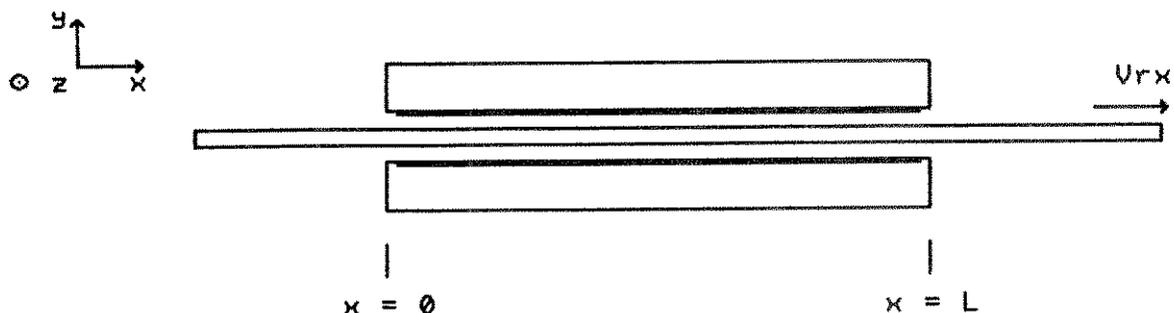


Figura 3.5 - Vista Lateral do CAL

O Efeito Longitudinal de Extremidade foi inicialmente estudado na União Soviética (Comunidade de Estados Independentes) [6], quando do estudo do comportamento de motores com estator seccionado, chamados de 'motores de arco'. Motores de arco são máquinas onde uma parte do circuito magnético do estator é retirada e a restante recebe um enrolamento estatórico trifásico, mantendo-se o rotor intacto. Como o 'motor de arco' possui barras rotóricas que direcionam as correntes induzidas e o fechamento destas é feito por anéis de curto-circuito de grande seção reta, pode-se desprezar o Efeito Transversal de Borda no estudo dos mesmos. Desta forma, o 'motor de arco' é afetado, apenas, pelo Efeito Longitudinal de Extremidade, tornando-o extremamente interessante para o estudo do referido fenômeno, devido em parte, à facilidade de construção, operação e levantamento de dados em laboratório.

Nos CALs de estator curto e linor laminar de grande comprimento, como o mostrado na Figura 3.6, pode-se visualizar melhor o Efeito Longitudinal de Extremidade.

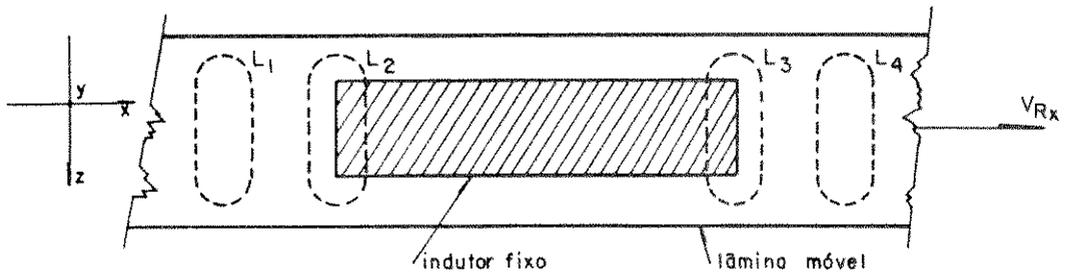


Figura 3.6 - Laços Fictícios Praticados na Lâmina Linórica do CAL

Traça-se sobre a lâmina linórica do conversor, quatro laços fictícios, como mostra a Figura 3.6, para um particular instante t_1 . Os laços L_1 e L_4 estão muito distantes das extremidades do estator de forma a permitir, sem erro, admitir-se que os mesmos não concatenam fluxo magnético no particular instante t_1 . Não concatenando fluxo, não estão sujeitos às variações deste, não estando, portanto, sujeitos a forças eletromotrizes induzidas e, tampouco, a correntes circulantes. Os laços fictícios L_2 e L_3 concatenam fluxo magnético variante no tempo e no espaço e estão sujeitos às forças eletromotrizes induzidas, por apresentarem velocidade em relação ao campo magnético de translação. Como o indutor está estático em relação ao referencial externo e, como o campo magnético de translação viaja no sentido do eixo x, no conversor da Figura 3.6, assim como a lâmina linórica, diversos fenômenos são observados. Como é a lâmina que se movimenta, a extremidade esquerda do indutor é a de entrada da lâmina e a direita do indutor, é a de saída da lâmina, como já foi discutido anteriormente.

Os pontos situados na metade esquerda do laço L₂, estão fora da região ativa, enquanto que os pontos da metade direita, estão imersos no fluxo magnético gerado pelo indutor. No laço L₃, situação inversa se apresenta.

A reação imposta pelas correntes induzidas na lâmina linórica, na região do laço L₂, está estabelecida de forma a opor-se ao crescimento do fluxo concatenado pelo mesmo. No laço L₃, a reação imposta pelas correntes atua no sentido de se opor ao decréscimo do fluxo concatenado pelo referido laço, o que já evidencia comportamento não semelhante, para as duas extremidades.

O fato de haver circulação de corrente no laço L₃ após a sua saída da região ativa, é motivo de aumento das perdas por correntes parasitas, além da interação do fluxo magnético criado por estas correntes com o fluxo magnético de espraçamento do indutor dar origem a uma componente de força, que atua em sentido inverso ao da força propulsora, isto é, dar origem a uma componente de força frenante, fato que é tão mais pronunciado quanto maior for a velocidade linórica [2].

O fato de haver uma intensa corrente induzida no laço L₂ é motivo para o aparecimento de um forte fluxo magnético que interage com o fluxo magnético de translação, alterando o comportamento da força de propulsão (no sentido de reduzi-la). Desta forma, as extremidades do estator dão origem a duas componentes de forças frenantes que caracterizam o Efeito de Extremidade Longitudinal (de entrada e de saída).

Os efeitos observados nas extremidades do estator, propagam-se através do entreferro, distorcendo o campo magnético

de translação em regiões distantes das extremidades. A penetração da perturbação de fluxo, devido aos efeitos de extremidades, está ligada, principalmente, à velocidade do CAL.

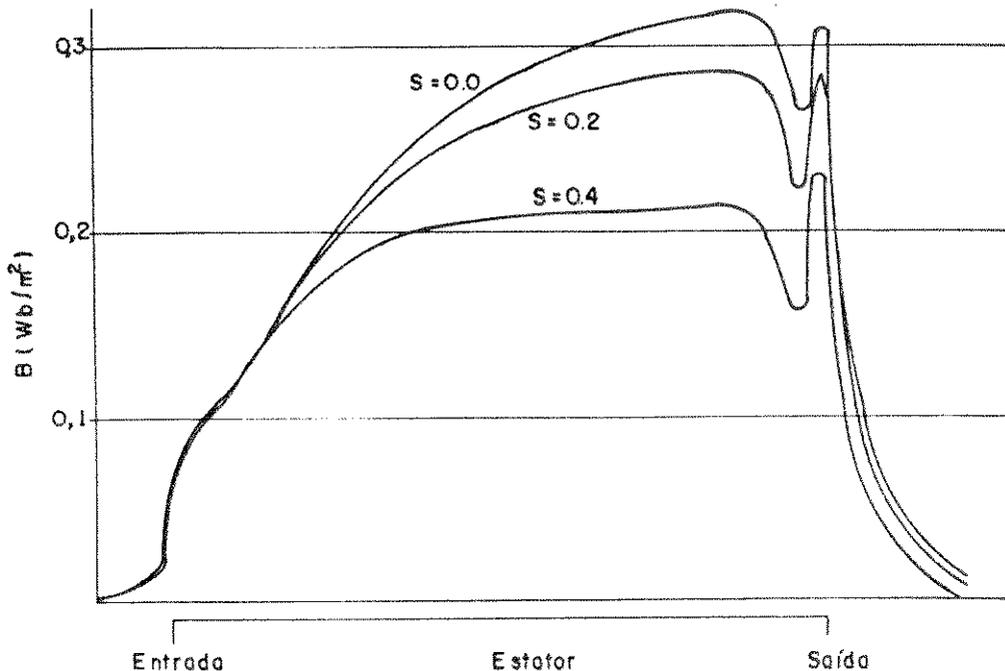


Figura 3.7 - Densidade de Campo ao Longo do Eixo x

A Figura 3.7 mostra o comportamento da densidade de campo magnético ao longo do comprimento do estator (eixo x), para um CAL analisado pela referência [1], onde pode-se observar as alterações provocadas pelos efeitos de extremidade.

Nos conversores de alta velocidade, o comprimento de penetração da perturbação da extremidade de entrada é muito maior que o comprimento de penetração da perturbação da extremidade de saída, sendo aquele, quase que totalmente, responsável pela alteração do desempenho do CAL. Deve-se ressaltar que o Efeito Transversal de Borda também se faz presente.

Para conversores de baixa velocidade, o efeito longitudinal de extremidade de entrada é atenuado mais rapidamente e sua influência no desempenho do conversor é menor que em conversores de alta velocidade.

3.4 - NÚMERO DE REYNOLDS MAGNÉTICO

Observa-se, das afirmações anteriores, que a velocidade do CAL é importante subsídio para seu estudo. Como o Efeito Longitudinal de Extremidade atua de forma diferente para conversores de alta e de baixa velocidades, surge a necessidade de classificar-se os conversores, partindo-se de sua velocidade, em grupos que apresentem comportamento distinto. Segundo S. Yamamura [1], pode-se classificar os conversores a partir do valor obtido pela aplicação da equação:

$$N_{rm} = \frac{\mu_0 \cdot (V_{rx})^2}{4 \cdot \omega \cdot p \cdot g} \quad (3.3)$$

A equação (3.3), que expressa o 'Número de Reynolds Magnético', permite classificar os conversores quanto a sua velocidade. Um conversor apresenta comportamento de alta velocidade quando N_{rm} assume valores muito superiores à unidade e de baixa velocidade, quando N_{rm} assume valores menores que a unidade ou seja:

$N_{rm} \gg 1$ - comportamento de alta velocidade

$N_{rm} < 1$ - comportamento de baixa velocidade

Existe, também, a situação em que N_{rm} assume valor pouco maior que a unidade. Neste caso, considera-se os conversores como de velocidade intermediária, devendo-se proceder a uma análise mais detalhada dos efeitos provocados pelas extremidades, principalmente a de entrada.

A equação (3.3) pode ser escrita em função do fator de qualidade (G_1) do conversor, tomando-se como base duas equações fundamentais no estudo dos CALs:

$$V_{sx} = 2 \cdot t_p \cdot f \quad (3.4)$$

$$V_{rx} = (1-s) \cdot V_{sx} \quad (3.5)$$

onde V_{sx} é a velocidade síncrona do campo magnético do conversor s , o escorregamento e f a frequência da fonte de alimentação.

O 'Número de Reynolds Magnético' (N_{rm}), pode, então, ser expresso por:

$$N_{rm} = f(s) \cdot G_1 \quad (3.6)$$

O escorregamento, na equação (3.6), pode ser adotado, para análises, como o referente à velocidade nominal de operação do CAL. A Figura 3.8 mostra a variação do 'Número de Reynolds Magnético' para um CAL com as dimensões apresentadas no Apênd. I em função da velocidade.

A influência do Efeito Longitudinal de Extremidade na força propulsora de um CAL, pode ser observada na Figura 3.9, para diferentes classes de velocidade de operação.

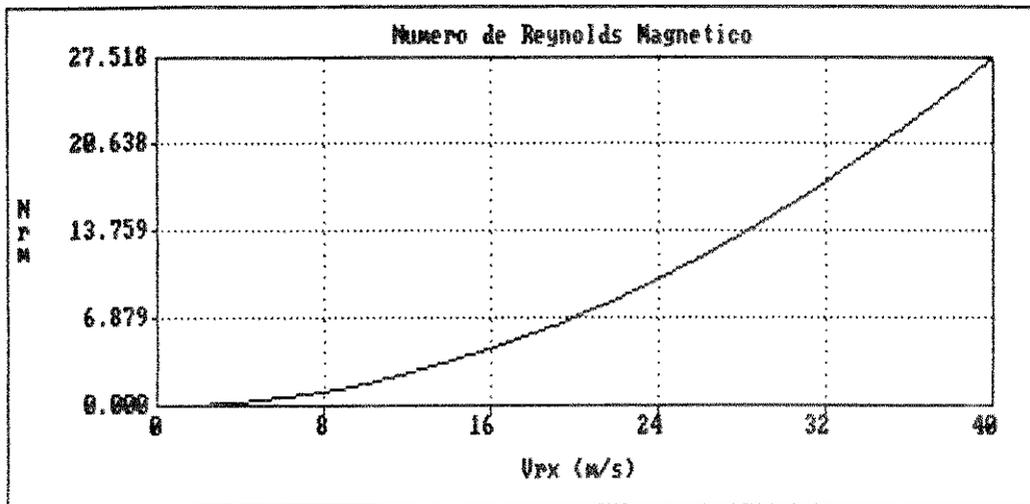


Figura 3.8 - Variação de N_{rm} com a Velocidade de translação (CAL Apênd. I).

A Figura 3.9(a) mostra o comportamento do CAL, caracterizado como de baixa velocidade. Nesta curva pode-se observar que a influência do Efeito Longitudinal de Extremidade, atua no sentido de reduzir a força propulsora máxima e contribui para o surgimento de forças propulsoras para velocidade da lâmina linórica igual a velocidade de translação do campo magnético estático.

A Figura 3.9(b), mostra o comportamento do conversor de velocidade intermediária, onde também a força propulsora máxima é reduzida e o comportamento do CAL, para pequenas variações de força, é acompanhado de uma grande variação de velocidade, contribuindo para que estes conversores operem em regiões de elevado escorregamento.

A Figura 3.9(c), referente a CALs de alta velocidade de translação, mostra que os mesmos são fortemente influenciados

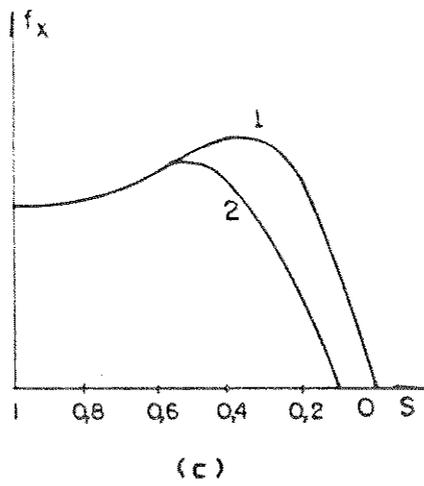
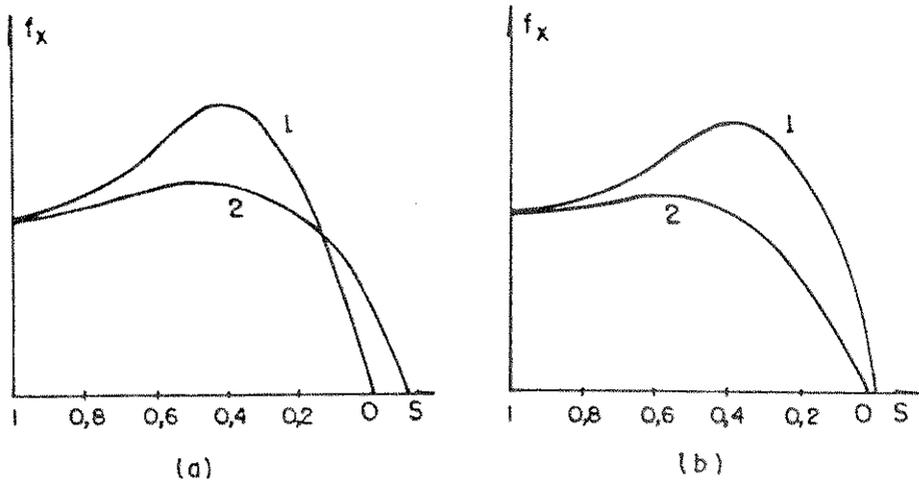


Figura 3.9 - Curvas Força-Escorregamento do CAL
 1- sem Efeito Long. de Extremidade
 2- com Efeito Long. de Extremidade

pelo Efeito Longitudinal de Extremidade na região de baixo escorregamento. Observa-se também, na Figura 3.9, que a influência do Efeito Longitudinal de Extremidade é muito pouco significativa para escorregamentos próximos da unidade e, com o conversor bloqueado ($s = 1$), este feito deixa de influenciar o CAL, comprovando sua ligação com a velocidade de translação da lâmina linórica [3][4][18].

CAPÍTULO 4

FATOR DE CORREÇÃO PARA O EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

4.1 - INTRODUÇÃO

O desempenho dos CALs, como já foi visto em capítulos anteriores, sofre influência de efeitos que, alterando o comportamento das correntes induzidas na lâmina linórica e modificando a distribuição de densidade de campo magnético dos conversores, provocam uma redução na força translação, no rendimento e no fator de potência dos mesmos. Assim, os resultados obtidos teoricamente apresentam valores muito diferentes de resultados observados experimentalmente, quando tais efeitos não são considerados, inviabilizando sua análise.

No Capítulo 3, o Efeito Transversal de Borda foi introduzido no estudo dos CALs através de um fator que, modificando a resistividade da lâmina linórica, representa as distorções nas correntes induzidas no linor. Uma abordagem semelhante pode ser utilizada quando do estudo do Efeito Longitudinal de Extremidade, estabelecendo-se um fator que represente o fenômeno, permitindo sua utilização em modelos matemáticos de maior precisão. Tal abordagem já foi experimentada, com maior ou menor sucesso por alguns pesquisadores [3][11][12][13].

Neste capítulo far-se-á uma análise do Efeito Longitudinal de Extremidade, buscando um fator que possa expressar o distúrbio na onda de densidade de campo magnético dos CALs, provocado pelo mesmo. Com o Fator de Efeito Longitudinal de Extremidade e com o Fator de Efeito Transversal de Borda, um circuito elétrico equivalente que represente o desempenho real dos CALs, poderá ser introduzido, modificando o comportamento da força propulsora dada pelo modelo matemático anterior, que não contemplava a existência destes fenômenos.

4.2 - FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA NOS CONDUTORES DO ESTATOR

O Efeito Longitudinal de Extremidade, pode ser observado através da força eletromotriz induzida no enrolamento de estator e, como as alterações provocadas pela onda de efeito de extremidade de saída são muito pequenas, o problema dos efeitos de extremidades longitudinais fica restrito ao estudo do Efeito Longitudinal de Extremidade de Entrada, ou simplesmente Efeito Longitudinal de Extremidade. Para essa situação, como mostrado na equação (2.40), a onda de densidade de campo magnético no entreferro do CAL é composta por duas ondas senoidais, sendo que uma delas atenuada ao longo do entreferro, que estabelecem forças eletromotrizes nos enrolamentos estatóricos:

$$e = e_s + e_1 = - E_s \cdot \cos(\omega t + \delta_s) - E_1 \cdot \cos(\omega t + \delta_1) \quad (4.1a)$$

A equação (4.1a) é a expressão geral para a força

eletromotriz induzida, composta por uma tensão devido a onda normal de campo (e_s) e uma tensão devido a onda de campo de extremidade de entrada (e_1). Para a máquina operando em sincronismo, o ângulo entre as componentes de força eletromotriz E_s e E_1 é praticamente π radianos, como será demonstrado adiante.

Nesta situação a equação (4.1a) fica:

$$\delta = \delta_s - \delta_1 = \pi \quad (4.1b)$$

$$e = e_s + e_1 = -E_s \cdot \cos(\omega t) + E_1 \cdot \cos(\omega t) \quad (4.1c)$$

A equação (4.1b) estabelece as forças eletromotrizes para um ponto específico de operação, ou seja, quando o escorregamento é zero; para outros pontos a fase, entre as tensões deve ser determinada.

Definindo-se por k_e o fator que caracteriza o efeito longitudinal de extremidade, como a relação entre a fem devido a onda B_1 e a fem devido a onda B_s [3], obtém-se:

$$k_e = \frac{E_1}{E_s} \quad (4.2)$$

substituindo-se a equação (4.2) na equação (4.1a), resulta:

$$e = -E_s \cdot (1 - k_e) \cdot \cos(\omega t) \quad (4.3)$$

O fator que considera o Efeito Longitudinal de Extremidade, k_e , apresentado nas equações (4.2) e (4.3) deve considerar o ângulo entre as forças eletromotrizes (δ).

Observando a equação (4.3), nota-se, que uma vez determinado o fator k_e , pode-se estudar o CAL como se o mesmo possuísse apenas uma onda senoidal de campo magnético no entreferro, como nos conversores rotativos e, um circuito elétrico equivalente pode ser estabelecido.

4.3 - EXPRESSÃO DAS FORÇAS ELETROMOTRIZES

Para a onda normal de densidade de campo magnético, a força eletromotriz, por fase, pode ser expressa por:

$$e_s = - N_s \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.4)$$

onde N_s é o número de espiras por fase e Φ é fluxo por pólo.

O fluxo por pólo para a onda B_s , admitida como senoidal, pode ser calculado através:

$$\Phi = c \cdot \int_0^{t_p} B_s \cdot \text{sen}(\pi x / t_p) \cdot dx \quad (4.5)$$

onde c é a largura do bloco estático do CAL.

Assim, a força eletromotriz do CAL, com um fator de enrolamento k_w e com N_f condutores ativos, operando em um sistema com frequência angular ω , por fase é expressa por:

$$e_s = -c \cdot \frac{N_f}{2} \cdot kw \cdot \frac{d}{dt} \left[\left[\int_0^{t_p} B_s \cdot \text{sen}(\pi x / t_p) \cdot dx \right] \text{sen}(\omega t) \right] \quad (4.6)$$

$$e_s = -c \cdot N_f \cdot \omega \cdot kw \cdot \frac{t_p}{\pi} \cdot B_s \cdot \text{cos}(\omega t) = -E_s \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (4.7)$$

Análise semelhante deve ser feita para a onda de efeito longitudinal de extremidade, de modo a se obter o segundo termo do segundo membro da equação (4.1a). Porém, as operações matemáticas para a onda de efeito longitudinal de extremidade são mais complexas, dado a atenuação desta onda durante seu deslocamento pelo entreferro do CAL, que leva a diferentes valores de fluxo para cada pólo. Observando cada pólo isoladamente, temos:

Para o primeiro pólo do CAL:

$$\Phi_{11} = c \cdot \int_0^{t_{pe}} B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \exp(-x/\alpha) \cdot \text{sen}(\pi x / t_{pe} + \delta) \cdot dx \quad (4.8)$$

A integral dada na equação (4.8) pode ser calculada, através da integração por partes, ficando a expressão do fluxo de extremidade de entrada, em seu primeiro pólo, dado por:

$$\Phi_{11} = \frac{c \cdot B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot f(\delta)}{\left[\left[\frac{1}{\alpha_1} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{tpe} \right]^2 \right]} \cdot \left[1 + \exp(-tpe/\alpha_1) \right] \quad (4.9)$$

Na equação (4.9) os termos que se relacionam com o ângulo δ , foram agrupados na função $f(\delta)$, que tem como expressão:

$$f(\delta) = \left[\frac{1}{\alpha_1} \right] \cdot \text{sen}(\delta) + \left[\frac{\pi}{tpe} \right] \cos(\delta) \quad (4.10)$$

O fluxo calculado para o segundo pólo fica:

$$\Phi_{12} = c \cdot \int_{tpe}^{2 \cdot tpe} B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \exp(-x/\alpha_1) \cdot \text{sen}(\pi x/tpe + \delta) \cdot dx \quad (4.11)$$

A equação (4.11) difere da equação (4.8) apenas em seus limites de integração, de maneira que a solução, análoga a anterior, é dada por:

$$\Phi_{12} = \frac{c \cdot B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot f(\delta)}{\left[\left[\frac{1}{\alpha_1} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{tpe} \right]^2 \right]} \cdot \left[\exp(-tpe/\alpha_1) + \exp(-2 \cdot tpe/\alpha_1) \right] \quad (4.12)$$

Analisando-se o terceiro pólo, obtém-se a equação:

$$\Phi_{13} = c \cdot \int_{2 \cdot tpe}^{3 \cdot tpe} B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \exp(-x/\alpha_1) \cdot \text{sen}(\pi x/tpe + \delta) \cdot dx \quad (4.13)$$

A solução da equação (4.13), semelhante as obtidas anteriormente, fica expressa por:

$$\Phi_{13} = \frac{c \cdot B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot f(\delta)}{\left[\left[\frac{1}{\alpha_1} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{tpe} \right]^2 \right]} \cdot \left[\exp(-2 \cdot tpe/\alpha_1) + \exp(-3 \cdot tpe/\alpha_1) \right] \quad (4.14)$$

A análise efetuada para os três primeiros pólos do indutor, para a onda longitudinal de extremidade do CAL, pode ser levada aos demais pólos até o último, que é dado por:

$$\Phi_{1P} = c \cdot \int_{(P-1) \cdot tpe}^{P \cdot tpe} B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \exp(-x/\alpha_1) \cdot \text{sen}(\pi x/tpe + \delta) \cdot dx \quad (4.15)$$

com solução expressa por:

$$\Phi_{1P} = \frac{c \cdot B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot f(\delta)}{\left[\left[\frac{1}{\alpha_1} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{tpe} \right]^2 \right]} \left[\exp(-(P-1) \cdot tpe/\alpha_1) + \exp(-P \cdot tpe/\alpha_1) \right] \quad (4.16)$$

A equação (4.16) é a equação genérica do fluxo por pólo para a onda de efeito longitudinal de extremidade, podendo ser aplicada a qualquer pólo.

A força eletromotriz induzida nos enrolamentos primários, devida ao efeito longitudinal de extremidade, analisada para grupo de dois pólos consecutivos, ou seja, analisada a cada par de pólos, e dada por:

$$e_1 = - \sum_{k=1}^{P/2} NfP \cdot kwe \cdot \frac{d\Phi_{1k}}{dt} \quad (4.17)$$

com $k = 1, 3, 5, 7 \dots P/2$

O número de espiras por par de pólos (NfP) e o fator de enrolamento (Kwe) podem ser calculados por:

$$NfP = \frac{Nf}{p} \cdot \frac{tpe}{tp} \quad (4.18)$$

$$kwe = kde \cdot kce \quad (4.19a)$$

$$kde = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi \cdot tp}{2 \cdot m \cdot tpe}\right)}{q \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi \cdot tp}{2 \cdot m \cdot q \cdot tpe}\right)} \quad (4.19b)$$

$$k_{ce} = \text{sen} \left(\frac{t_p}{t_{pe}} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{t_b}{t_p} \right) \quad (4.19c)$$

onde N_{P} é o número de espiras por par de pólos e por fase para a onda de efeito de extremidade, k_{de} o fator de distribuição do enrolamento, k_{ce} o fator de encurtamento do enrolamento e k_{we} o fator de enrolamento, calculados para um número m de fases, q ranhuras por pólo e por fase e um passo de bobina t_b .

O cálculo dos fatores de enrolamentos para a onda de efeito de extremidade é semelhante ao utilizado com harmônicas espaciais em máquinas rotativas, porém, com apenas uma onda que apresenta meio comprimento variável com o escorregamento, tomado relativamente ao comprimento da onda normal (t_p/t_{pe}).

A fem devida ao Efeito Longitudinal de Extremidade, induzida nos enrolamentos estatóricos, representada pela soma das tensões em cada grupo de dois pólos, é mostrada pela equação:

$$e_1 = - \omega \cdot N_{\text{P}} \cdot k_{we} \cdot \frac{c \cdot B_1 \cdot f(\delta)}{\left[\left[\frac{1}{\alpha_1} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{t_{pe}} \right]^2 \right]} \cdot A_1 \cdot \cos(\omega t) \quad (4.20)$$

onde A_1 representa a soma dos termos exponenciais das componentes do fluxo polar.

Uma análise nas equações (4.9), (4.12) e (4.14) permite observar que o fluxo por pólo é diferente para cada pólo da onda de extremidade de entrada devido à sua atenuação durante o deslocamento pelo entreferro. A análise de harmônicas de fluxo

levaria a um estudo matemático mais complexo, que pode ser eliminado se for admitido que a distribuição de fluxo é senoidal a cada dois meio-comprimentos de onda ($2.tpe$). Dessa forma, o termo A_1 é do tipo:

$$A_1 = 2. \left[\exp(-tpe/\alpha_1) + \exp(-3.tpe/\alpha_1) + \exp(-5.tpe/\alpha_1) + \right. \\ \left. + \exp(-7.tpe/\alpha_1) + \dots + \exp(-(p-1).tpe/\alpha_1) \right] \quad (4.21)$$

onde p é o número de pólos do CAL.

A equação (4.21) apresenta em seu corpo, uma progressão geométrica onde o termo inicial é $\exp(-tpe/\alpha_1)$, a razão é dada por $\exp(-2.tpe/\alpha_1)$ e o número de termos é $(p/2)$. Assim a equação (4.21) pode ser reescrita, como a soma da progressão geométrica:

$$A_1 = 2. \exp \left[- \frac{p.tpe}{2.\alpha_1} \right] \cdot \frac{\sinh \left[\frac{p.tpe}{2.\alpha_1} \right]}{\sinh \left[\frac{tpe}{\alpha_1} \right]} \quad (4.22)$$

A força eletromotriz devido a onda de extremidade de entrada é expressa, então, por:

$$e_1 = - \omega \cdot \frac{Nf.tpe}{p.tp} \cdot kwe \cdot \frac{c.B_1.f(\delta).A_1}{\left[\left[\frac{1}{\alpha_1} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{tpe} \right]^2 \right]} \cdot \cos(\omega t) \quad (4.23)$$

4.4 - FATOR DE CORREÇÃO DO EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

De acordo com as equações (4.2) e (4.3) o efeito longitudinal de extremidade pode ser analisado através de um fator que atua sobre a força eletromotriz E_s . Esse fator, calculado através da equação exposta em (4.2), pode ser agora explicitado, fazendo-se a relação entre as tensões dadas por (4.23) e (4.7). Porém, deve-se observar que as mesmas são dadas como funções das densidades de campo magnético B_s e B_1 , respectivamente.

De acordo com a referência [3], na extremidade de entrada, operando com $s \cong 0$, a densidade de campo magnético é praticamente zero, pois, as ondas B_s e B_1 , para esta situação, apresentam mesmo valor máximo e estão em oposição de fase e, considerando a inexistência do efeito de extremidade de saída, pode-se escrever:

$$B_{s(x=0)} \cong B_{1(x=0)} \quad (4.24)$$

A determinação dos valores exatos de B_1 e B_s , para os diversos pontos de operação do CAL, pode ser obtida através de equacionamento apropriado [11], contudo, a utilização da equação (4.24), simplifica os cálculos e permite escrever o fator de extremidade de entrada, k_e , como:

$$k_e = - \frac{\pi \cdot t_{pe}}{p \cdot t_p^2} \cdot \left[\frac{k_{we}}{k_w} \right] \cdot \frac{f(\delta) \cdot A_1}{\left[\left[\frac{1}{\alpha_1} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{t_{pe}} \right]^2 \right]} \quad (4.25)$$

O fator k_e definido na equação (4.25), permite corrigir a influência do Fator de Extremidade Longitudinal de Entrada no desempenho dos CALs a partir de características físicas do CAL como velocidade linear síncrona, entreferro, resistividade do linor, frequência da fonte de alimentação, passo polar e outras que são facilmente determinadas, mesmo a nível de projeto, permitindo observar a influência deste efeito no comportamento do conversor e seu estudo através de um circuito elétrico equivalente. Deste modo, a equação (4.25) é de importância fundamental para a análise dos CALs. A Figura 4.1 mostra o comportamento do fator k_e para uma conversor com linor de alumínio, 7.9 mm de entreferro e velocidade síncrona de 15 m/s.

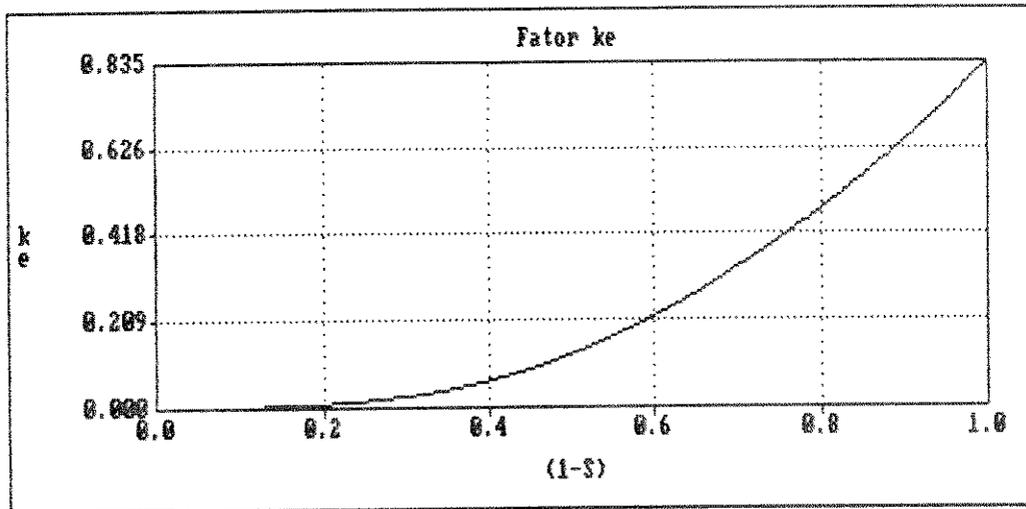


Figura 4.1 - Comportamento do fator k_e (Motor Apênd. I)

4.5 - ÂNGULO δ

A determinação do fator k_e , mostrada na equação (4.25), envolve o conhecimento do ângulo δ , ou seja, do ângulo entre a

onda de normal de densidade de campo magnético e da onda de densidade de campo de extremidade de entrada, presente na função $f(\delta)$ mostrada na equação (4.10).

O ângulo δ está relacionado a características da máquina como resistividade linórica, passo polar, entreferro e também com o ponto de operação da mesma, ou seja, para cada escorregamento corresponde um ângulo diferente. Outro problema relacionado ao ângulo δ , é a velocidade da onda de densidade de campo magnético de efeito longitudinal de extremidade de entrada, que é diferente da velocidade da onda normal de densidade de campo magnético. Dessa forma, algumas considerações se fazem necessárias para sua determinação:

- i) Em operações de baixa velocidade ($V_{rx} \rightarrow 0$), a influência do efeito longitudinal de extremidade pode ser desprezada ($k_e \rightarrow 0$);
- ii) Em operações de alta velocidade ($V_{rx} \rightarrow V_{sx}$), a constante de atenuação α assume valores elevados ($\alpha \rightarrow \infty$) e, para esta situação, os passos polares das duas ondas assumem valores muito próximos, podendo-se escrever: $t_{pe}=t_p$. Nessa situação, a atenuação da onda de efeito de extremidade é muito pequena levando, praticamente, a um cancelamento das duas ondas, ou seja, as ondas apresentam valores máximos iguais em módulo e opostos em fase [1][3], de forma que, na extremidade de entrada do CAL pode-se assumir: $B_s = -B_a$.

Observando o CAL operando em baixa velocidade, quando o fator k_e pode ser desprezado (i), temos:

$$k_e = 0 \longrightarrow f(\delta) = 0 \quad (4.26)$$

A condição para que k_e assumira valor nulo ocorre quando a função $f(\delta)$ assume valor nulo, ou seja, operando na região de baixas velocidades ($U_{rx} \rightarrow 0$ e $s \rightarrow 1$), estabelece-se como valor inicial para o ângulo delta o ângulo δ_0 :

$$\left[\frac{1}{\alpha_1} \right] \cdot \text{sen}(\delta_0) + \left[\frac{\pi}{t_{pe}} \right] \cos(\delta_0) = 0 \quad (4.27)$$

$$\delta_0 = \pi - \text{atan} \left[\frac{\pi \cdot \alpha_1}{t_{pe}} \right] \quad (4.28)$$

Quando o conversor opera com escorregamento unitário, encontra-se:

$$\frac{\pi \cdot \alpha_1}{t_{pe}} = 1 \quad (4.29)$$

$$\delta_0 = \pi - \text{atan}(1) = \frac{3 \cdot \pi}{4} \quad (4.30)$$

O valor encontrado na equação (4.30) para δ_0 , corresponde ao ângulo estabelecido entre as duas ondas, para o

conversor operando com escorregamento unitário, ou seja, bloqueado.

Por outro lado, quando o CAL opera em sincronismo, a constante de atenuação da onda de efeito longitudinal de extremidade de entrada (α_1) assume valores elevados e seu meio comprimento de onda (t_{pe}) se aproxima do meio comprimento da onda normal de densidade de campo magnético (t_p). Para esta condição ($V_{rx} \longrightarrow V_{sx}$), pode-se escrever:

$$\alpha_1 \longrightarrow \infty \quad (4.31)$$

$$t_{pe} = t_p \quad (4.32)$$

A equação (4.25), para esta condição de operação e respeitando-se as hipóteses acima, pode ser simplificada, observando alguns de seus componentes e escrevendo:

$$\exp \left[- \frac{p \cdot t_{pe}}{2 \cdot \alpha_1} \right] \cong 1 \quad (4.33)$$

$$\frac{\sinh \left[\frac{p \cdot t_{pe}}{2 \cdot \alpha_1} \right]}{\left[\frac{p}{2} \right] \cdot \sinh \left[\frac{t_{pe}}{\alpha_1} \right]} \cong 1 \quad (4.34)$$

$$\frac{1}{\left[\left[\frac{1}{\alpha s} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{tpe} \right]^2 \right]} \cdot \left[\frac{\pi \cdot tpe}{tp \cdot tp} \right] \cdot \left[\frac{\pi}{tpe} \right] \cong 1 \quad (4.35)$$

Para a condição mostrada na equação (4.32), quando os passos polares das duas ondas são iguais, a equação (4.19) fica alterada e os fatores de enrolamentos das duas ondas assumem valores iguais, ou seja:

$$k_{we} = k_w \quad (4.36)$$

O fator k_e para operações em altas velocidades, e considerando-se as equações (4.31) a (4.32), pode ser representado, por:

$$k_e = -\cos(\delta) \quad (4.37)$$

A equação (4.37) permite obter o ângulo δ para a condição de maior influência no desempenho dos CALs. Esta condição ocorre quando o ângulo δ assume o valor:

$$\delta = \pi \quad (4.38)$$

Nesta condição, o fator k_e assume seu valor máximo:

$$k_e = 1 \quad \longrightarrow \quad \delta = \pi \quad (4.39)$$

A observação das condições limites para o ângulo δ

permite obter-se o intervalo de variação do mesmo, ou seja, a variação do ângulo δ da condição de bloqueio para a condição de sincronismo. Dessa forma o ângulo δ varia no intervalo:

$$\frac{3\pi}{4} \leq \delta \leq \pi \quad (4.40)$$

A variação do ângulo δ dentro do intervalo especificado em (4.40), é praticamente linear [3], o que pode ser verificado através de equacionamento das ondas B_s e B_r e seus respectivos ângulos [11]. Dessa forma, a equação que rege a variação do ângulo δ pode ser expressa, por:

$$\delta = \left[\frac{\pi - \delta_0}{V_{sx}} \right] \cdot V_{rx} + \delta_0 \quad (4.41)$$

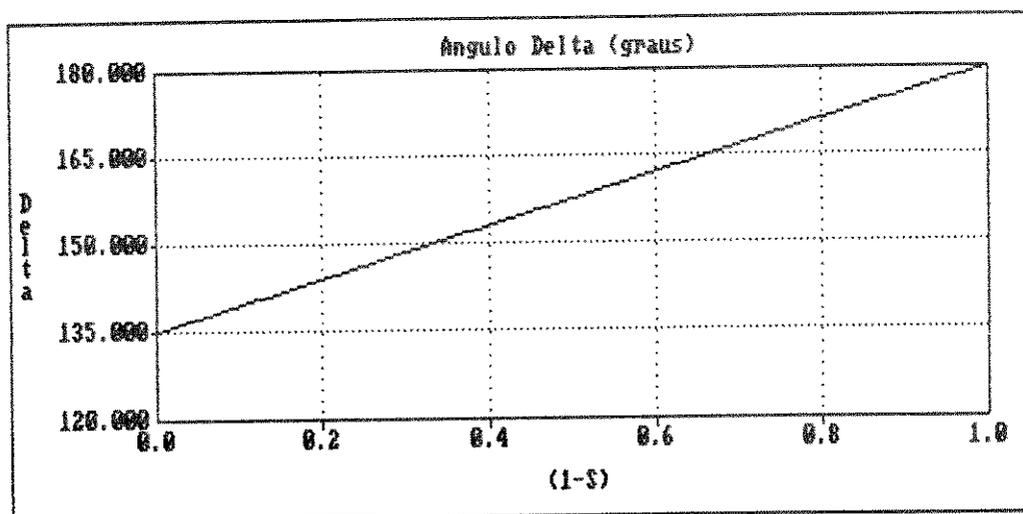


Figura 4.2 - Comportamento do Ângulo δ

onde δ_0 é o ângulo obtido através da equação (4.30), V_{sx} a velocidade linear síncrona e V_{rx} a velocidade de translação do

linor.

A Figura 4.2 mostra o comportamento do ângulo δ dado pela equação (4.41), para o conversor apresentado no Apêndice I.

A utilização da equação (4.41) permite calcular o ângulo delta para qualquer ponto de operação do CAL. A resposta obtida através da equação (4.41) para o ângulo delta, apesar de ser aproximada, mostra-se suficientemente precisa, quando comparada com a resposta obtida pela referência [11], com a vantagem de sua simplicidade de cálculo.

CAPÍTULO 5

CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA CALs CONSIDERANDO O EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

5.1 - INTRODUÇÃO

O estudo dos CALs através de circuitos elétricos equivalentes pode levar a resultados insatisfatórios, principalmente em relação à força propulsora, devido a influência dos Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda, que inviabilizam os modelos convencionais de circuito elétrico equivalente, quando estes são aplicados aos CALs. Assim, um circuito elétrico equivalente obtido através de ensaios de rotor bloqueado e em vazio, na maioria dos casos, não conseguirá mostrar fielmente o desempenho do CAL, pois, o circuito assim obtido firma-se em dois pontos de operação muito particulares: com a máquina operando a escorregamento unitário e com a máquina operando com velocidade síncrona, sendo que, neste último ponto ($s = 0$), a influência do Efeito Longitudinal de Extremidades atua em sua magnitude máxima, levando, desta forma, a um circuito elétrico equivalente que apresenta respostas que não se aproximam do comportamento real do conversor.

Neste Capítulo, um circuito elétrico equivalente, com parâmetros obtidos através de técnicas de projetos semelhantes às

utilizadas em máquinas rotativas é apresentado e, os Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda, presentes no conversor, são introduzidos através dos fatores apresentados em capítulos anteriores, k_e e k_s , respectivamente. Os resultados apresentados pelo circuito básico são comparados com os resultados apresentados pelo circuito corrigido, com a inclusão dos fatores k_e e k_s , para a observação da influência destes fatores.

5.2 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE TRADICIONAL

O circuito elétrico equivalente (CEE) utilizado para o estudo dos conversores assíncronos rotativos é composto por parâmetros que, em uma primeira análise, são parâmetros lineares, no sentido de sua não variação para diversas tensões e correntes aplicadas, podendo também ser considerados constantes para qualquer ponto de funcionamento do conversor, ou seja, para qualquer valor de escorregamento os parâmetros permanecem invariáveis. Um circuito elétrico equivalente, muito utilizado no estudo dos conversores rotativos, é mostrado na Figura 5.1.

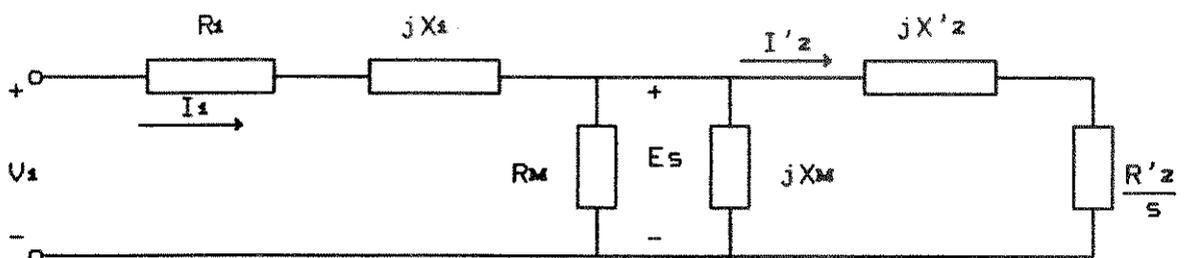


Figura 5.1 - Circuito Elétrico Equivalente (CEE) para conversores rotativos

O circuito apresentado na Figura 5.1, com valores de tensão (V_1) e corrente ($I_1 = I_F$) por fase, possui parâmetros também apresentados por fase, que estão ligados às diversas características do conversor [14]:

R_1 - resistência dos condutores do estator

X_1 - reatância de dispersão do estator

R_M - resistência associada as perdas no ferro

X_M - reatância de magnetização

$X'z$ - reatância de dispersão de rotor bloqueado
observada do estator

$R'z$ - resistência dos condutores de rotor bloqueado
observada do estator

O levantamento dos parâmetros acima, nos conversores rotativos, pode ser feito através de :

- um ensaio com rotor bloqueado ($s = 1$), no qual é aplicada corrente nominal aos enrolamentos de estator com o rotor travado mecanicamente, sendo levantados os valores de tensão e potência, por fase, para este ponto de funcionamento;

- um ensaio em vazio, onde o motor é alimentado com tensão plena e sem nenhuma carga mecânica aplicada ao seu eixo, de forma que sua velocidade seja a mais próxima possível de sua velocidade síncrona ($s \cong 0$), e então são levantados valores de potência e corrente, por fase, para este novo ponto de funcionamento.

Assim, o circuito é obtido com informações de dois pontos de operação muito particulares e todos os outros pontos de

operação do conversor são obtidos a partir do circuito equivalente construído.

Obtidos desta maneira, os parâmetros do conversor são considerados constantes. No entanto, é prudente observar que os mesmos podem sofrer influência, por exemplo, do nível de saturação magnética. Variações de parâmetros com a temperatura ou mesmo com o efeito pelicular, na operação com escorregamento variável, também podem ser observadas.

Todas essas particularidades podem ser introduzidas no CEE para melhorar suas respostas, permitindo que os conversores rotativos sejam estudados com o grau de sofisticação necessário para cada tipo de operação e aplicação [18].

Devido as características do estator de comprimento finito e do linor construído na forma de uma lâmina de material condutor (alumínio) dos CALs, os parâmetros do circuito equivalente dos mesmos diferem daqueles obtidos para conversores rotativos, calculados através dos procedimentos anteriormente descritos. Portanto, o circuito elétrico equivalente dos conversores rotativos não pode ser diretamente utilizado no estudo dos conversores lineares.

O CEE como mostrado na Figura 5.1 não pode, portanto, ser utilizado imediatamente para analisar o desempenho dos CALs, principalmente no tocante ao ensaio realizado com o conversor em vazio, onde os Efeitos Longitudinais de Extremidades, marcadamente o de Efeito de Extremidade de Entrada, atuam de modo a reduzir o desempenho do CAL de forma drástica e, também, devido ao fato destes conversores operarem em vazio com escorregamentos elevados [2].

5.3 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA CALs

Um circuito elétrico equivalente que se proponha a simular o comportamento dos CALs deve ser construído observando-se as particularidades próprias destes conversores e não pode ser idêntico ao circuito proposto para os conversores rotativos.

Diversos autores trabalharam no sentido de apresentar um modelo que pudesse explicar o comportamento dos CALs [3][4][12][13][15], cada trabalho seguindo uma filosofia própria de análise, que muitas vezes resultava em modelos extremamente particulares e outras em modelos extremamente complexos, dificultando sua aplicação.

O modelo proposto por G. A. Simone [4], para conversores de linor em forma de lâmina, construído com material de baixa permeabilidade magnética (alumínio ou cobre), operando com um ou dois estatores ativos, tem apresentado bons resultados para a avaliação da força propulsora e demais características dos Conversores Assíncronos Lineares, operando com corrente estatórica constante. Neste modelo, um circuito semelhante ao mostrado na Figura 5.1 é utilizado, porém com parâmetros calculados a partir da teoria de projeto dos conversores rotativos, ou seja, cada parâmetro é calculado observando-se a forma construtiva do conversor, sendo levadas em conta todas as particularidades apresentadas pelo conversor, como: dimensões dos blocos estatóricos e da lâmina linórica, entreferro, número e forma das ranhuras, etc. O modelo assim obtido, parâmetro por parâmetro, recebe ainda a correção dos Efeitos Transversal de

Borda e Longitudinal de Extremidade, na forma discutida nos capítulos anteriores, levando ao modelo final, que pode ser simulado com facilidade em pequenos computadores, como alternativa aos tradicionais ensaios de laboratório utilizados para sua obtenção.

O desempenho do modelo matemático que simule o comportamento de um conversor, deve ser comparado a modelos existentes e deve tomar como base de sustentação os resultados obtidos experimentalmente com um conversor real, portanto, seu desempenho é comparado com dados obtidos desta forma.

5.4 - REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO LINOR

O CEE básico para os conversores assíncronos lineares, ou seja, o circuito em que não foram introduzidas as correções relativa ao Efeito Longitudinal de Extremidade, pode variar dependendo do tipo de construção do linor, que pode ser feito unicamente de uma lâmina de cobre ou alumínio (Fig. 5.2(a)), ou pode ser construído através da união de uma lâmina ferro recoberta por lâminas de alumínio ou cobre (Fig. 5.2(b)), sendo esta última solução mais semelhante aos rotores das máquinas rotativas, com entreferros relativamente pequenos, porém, de custo muito superior.

O CAL mostrado na Figura 5.2(a), possui a mesma topologia utilizada nas análises teóricas da densidade de campo magnético no entreferro desenvolvida em capítulos anteriores. Esta topologia permite afirmar, dado a ausência de ferro no circuito linórico do conversor, que a reatância de dispersão do

linor é muito pequena e pode ser desprezada [3][4][11][12].

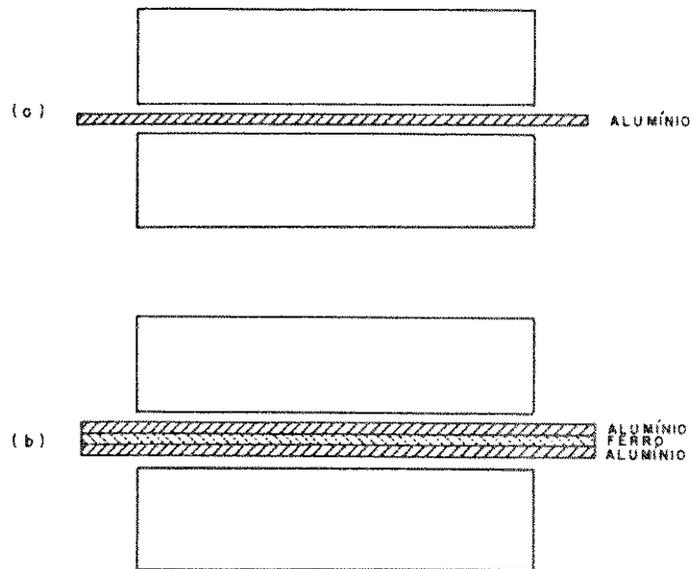


Figura 5.2 - Conversores Assíncronos Lineares com dois indutores - (a) linor simples (alumínio) (b) linor composto (ferro e alumínio)

Assim CALs com linor formado unicamente por uma lâmina de material condutor podem ter seu circuito elétrico equivalente, como o mostrado na Figura 5.3, onde o circuito do linor, visto a

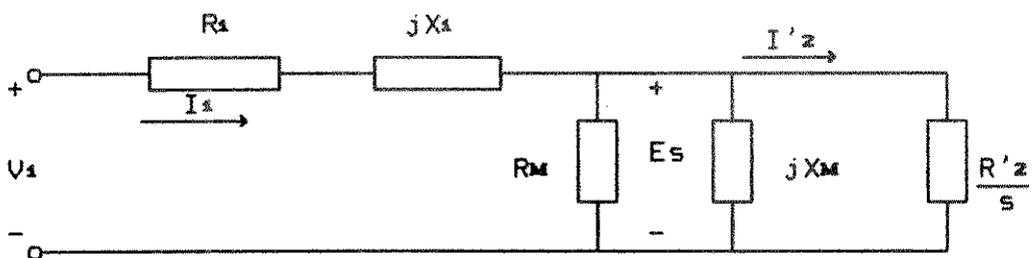


Figura 5.3 - CEE para conversores com secundário composto unicamente por alumínio ou cobre.

partir do estator, é representado unicamente pela resistência $R'z$, modificada pelo escorregamento do CAL. Devido as características especiais do linor, este parâmetro, $R'z$, sofre a influência do Efeito Transversal de Borda, que deve ser levado em conta em sua determinação.

O Efeito Transversal de Borda pode ser introduzido no CEE através da modificação da resistividade do condutor linórico, sendo que, na maioria dos casos, a partir do fator k_s , desenvolvido na equação (2.44).

Em resumo, a reatância de dispersão do linor, para a configuração escolhida, pode ser desprezada chegando-se a um circuito elétrico equivalente mais simples.

5.5 - PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

No estabelecimento dos parâmetros do circuito elétrico equivalente dos CALs [4], pode-se calcular todos os parâmetros do circuito elétrico mostrado na Figura 5.3, utilizando equações características dos conversores assíncronos rotativos [14][16], procedendo-se, posteriormente, a devida correção deste circuito, por conta dos efeitos de extremidades.

Todos os cálculos apresentados são para um conversor assíncrono linear que opera com apenas um estator ativo, observado através de um modelo 'por fase', operando com corrente eficaz constante e tensão variável com o ponto de operação.

Demonstrar-se-á adiante, que os parâmetros obtidos para o conversor operando com um estator ativo, podem ser utilizados para o conversor operando com dois estatores ativos, ligados em

série e operando face a face.

5.5.1 - RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO ESTATÓRICO

Estabelecida a hipótese de que o conversor opera com corrente eficaz constante (I_F) por fase, a resistência de uma fase do enrolamento do estator pode ser calculada a partir da equação:

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{l_1}{S_1} \quad (5.1)$$

sendo ρ_1 a resistividade volumétrica dos condutores de estator na temperatura de operação do conversor, l_1 o comprimento dos condutores de uma fase e S_1 a área dos condutores.

Considerando que cada estator do CAL possua N_f condutores ativos por fase, ou seja, N_f representa o dobro do número de espiras por fase, o comprimento médio de um condutor ativo é dado por:

$$l_m = c + l_{cb} \quad (5.2)$$

sendo c a largura do bloco estatórico e l_{cb} o comprimento da 'testa de bobina' que para condutores cilíndricos, apresenta um valor variável com a forma do enrolamento, ficando normalmente na faixa: $1,4 \cdot t_p \leq l_{cb} \leq 1,8 \cdot t_p$ (condutores circulares).

A densidade superficial de corrente, normalmente uma característica importante a nível de projeto, é dada pela relação entre a corrente eficaz por fase e a área do condutor:

$$df = \frac{IF}{S_s} \quad (5.3)$$

Utilizando-se das equações (5.2) e (5.3) e expressando o número de condutores ativos N_f através da densidade linear de corrente de estator J_s , escreve-se:

$$J_s = \frac{3.N_f.IF.k_w}{p.t_p} \quad (5.4)$$

$$R_s = \frac{\rho_t.d_f.J_s.p.t_p.(c + l_{cb})}{3.IF^2.k_w} \quad (5.5)$$

sendo p o número de pólos do conversor, t_p o passo polar e k_w o fator de enrolamento do estator.

A equação (5.5) expressa a resistência elétrica 'por fase' dos condutores de estator, sendo dependente da temperatura de operação do enrolamento e de corrente operacional.

5.5.2 - REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO ESTATOR

A reatância de dispersão de indutor pode ser apresentada como sendo a composição de três parcelas principais: a reatância de dispersão na região das ranhuras (X_r), a reatância de dispersão de 'testa de bobina' (X_f) e pela reatância diferencial (X_d). Assim, a reatância de dispersão do estator pode ser expressa, por:

$$X_s = X_r + X_f + X_d \quad (5.6)$$

A reatância de dispersão na região das ranhuras (X_r) ocorre devido ao fluxo magnético que não atravessa o entreferro e se fecha através de cada ranhura do estator formando linhas de fluxo que envolvem os condutores de estator. A reatância de dispersão X_r pode ser calculada [16] através da equação:

$$X_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot c \cdot N^2}{p \cdot q} \cdot \lambda_r \quad (5.7)$$

sendo f a frequência do sinal de alimentação do estator, q o número de ranhuras por pólo e por fase e λ_r a permeância específica de dispersão que depende da geometria da ranhura do estator.

Para a ranhura mostrada na Figura 5.4, a permeância específica pode ser calculada pela equação:

$$\lambda_r = \left[\frac{h_5}{a_1} + \frac{2 \cdot h_4}{(a_1 + a_2)} + \frac{h_3}{a_2} \right] \quad (5.8)$$

sendo h_5 , h_4 , h_3 , a_1 e a_2 dimensões da ranhura apresentada na Figura 5.4.

A reatância de dispersão nas partes frontais da bobina, ou seja, na 'testa de bobina' (X_f) está associada ao fluxo de

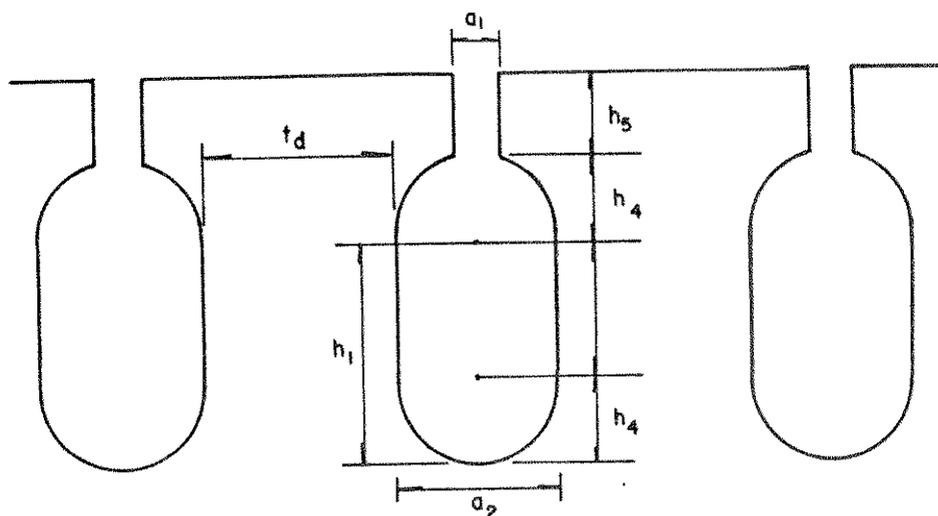


Figura 5.4 - Ranhuras do Estator do CAL

dispersão que ocorre nos condutores situados fora do núcleo estatórico, sendo calculada [17], por:

$$\chi_f = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot N^2}{p} \cdot \lambda_s \quad (5.9)$$

onde λ_s é a permeância do circuito frontal das bobinas e é calculada, por:

$$\lambda_s = t_p \cdot \left[0,3 \cdot \left(\frac{3 \cdot t_b}{t_p} - 1 \right) \right] \quad (5.10)$$

sendo t_p o passo polar e t_b o passo de bobina do enrolamento de estator do CAL.

A reatância de dispersão diferencial (X_d) representa a parcela de fluxo que circula pela região do entreferro situada na abertura de ranhura e pelos dentes do estator. Esta parcela da reatância de dispersão pode ser calculada [17], a partir de:

$$X_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot c \cdot N^2}{p \cdot q} \cdot \lambda_t \quad (5.11)$$

$$\lambda_t = \frac{\left[\frac{5 \cdot g}{a_1} \right]}{5 + \left[\frac{4 \cdot g}{a_1} \right]} \quad (5.12)$$

A reatância de dispersão diferencial calculada através das equações (5.11) e (5.12), é relativamente pequena, na maioria dos casos, se comparada com a reatância de 'testa de bobina' e com a reatância de dispersão da região das ranhuras (X_r), que em relação as duas anteriores é a que apresenta a maior magnitude.

5.5.3 - RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE PERDAS NO FERRO

Para os CALs, as perdas no ferro ficam restritas aos blocos estatóricos, uma vez que o linor é composto, na maioria dos casos, unicamente por uma lâmina de alumínio ou cobre (Figura 5.2a). Estas perdas estão associadas diretamente a densidade de campo magnético com que o conversor opera e com a frequência do sinal de alimentação. Assim, para frequências baixas (50-60 Hz),

pode-se afirmar que os conversores operam com pequenas perdas no ferro, uma vez que os mesmos operam com densidades de campo magnético muito menores que as normalmente observadas nas máquinas rotativas de indução convencionais. Alguns autores apresentam a variação da densidade de campo magnética como restrita a faixa de 0,1 a 0,4 Tesla [1][10][15].

As perdas no ferro, para o modelo por fase, podem ser calculadas a partir da densidade média de campo magnético com que o conversor opera, do tipo de chapas utilizadas em sua construção e do volume dos estatores:

$$W_F = \frac{\omega_F \cdot \gamma_F \cdot Vol}{3} \quad (5.13)$$

sendo W_F as perdas no ferro por fase (watts), ω_F a perda específica da chapa de ferro utilizada (watts/kgf), γ_F o peso específico da chapa de ferro (kgf/m^3) e Vol o volume dos blocos estatóricos (m^3).

A resistência equivalente R_M , associada as perdas no ferro, pode ser calculada conhecendo-se a tensão aplicada ao ramo de magnetização (Figura 5.1):

$$R_M = \frac{E_F^2}{W_F} \quad (5.14)$$

A tensão aplicada ao ramo magnetizante E_F , expressa em

função dos parâmetros do conversor leva à equação:

$$R_M = \frac{(2,22.kw.f.Nf.tp.c.Bav)^2}{W_F} \quad (5.15)$$

sendo B_{av} o valor médio da densidade de campo magnético.

A equação (5.15) permite o cálculo da resistência que simula as perdas no ferro (perdas por correntes de Foucault e perdas por histerese), a partir do conceito de 'perdas por unidade de peso', para o modelo por fase..

5.5.4 - REATÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO

A reatância de magnetização X_M , é de grande importância no estudo de qualquer tipo de conversor, pois, normalmente as perdas no ferro são pequenas e, a corrente de excitação dos conversores, praticamente se resume à corrente que circula por esta reatância.

A reatância de magnetização para os CALs pode ser calculada a partir de equações desenvolvidas para os conversores assíncronos rotativos [16], ficando na forma:

$$X_M = \frac{6.\mu_0.f.tp.c.(kw.Nf)^2}{\pi.p.g.kc} \quad (5.16)$$

sendo g o entreferro, p o número de pólos e K_c o fator de Carter.

A equação (5.16) permite observar que a reatância de magnetização para os CALs é inversamente proporcional ao comprimento do entreferro e ao número de pólos, porém, o fator de potência fica ligado diretamente ao comprimento do entreferro, sendo tanto melhor, quanto menor for o entreferro. Mudanças no número de pólos (p), levam a uma mudança no número de condutores ativos (N_f). Portanto, o fator de potência tende a aumentar com o aumento do número de pólos do conversor.

5.5.5 - RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DO LINOR

A resistência equivalente do linor, observada a partir do estator R'_z , pode ser calculada supondo-se um rotor laminar onde à cada linha de corrente induzida na lâmina, corresponde uma barra de uma 'gaiola de esquilo'. A resistência desta barra hipotética pode ser calculada de forma semelhante à utilizada para o cálculo da resistência de estator (R_s). A resistência equivalente do linor refletida no estator pode ser calculada [4], através da equação:

$$R'_z = 3 \cdot \frac{c \cdot \rho_r \cdot (k_w \cdot N_f)^2}{p \cdot t_p} \quad (5.17)$$

sendo ρ_r a resistividade superficial da lâmina móvel (linor).

A equação (5.17) permite calcular a resistência equivalente do linor a partir de elementos observados no estator e do material de que é feito o próprio linor.

A resistividade ρ_r é de importância fundamental no estudo dos CALs, pois a ela estão associados fenômenos como o Efeito Transversal de Borda, que se caracteriza por um comportamento particular das correntes induzidas na lâmina linórica. Este comportamento pode ser introduzido no circuito elétrico através de um aumento na resistividade superficial do linor, como foi mostrada em capítulo anterior, através do fator k_s (equação 3.1). Dessa forma, a resistividade superficial do linor considerando-se o Efeito Transversal de Borda [9], é:

$$\rho_c = \frac{\rho_r}{k_s} \quad (5.18)$$

A resistência equivalente do linor $R'z$, considerando a correção do Efeito Transversal de Borda é expressa, por:

$$R'z = 3 \cdot \frac{c \cdot \rho_c \cdot (k_w \cdot N_r)^2}{p \cdot t_p} \quad (5.19)$$

A resistência equivalente de linor, calculada pela equação (5.19), sofre influência direta da temperatura de operação do mesmo, assim, a resistividade volumétrica (ρ_v), utilizada para o cálculo da resistividade superficial (ρ_r), deve levar em consideração tal temperatura, ou seja, a resistividade é um parâmetro que é função da temperatura.

5.6 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA DOIS ESTADORES ATIVOS

Os parâmetros calculados anteriormente, para um CAL operando com um estator ativo, podem ser utilizados para CALs

que operam com dois estatores ativos, ou seja, com dois estatores dotados de enrolamentos trifásicos.

A operação mais comum e mais indicada, devido a problemas de equilíbrio de corrente, é a operação série, onde os enrolamentos dos estatores são ligados em série, de modo que a corrente que percorre os enrolamentos é a mesma, para os dois estatores, por fase. A operação de dois estatores em paralelo foi estudada por diversos pesquisadores [6][17], que concluíram ser esta operação complexa e de resultados pouco satisfatórios quando comparadas a operação de estatores em série. Nesta situação, o circuito elétrico equivalente fica representado pela Figura 5.5, que mostra os dois CEE ligados em série.

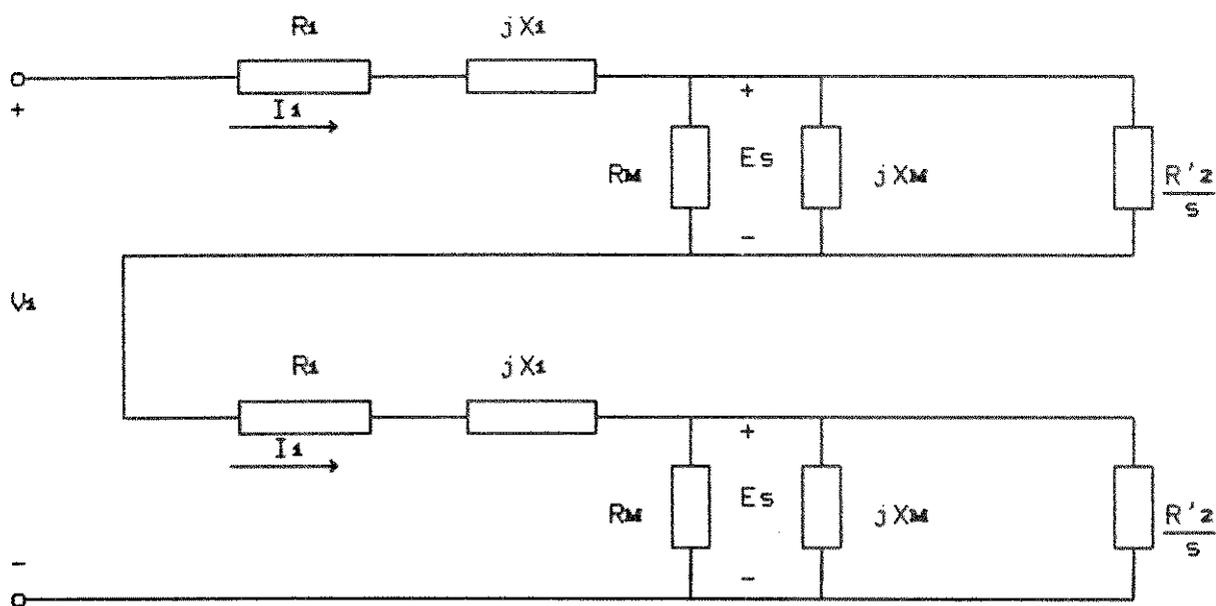


Figura 5.5 - CEE para conversores operando com dois estatores ativos ligados em série

O circuito mostrado na Figura 5.5, para um CAL operando

com dois estatores ativos ligados em série, com parâmetros calculados através das características construtivas do conversor operando com um estator ativo, pode ser simplificado, através da análise das equações que definem seus parâmetros e da configuração do próprio circuito, para um novo circuito equivalente único, como o mostrado na Figura 5.6. Neste novo circuito a resistência e a reatância de dispersão de estator (R_1 e X_1) são multiplicadas por dois, e os parâmetros do ramo magnetizante (R_M e X_M) e do ramo de força ($R'z$), são multiplicadas por quatro [6], pois, a densidade de fluxo no entreferro dobra para esta nova configuração. Portanto, o circuito equivalente final apresenta a mesma forma, tanto para operação com um estator quanto para operação com dois estatores, e as equações para determinação dos parâmetros permanecem as mesmas.

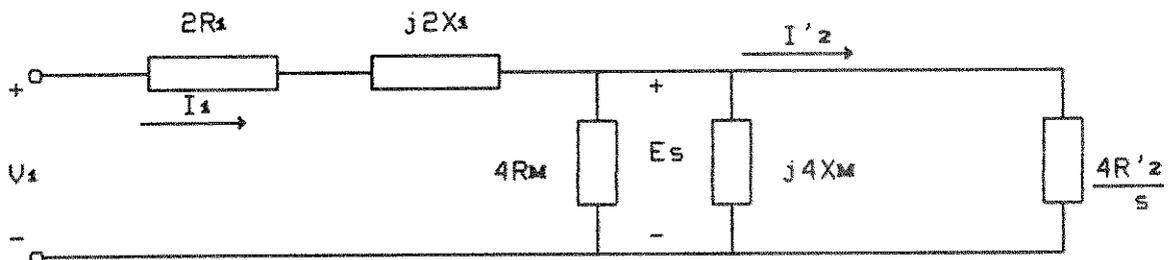


Figura 5.6 - CEE resultante para conversores operando com dois estatores ativos

O CEE mostrado na Figura 5.6 possui resistência equivalente do linor calculada segundo equação 5.19, que considera a resistividade da lâmina móvel aumentada pelo fator k_s , ou seja, considera a influência do Efeito Transversal de

Borda no funcionamento do CAL.

5.7 - INTRODUÇÃO DO EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE NO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

A influência do Efeito Longitudinal de Extremidade é, juntamente com o Efeito Transversal de Borda, responsável por modificações importantes no comportamento dos CALs. Um circuito elétrico equivalente que se proponha a estudar o comportamento destes conversores deverá considerar este efeito.

A introdução deste fenômeno no CEE é proposta no Capítulo 4, através da redução da tensão sobre o ramo de magnetização (E_s). A tensão E_s é alterada nos CALs devido ao comportamento da densidade de campo magnético em seu entreferro, que pode ser analisada como sendo composta por duas ondas: uma onda normal de campo B_s e uma onda de campo de Efeito de Extremidade de Entrada B_1 . Assim, a tensão sobre o ramo de magnetização é composta também por duas componentes originadas de B_s e B_1 .

O fator k_e , apresentado no Capítulo 4, relaciona as duas componentes de tensão, permitindo que se apresente no circuito uma única componente de tensão E_s , porém, modificada por k_e , que depende de características físicas do conversor, do escorregamento e do ângulo entre as componentes de campo.

Sendo E_M a fem, em valor eficaz, resultante da soma das tensões E_s (normal) e E_1 (Efeito Longitudinal de Extremidade), a tensão sobre o ramo magnetizante resulta:

$$E_M = (1-k_e) \cdot E_s \quad (5.20)$$

A tensão sobre o ramo magnetizante, levando em conta o Efeito Longitudinal de Extremidade, pode ser introduzida no circuito através de uma nova impedância, com comportamento variável com o ponto de operação da máquina, dado por k_e (equação 4.25). Supondo uma nova impedância Z_e colocada em paralelo com o ramo de magnetização, a tensão E_M , considerando esta nova impedância, vale:

$$E_M = \frac{Z_e \cdot Z_i}{Z_e + Z_i} \cdot I_1 \quad (5.21)$$

onde Z_i é a impedância equivalente da associação dos elementos do ramo magnetizante (R_M e X_M) e do ramo de força ($R'z/s$).

Sabendo-se ainda que a tensão sobre o ramo magnetizante na ausência de do Efeito Longitudinal de Extremidade, está relacionada apenas com a impedância Z_i , escreve-se:

$$E_s = Z_i \cdot I_1 \quad (5.22)$$

Associando-se as equações (5.20), (5.21) e (5.22), encontra-se a impedância de efeito de extremidade Z_e :

$$Z_e = \frac{1-k_e}{k_e} \cdot Z_i \quad (5.23)$$

A impedância Z_e , dada pela equação (5.23), introduz no circuito elétrico equivalente dos CALs a influência do efeito de extremidade, modificando a força teórica calculada a partir do circuito, com a finalidade de aproximar a resposta deste circuito com o desempenho real dos conversores lineares.

O circuito equivalente, agora com a nova impedância Z_e , fica com a configuração mostrada na Figura 5.7.

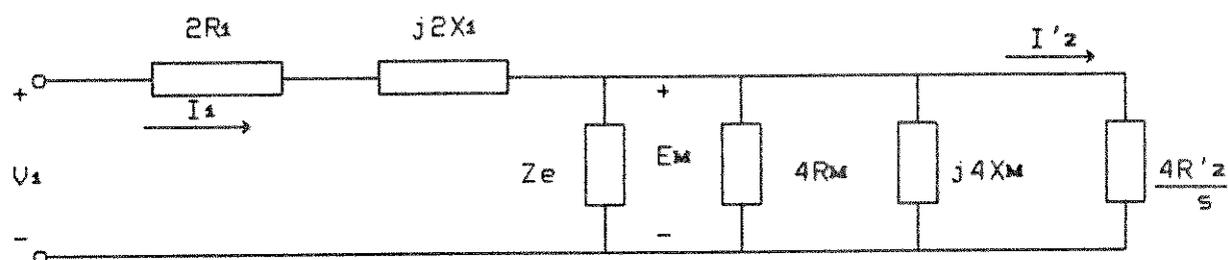


Figura 5.7 - CEE considerando a influência do Efeito Longitudinal de Extremidade (Z_e)

O circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 5.7, para conversores operando com dois estatores ativos, leva em conta o Efeito Transversal de Borda, através da modificação da resistividade da lâmina linórica, modificando a resistência equivalente do linor ($R'z$). O Efeito Longitudinal de Extremidade é levado em conta através da impedância colocada em paralelo com o ramo de magnetização (Z_e), que possui um comportamento determinado pelas características do conversor (entreferro, resistividade linórica, velocidade, etc), contidas no fator k_e .

A Figura 5.8 mostra a força propulsora para um CAL com dois estatores ativos, linor de alumínio e velocidade síncrona de

15 m/s, obtida através de um CEE desprezando-se o Efeito Longitudinal de Extremidade (curva 1) e a força propulsora obtida através de um CEE com a impedância Z_e , ou seja, considerando-se a

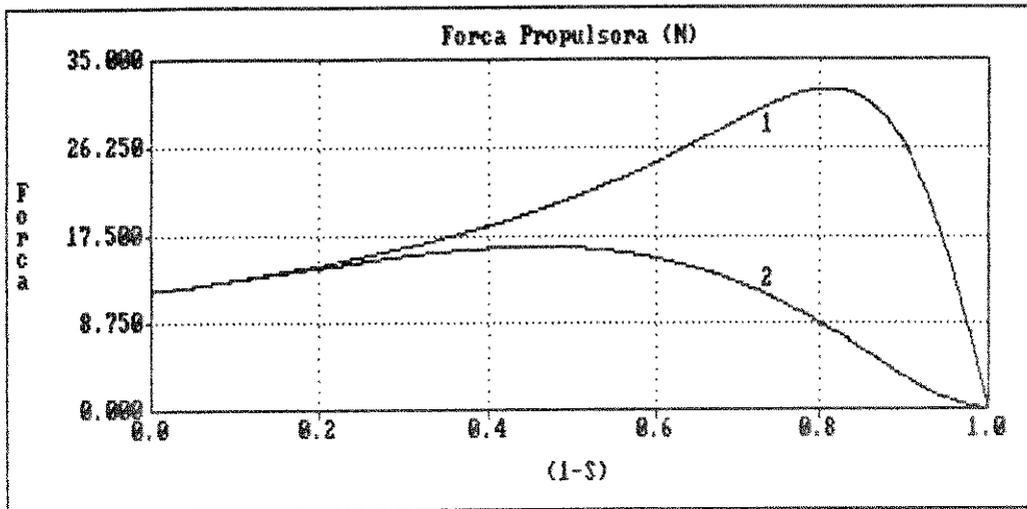


Figura 5.8 - Força Propulsora: (1) Circuito sem impedância Z_e
(2) Circuito com impedância Z_e .

atuação do Efeito Longitudinal de Extremidade (curva 2). Nesta Figura, pode-se observar que o Efeito Longitudinal de Extremidade provoca uma forte redução na força máxima e uma grande redução da força propulsora na região de altas velocidades ($s \rightarrow 0$) e, para baixas velocidades ($s \rightarrow 1$), sua atuação é praticamente insignificante. Esta característica está ligada ao comportamento da impedância Z_e e por conseguinte ao comportamento do fator k_e (Cap. IV, Figura 4.1), que para baixas velocidades não apresenta magnitude significativa ($k_e \rightarrow 0$).

5.8 - PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DIGITAL

Durante todo o desenvolvimento do trabalho, a simulação digital foi uma importante ferramenta para a compreensão de equações, levantamento de características e, principalmente, para a análise e observação do circuito elétrico equivalente desenvolvido.

Inicialmente, diversos "pacotes" computacionais foram utilizados para a geração de gráficos e para o cálculo das mais diversas características do conversor, dada a grande facilidade de manipulação e a boa qualidade do resultado obtido. Porém, dificilmente um único "pacote" atendia simultaneamente a todas as necessidades do trabalho, gerando um problema adicional para o gerenciamento de todos os programas envolvidos.

Desta forma, foi necessário o desenvolvimento de um programa computacional que além de realizar os cálculos exigidos, possuísse uma saída gráfica de boa qualidade, com tempos de compilação e processamento adequados. A linguagem escolhida para o programa foi o BASIC compilado.

O programa desenvolvido, com aproximadamente 950 linhas e chamado de LINEAR, possui uma série de subrotinas, que são utilizadas durante sua execução, para cálculos "básicos" e "auxiliares" e para a saída gráfica.

Nas rotinas de cálculos básicos estão aquelas que fazem a manipulação de números complexos, a conversão de unidades e a verificação dos valores calculados.

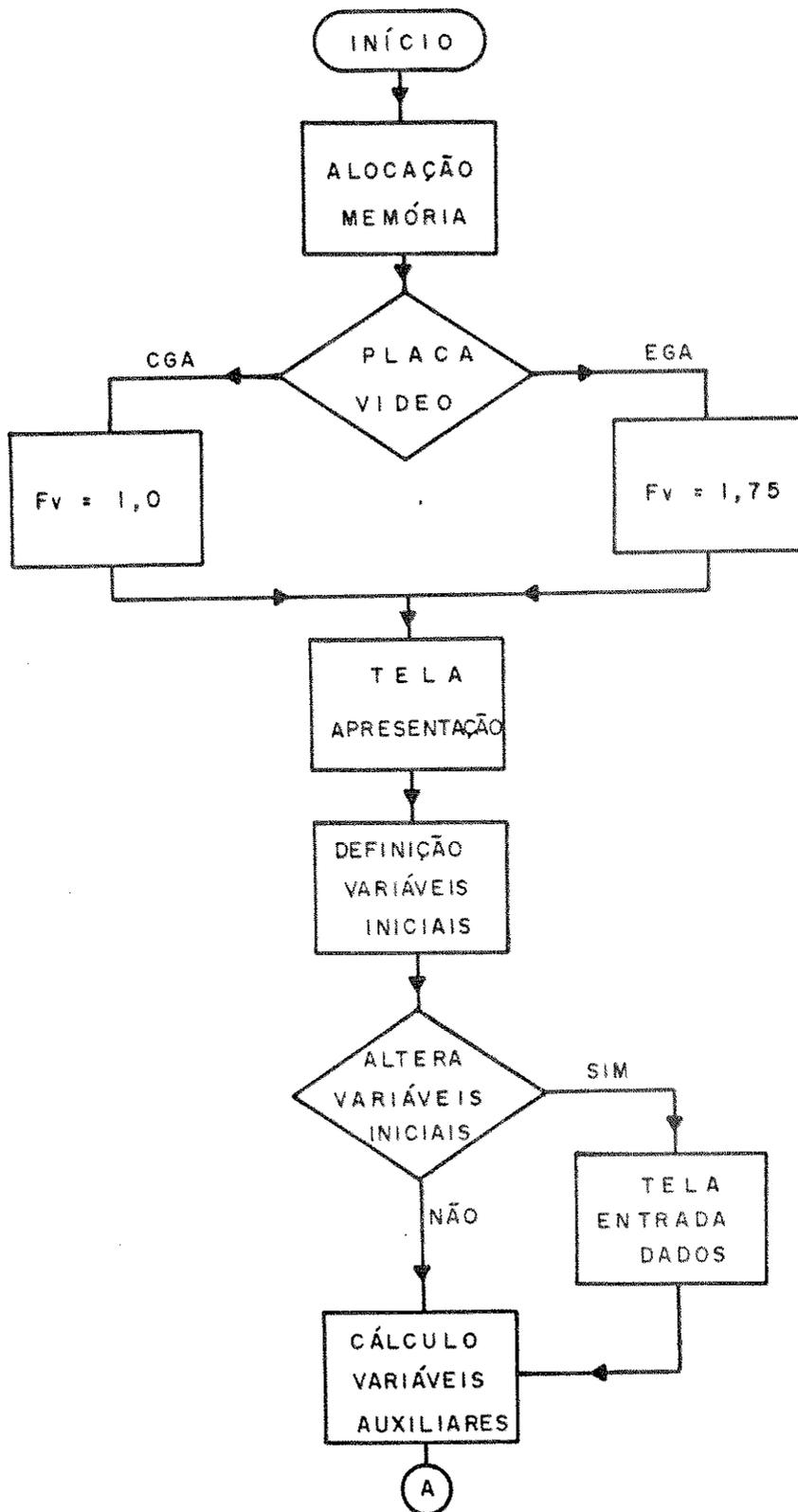
As rotinas auxiliares são aquelas que permitem que o programa faça a simulação do CAL com um grau maior de sofisticação de cálculo, como por exemplo, o cálculo da variação da resistividade superficial da lâmina linórica e da variação da

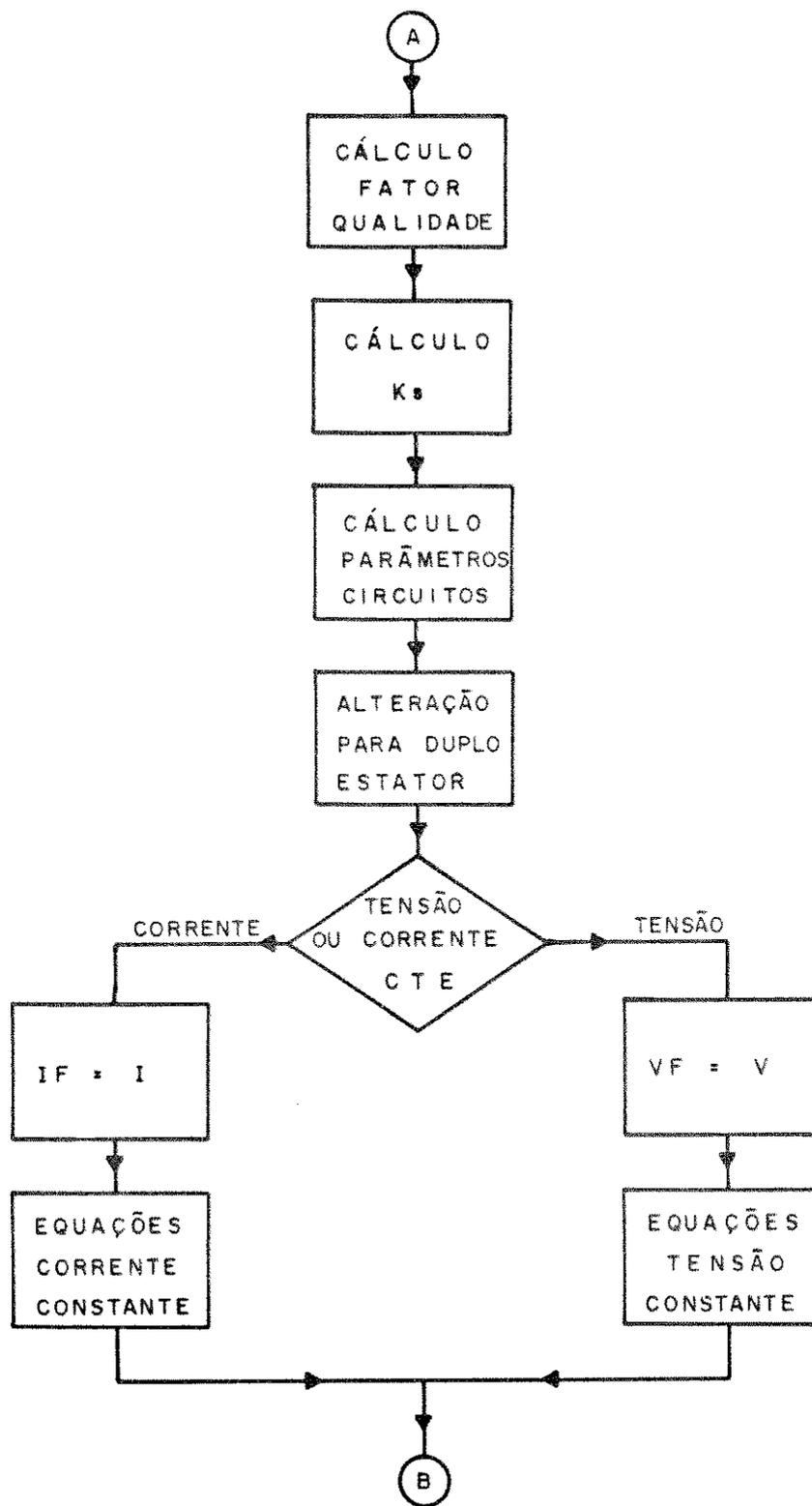
reatância de magnetização com o escorregamento, o cálculo do ângulo delta e o cálculo da força propulsora por métodos distintos [11].

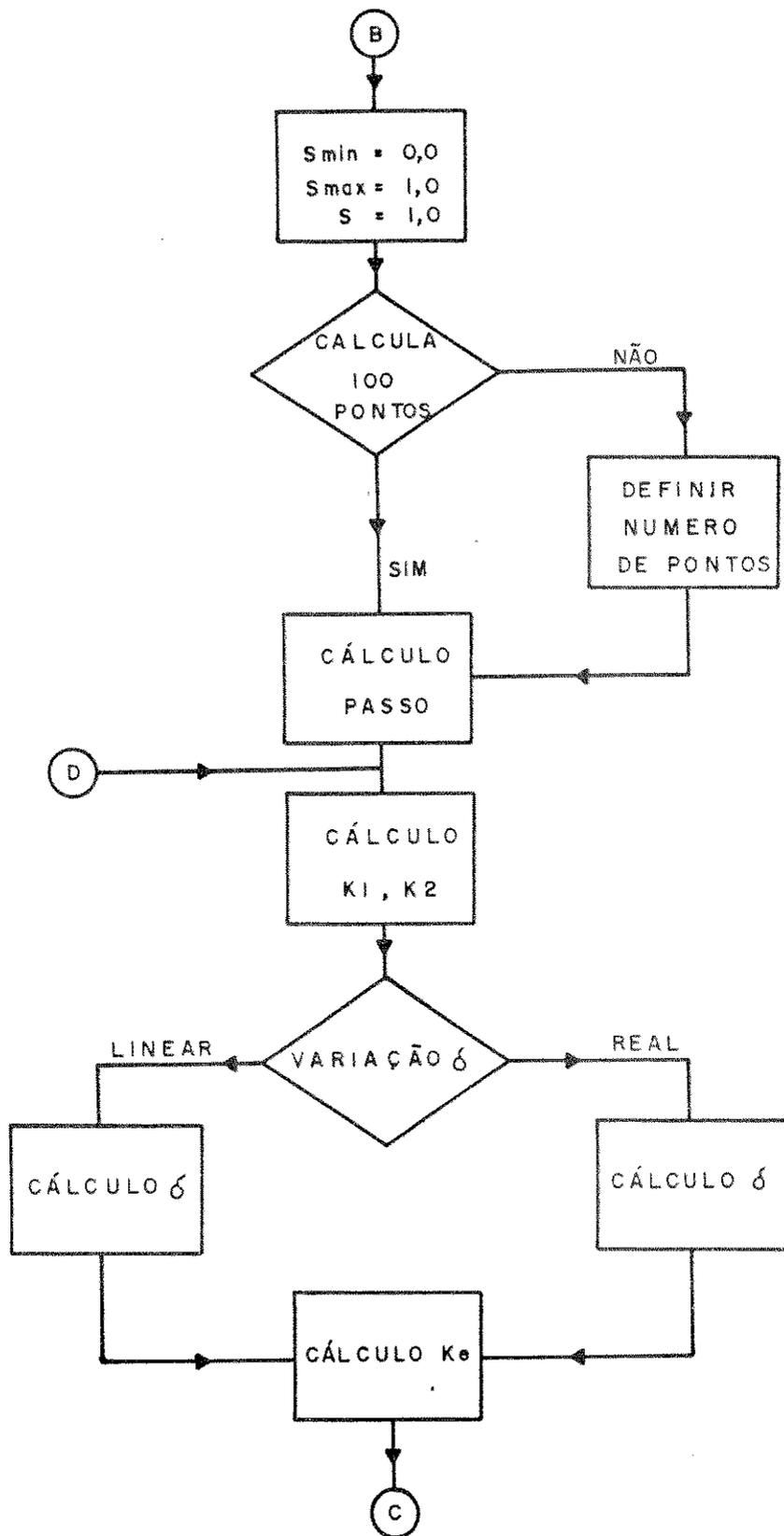
A rotina que gerencia a saída gráfica foi desenvolvida para apresentar até três curvas e uma partida de pontos experimentais simultaneamente na tela do computador (ou impressora). Estas curvas são apresentadas após ao processamento do programa que possui um número mínimo de 100 iterações. As curvas podem ser numeradas e os gráficos podem receber títulos e as escalas podem ser alteradas pelo operador.

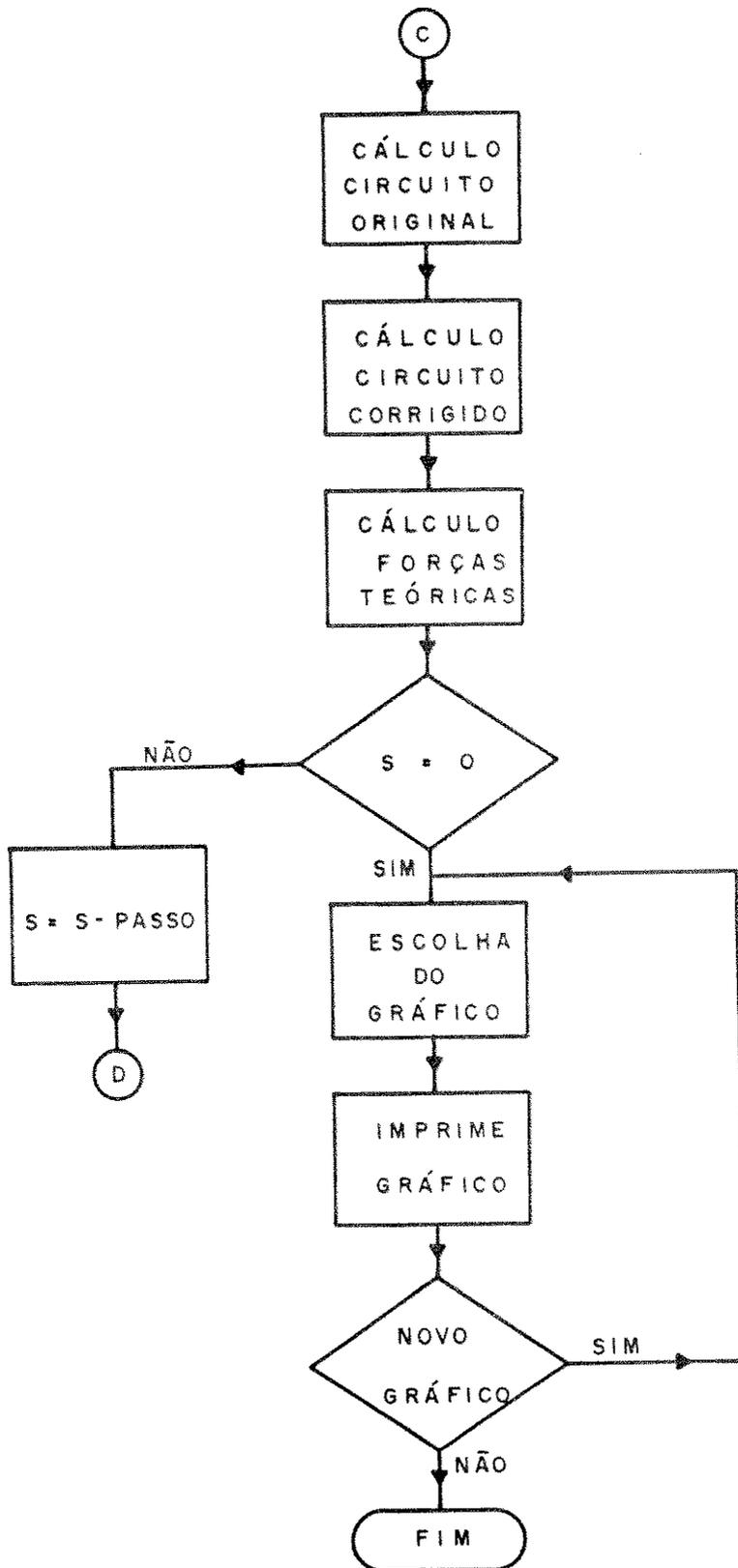
O programa permite que os cálculos sejam executados para operação com corrente constante e com tensão constante, além de possuir uma chamada inicial onde é possível alterar algumas características de operação como: entreferro, temperatura da lâmina linórica e temperatura do enrolamento, que podem variar de acordo com a operação do conversor.

Para melhor compreensão é apresentado a seguir um fluxograma do programa desenvolvido:









CAPÍTULO 6

DESEMPENHO DO CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR EM LABORATÓRIO

6.1 - INTRODUÇÃO

Os resultados obtidos com o modelo matemático apresentado no Capítulo 5 foram confrontados com os resultados experimentais obtidos em laboratório com um CAL construído com dois estatores ativos e linear na forma de um disco de alumínio (Figura 6.1).

A frequência do sinal de alimentação é a própria frequência da rede (60 Hz), permitindo-se afirmar que a mesma manteve-se inalterada durante todos os ensaios realizados e que a velocidade de translação síncrona, função da frequência e do passo polar, também manteve-se inalterada.

De forma concordante com o modelo matemático desenvolvido, o CAL foi alimentado com corrente eficaz constante e, para fins de observação, um ensaio com tensão eficaz constante, também foi realizado.

Tanto o modelo matemático como os resultados obtidos em laboratório, confirmam a forte atenuação da força propulsora provocada pelo Efeito Longitudinal de Extremidade, levando a um baixo rendimento do conversor.

Algumas características como fator de potência e

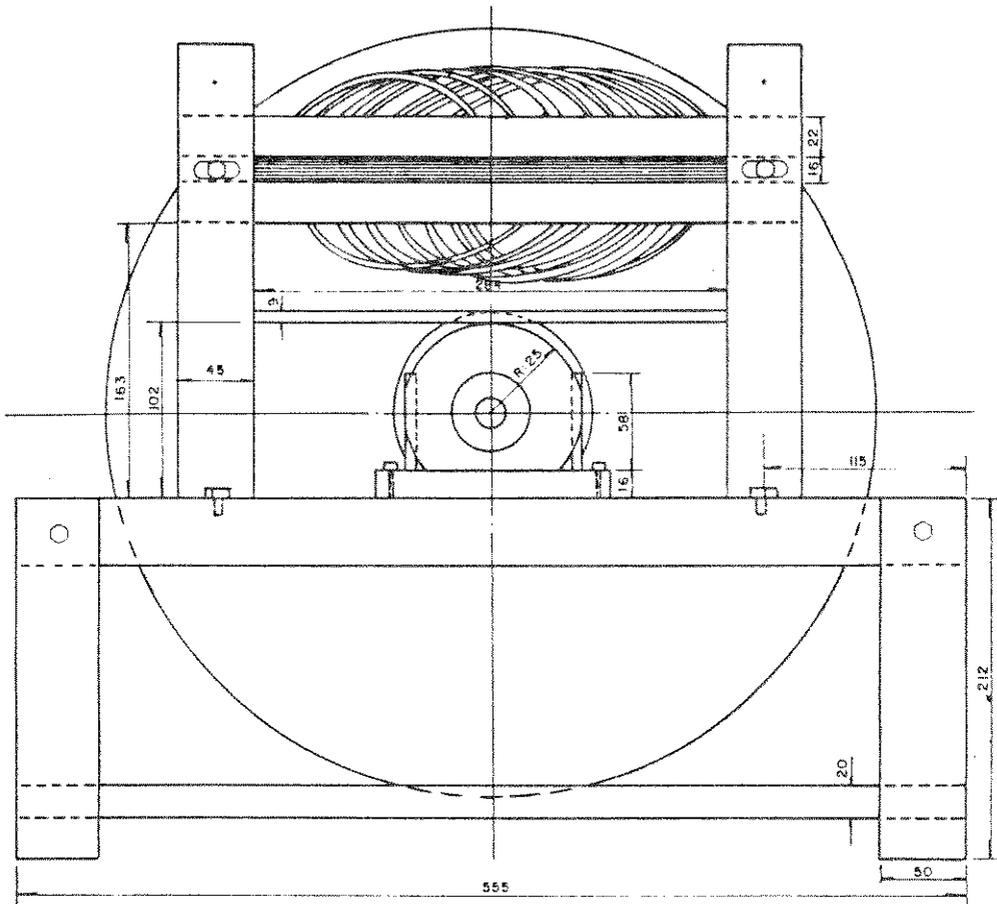


Figura 6.1 - Vista Frontal do CAL Construído para Ensaio
em Laboratório

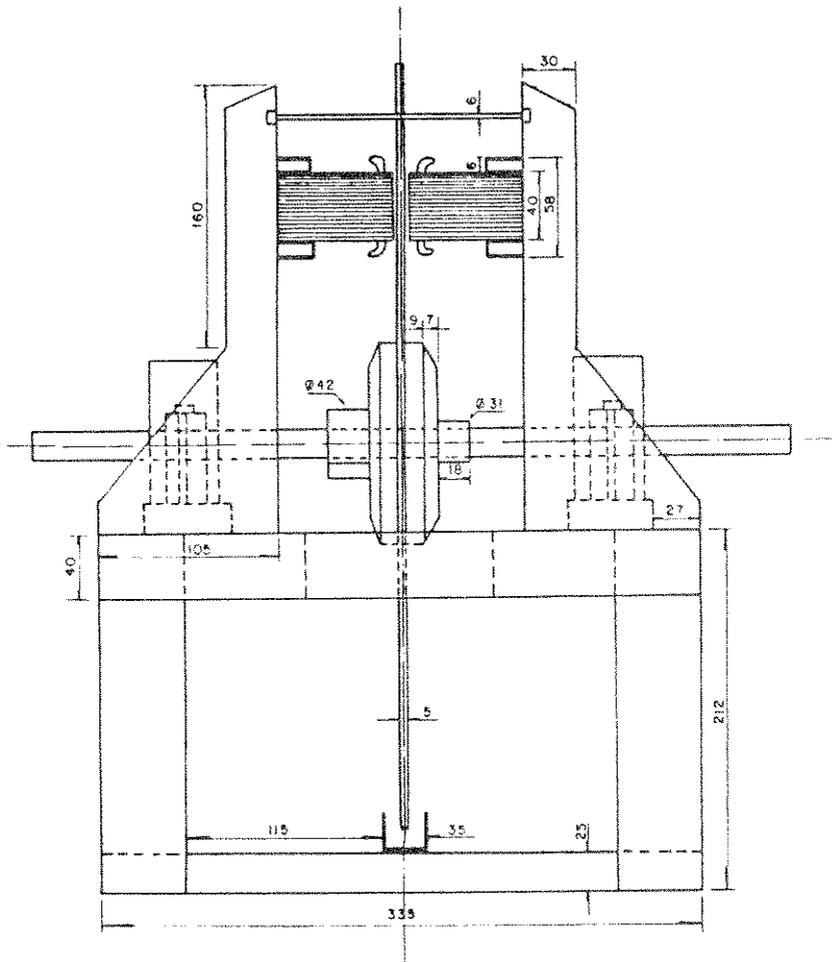


Figura 6.2 - Vista Lateral do CAL Construído para Ensaaios em Laboratório

rendimento também são apresentados e comparados com o modelo desenvolvido.

6.2 - ALIMENTAÇÃO COM CORRENTE EFICAZ CONSTANTE

No Capítulo 2, observou-se que a corrente de fase (I_F), e a densidade linear de corrente (J_S), são importantes instrumentos de controle no desenvolvimento do Modelo Unidimensional. Dessa forma, os enrolamentos do CAL podem ser substituídos por lâminas de corrente.

Porém, devido ao Efeito Longitudinal de Extremidade Estático, as correntes de fase do CAL são diferentes, sendo que, nos conversores com pequeno número de pólos esta diferença se mostra mais acentuada, levando a diferenças significativas entre as correntes das fases.

O Efeito Longitudinal de Extremidade (Dinâmico), também atua no sentido de modificar as correntes (com o aumento da velocidade de translação do linor), modificando-as de forma particular para cada sentido de translação.

Como o CAL construído para os ensaios de laboratório opera com dois pólos (Apêndice I), todos os efeitos acima descritos são observados, impondo a adoção de um controle rigoroso da corrente de alimentação.

Para controlar a corrente, o CAL foi alimentado com uma corrente constante, obtida pela média quadrática das correntes das três fases [2], esta corrente denominada de I_F é calculada de acordo com a equação (6.1):

$$I_F = \left[\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3} \right] \quad (6.1)$$

onde I_a , I_b e I_c são correntes de fase do CAL.

6.3 - BANCADA DE MEDIÇÃO

Os ensaios foram realizados utilizando-se um autotransformador trifásico com tensão de saída regulável como fonte de alimentação.

Foram utilizados três amperímetros, três voltímetros e, para a avaliação de potência, foram também utilizados três wattímetros, para melhor observar o comportamento das fases do conversor.

Para o levantamento de forças foi utilizado um freio de Prony, adaptado à polia V, com braço de equilíbrio, como mostrado na Figura 6.3, e um dinâmetro de 2 kgf, sendo as velocidades determinadas com o auxílio de um tacômetro digital e as temperaturas com termômetro de contato [Apêndice V].

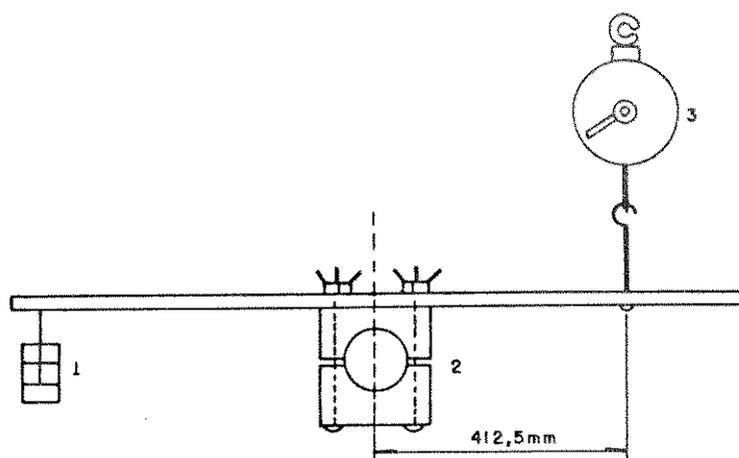


Figura 6.3 - Freio de Prony

Devido ao fato do linor ser construído em forma de disco, onde as velocidades tangenciais de pontos da placa de alumínio entre os estatores variam com o raio, admitiu-se que as forças propulsoras e velocidades de translação estavam associadas a um ponto central do estator, sendo o raio deste ponto utilizado para os cálculos [17].

6.4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com os instrumentos descritos anteriormente, foram levantados em laboratório três grupos de medições com corrente média constante : 5, 6 e 7 A. Para a característica tensão constante foi realizado um ensaio com tensão de fase de 48 V. Em todos os ensaios a velocidade linear síncrona permaneceu constante ($V_{sx} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot f = 15 \text{ m/s}$).

6.4.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ALIMENTAÇÃO À CORRENTE
CONSTANTE DE 5,0 A

Tabela 6.1 - Valores Experimentais - $I_F = 5,0$ A

I_F (A)	V_M (V)	W_F (W)	1-S	F (N)	$\cos \phi$	$w(\frac{rad}{s})$	η
5,06	29,03	115,00	0,00	7,81	0,78	0,00	0,00
5,08	36,52	141,67	0,65	9,07	0,76	55,40	0,17
5,08	37,52	143,33	0,70	8,37	0,75	59,80	0,17
5,08	38,44	145,00	0,75	7,54	0,74	63,46	0,16
5,06	38,62	140,33	0,76	6,70	0,72	64,82	0,15
5,07	39,28	141,67	0,80	5,72	0,71	68,07	0,13
5,07	39,53	142,00	0,81	5,53	0,71	68,80	0,13
5,09	39,71	143,67	0,82	5,14	0,71	69,32	0,12
5,09	40,21	141,67	0,84	4,47	0,69	71,31	0,11
5,08	40,21	143,33	0,86	3,85	0,70	72,99	0,09
5,08	40,39	138,67	0,88	3,35	0,68	74,46	0,09
5,07	40,39	137,67	0,89	2,79	0,67	75,50	0,07
5,08	40,72	138,67	0,90	2,46	0,67	76,13	0,07
5,07	41,04	136,67	0,91	1,81	0,66	77,60	0,05
5,08	41,38	133,33	0,95	0,84	0,63	80,22	0,02
Imédia (A)							
5,08							

6.4.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ALIMENTAÇÃO À CORRENTE
CONSTANTE DE 6,0 A

Tabela 6.2 - Valores Experimentais - $I_F = 6,0$ A

I_F (A)	V_M (V)	W_F (W)	$1-S$	F (N)	$\cos \phi$	$w(\frac{rad}{s})$	η
6,03	36,72	176,67	0,00	11,39	0,80	0,00	0,00
6,01	37,03	178,33	0,16	12,28	0,80	13,93	0,05
6,01	38,87	183,33	0,27	12,84	0,78	22,83	0,08
6,01	41,37	196,67	0,45	13,95	0,79	38,43	0,13
6,06	45,86	212,00	0,65	13,54	0,76	54,77	0,17
6,04	47,20	211,67	0,70	12,56	0,74	59,48	0,17
6,04	47,87	210,00	0,75	11,16	0,73	63,88	0,16
6,04	48,54	210,00	0,77	10,47	0,72	65,45	0,16
6,04	48,54	210,00	0,80	9,49	0,72	67,44	0,15
6,02	49,38	210,00	0,82	8,37	0,71	69,64	0,13
6,03	49,88	209,00	0,84	7,40	0,69	71,63	0,12
6,03	49,88	206,67	0,85	6,42	0,69	72,47	0,11
6,03	50,22	207,00	0,88	5,58	0,68	74,46	0,10
6,01	50,22	204,00	0,90	4,60	0,68	75,92	0,08
6,03	50,80	203,33	0,91	3,49	0,66	77,60	0,06
6,03	50,89	203,33	0,91	3,77	0,66	76,97	0,07
6,03	51,22	202,67	0,92	3,07	0,66	77,91	0,06
6,04	51,47	204,00	0,94	1,81	0,66	79,48	0,03
6,04	51,73	200,33	0,95	1,26	0,64	80,63	0,02
Imédia(A)							
6,03							

6.4.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ALIMENTAÇÃO À CORRENTE
CONSTANTE DE 7,0 A

Tabela 6.3 - Valores Experimentais - $I_F = 7,0$ A

I_F (A)	V_M (V)	W_F (W)	$1-S$	$F(N)$	$\cos \phi$	$w(\frac{rad}{s})$	η
7,02	45,07	255,67	0,00	16,47	0,81	0,00	0,00
7,02	51,36	286,67	0,52	20,23	0,79	43,77	0,15
7,06	53,36	291,67	0,58	20,32	0,77	49,22	0,17
7,02	52,19	285,67	0,54	19,81	0,78	46,08	0,15
7,03	53,69	291,00	0,63	19,54	0,77	53,41	0,17
7,03	54,35	294,00	0,65	19,26	0,77	54,87	0,17
7,01	55,53	293,33	0,69	17,86	0,75	58,85	0,17
7,03	56,19	294,67	0,73	16,61	0,75	62,20	0,17
7,02	57,20	293,33	0,76	14,65	0,73	64,82	0,16
7,03	57,54	293,00	0,79	13,26	0,72	67,13	0,15
7,03	58,04	290,00	0,81	11,86	0,71	69,01	0,14
7,04	58,54	285,67	0,83	10,60	0,69	70,37	0,13
7,03	58,54	282,33	0,87	8,93	0,69	73,51	0,11
7,02	58,88	282,33	0,87	7,81	0,68	74,14	0,10
7,03	58,96	280,00	0,88	7,26	0,68	74,46	0,09
7,02	59,22	280,00	0,89	6,84	0,67	75,82	0,09
7,02	59,14	278,33	0,90	6,14	0,67	76,03	0,08
7,02	59,14	275,00	0,90	5,58	0,66	76,66	0,08
7,02	59,14	275,00	0,91	5,30	0,66	77,49	0,07
7,02	59,14	271,67	0,92	4,74	0,65	77,91	0,07
7,02	59,14	270,00	0,93	3,63	0,65	78,75	0,05
7,02	59,06	266,67	0,95	2,23	0,64	80,22	0,03
7,02	59,06	258,33	0,96	1,40	0,62	81,05	0,02
7,01	59,06	256,33	0,96	0,84	0,62	81,58	0,01
Imédia(A)							
7,03							

6.4.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ALIMENTAÇÃO À TENSÃO
CONSTANTE DE 48,0 V

Tabela 6.4 - Valores Experimentais - $V_F = 48,0$ V

I_F (A)	V_M (V)	W_F (W)	1-S	F (N)	$\cos \phi$	w ($\frac{rad}{s}$)	η
7,84	48,39	297,33	0,00	20,93	0,78	0,00	0,00
7,71	48,39	295,33	0,18	20,51	0,79	15,29	0,05
7,47	48,55	286,67	0,35	20,71	0,79	29,95	0,10
7,21	48,86	278,33	0,47	19,95	0,79	39,90	0,14
6,91	48,36	258,33	0,53	18,70	0,77	45,34	0,16
6,73	48,19	250,00	0,57	17,86	0,77	48,07	0,17
6,53	48,19	235,00	0,64	16,05	0,75	54,24	0,18
6,41	48,19	230,00	0,69	14,09	0,74	58,33	0,17
6,30	47,54	221,67	0,68	13,95	0,74	57,91	0,18
6,20	47,54	217,33	0,72	12,78	0,74	60,84	0,17
6,17	47,54	214,00	0,73	12,00	0,73	62,31	0,17
6,13	47,70	210,00	0,78	10,55	0,72	66,39	0,16
6,09	47,70	208,67	0,80	9,10	0,72	67,54	0,14
6,04	47,70	203,00	0,82	8,23	0,70	69,22	0,14
6,02	47,88	199,00	0,83	7,12	0,69	70,79	0,12
6,05	48,29	199,00	0,85	6,56	0,68	72,26	0,12
6,01	48,21	196,67	0,87	5,72	0,68	73,41	0,10
6,00	48,14	193,67	0,88	4,88	0,67	74,77	0,09
5,98	48,14	192,33	0,90	4,19	0,67	76,03	0,08
5,96	48,14	189,00	0,90	3,63	0,66	76,45	0,07
5,96	48,14	186,67	0,92	2,79	0,65	77,91	0,06
5,96	48,14	183,33	0,93	2,09	0,64	79,17	0,04
5,96	48,23	183,33	0,93	1,95	0,64	78,96	0,04
5,97	48,23	181,33	0,94	1,40	0,63	80,11	0,03
Imédia (A)				Vmédia (V)			
6,40				48,10			

6.5 - DESEMPENHO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE TRADICIONAL

Os parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente (CEE) desenvolvido para o estudo dos conversores rotativos são obtidos através de dois ensaios fundamentais: (1) Ensaio em Vazio e (2) Ensaio com Rotor Bloqueado. Quando esta metodologia é simplesmente aplicada aos CALs, o resultado obtido fica enormemente prejudicado, devido ao aparecimento do Efeito Longitudinal de Extremidade, que atua de forma diferente para cada velocidade de operação do CAL.

Para a verificação do desempenho dos circuitos tradicionais, com topologia semelhante à mostrada na Figura 5.3 (Capítulo 5), ou seja, considerando a reatância de dispersão do rotor desprezível, foram realizados os ensaios em vazio e com disco bloqueado para os diferentes valores de corrente e tensão aplicados, e foram calculados os respectivos parâmetros [Apêndice VII]. O resultado da simulação destes circuitos são apresentados e comparados com os pontos experimentais.

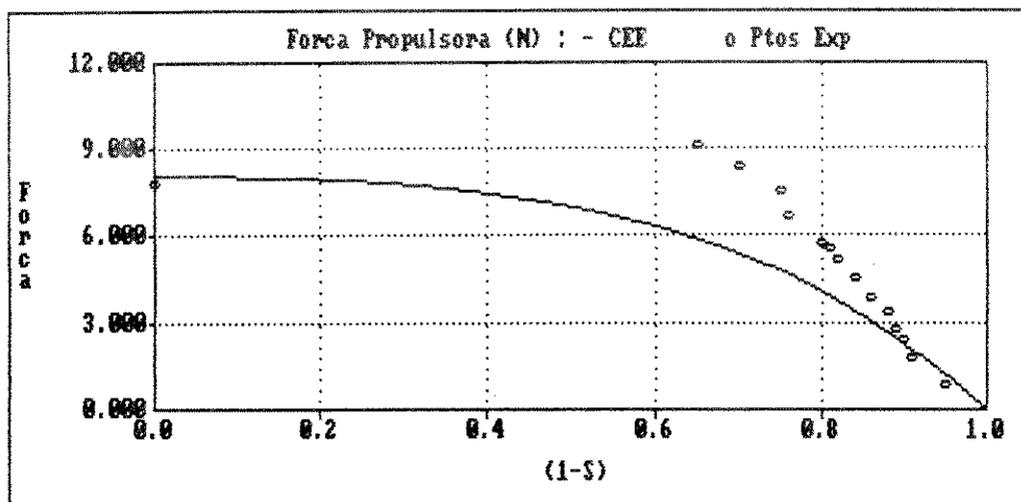


Figura 6.4 - Resposta do CEE tradicional ($I_r = 5,0$ A)

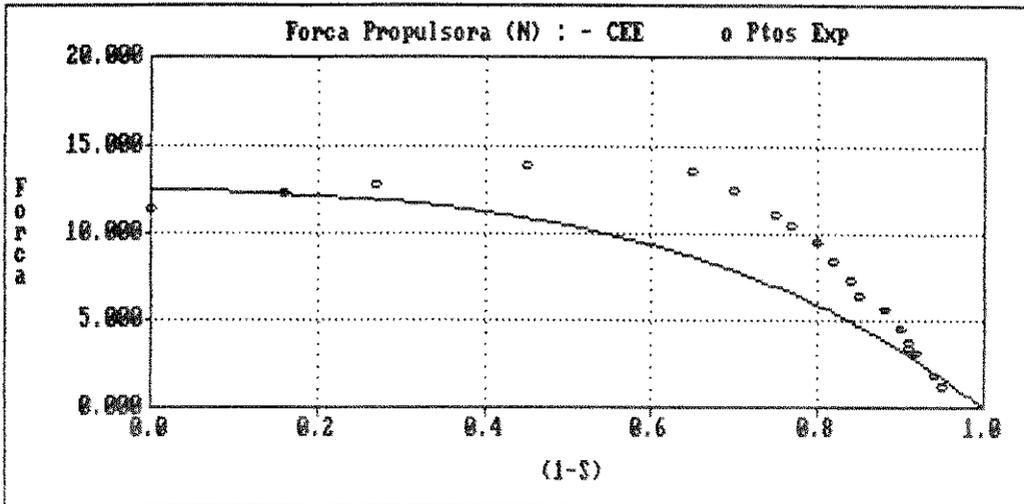


Figura 6.5 - Resposta do CEE tradicional (IF = 6,0 A)

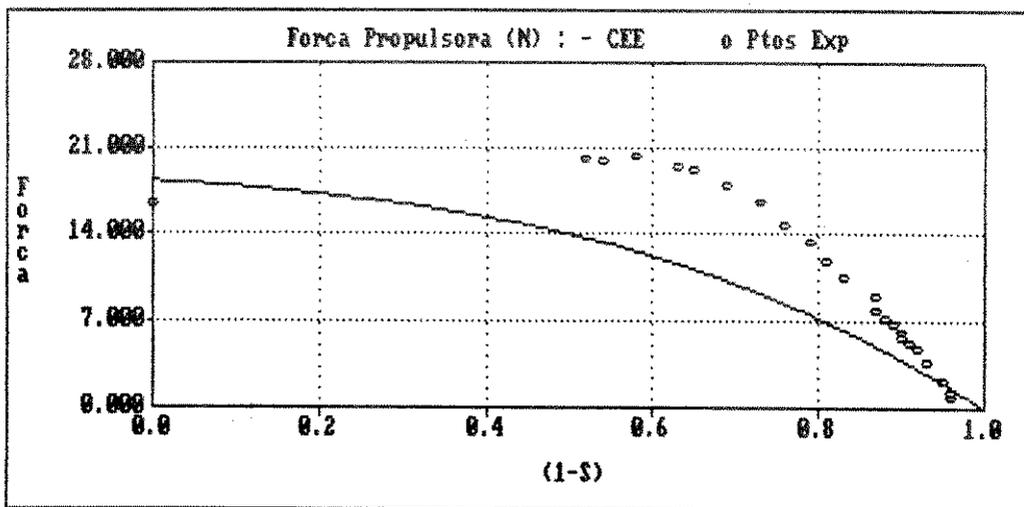


Figura 6.6 - Resposta do CEE tradicional (IF = 7,0 A)

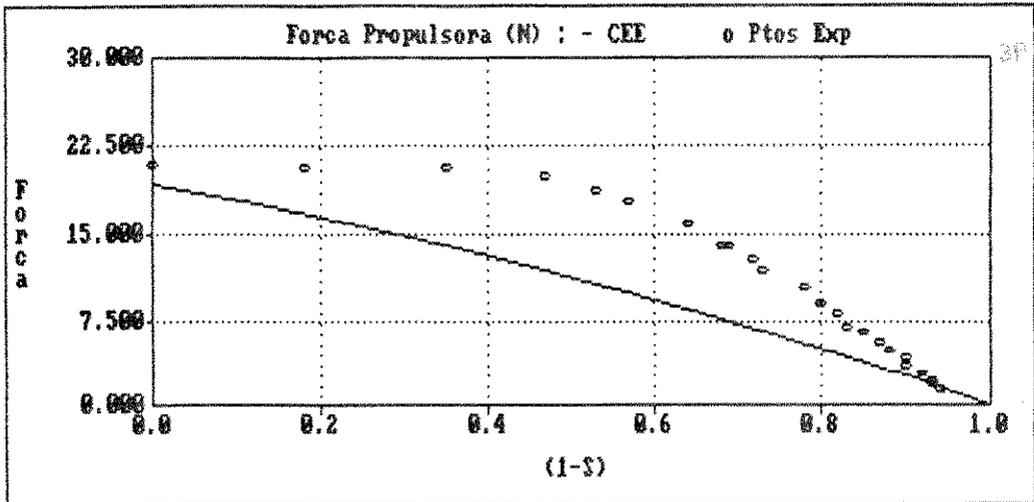


Figura 6.7 - Resposta do CEE tradicional ($V_F = 48,0$ V)

As Figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 mostram que as características Força-Velocidade obtidas com o circuito elétrico equivalente tradicional não conseguem reproduzir o comportamento do conversor, mostrando um comportamento totalmente distinto e ficando muito longe dos pontos experimentais, tanto para alimentação a corrente constante, como para alimentação a tensão constante.

Dessa forma, fica claro que o circuito obtido com as técnicas tradicionais, não é uma ferramenta confiável na análise dos conversores assíncronos lineares.

6.6 - DESEMPENHO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE CONSIDERANDO O EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

Com o auxílio das equações apresentadas no Capítulo 5, um circuito elétrico equivalente é montado para o CAL com dois

estatores ativos operando com um secundário em forma de lâmina de alumínio, para cada corrente de operação e seus valores são apresentados na Tabela 6.5. O Efeito Transversal de Borda é introduzido no circuito através da correção da resistência de linor refletida no estator e o Efeito Longitudinal de Extremidade é introduzido no circuito, através de uma nova impedância (Z_e), que é função da velocidade do conversor (k_e). O circuito final, semelhante ao mostrado na Figura 5.7 (Capítulo 5), é simulado para obtenção da força propulsora, fator de potência e rendimento, sendo seus valores comparados com os pontos obtidos experimentalmente.

Tabela 6.5 - Parâmetros Calculados do CEE (Ω)

	R_1	X_1	R_M	X_M	R'_2
5,0 A	2,364	3,351	244,661	9,055	1,676
6,0 A	2,515	3,351	344,724	9,055	1,706
7,0 A	2,665	3,351	468,541	9,055	1,786
48,0 V	2,590	3,351	388,327	9,055	1,829

Os valores da resistência R_e e da reatância X_e , que formam a impedância Z_e , não são apresentados na Tabela 6.5 devido a sua notável variação com o escorregamento do conversor assíncrono linear.

6.6.1 - FORÇA PROPULSORA, FATOR DE POTÊNCIA E RENDIMENTO PARA ALIMENTAÇÃO A CORRENTE CONSTANTE DE 5,0 A

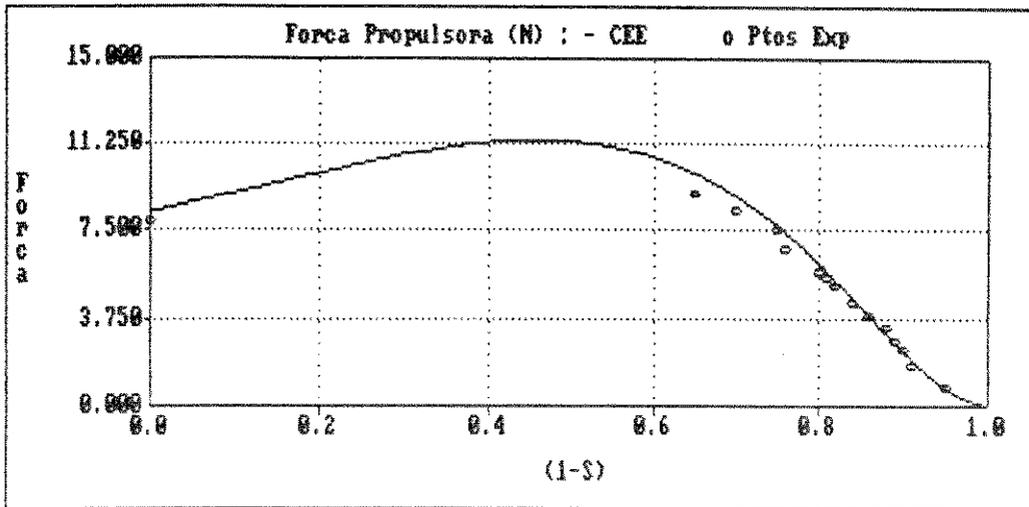


Figura 6.8 - Força Propulsora do CEE corrigido ($I_F = 5,0$ A)

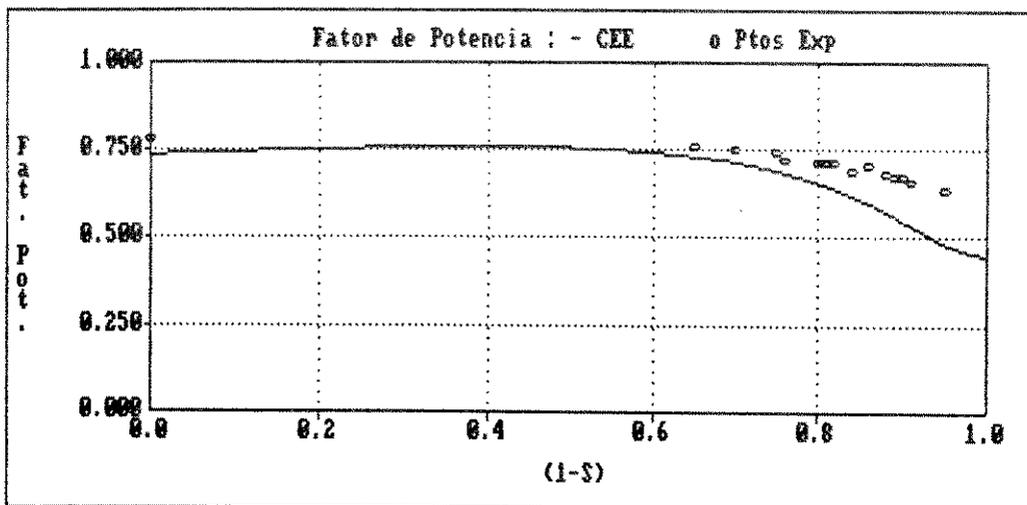


Figura 6.9 - Fator de Potência do CEE corrigido ($I_F = 5,0$ A)

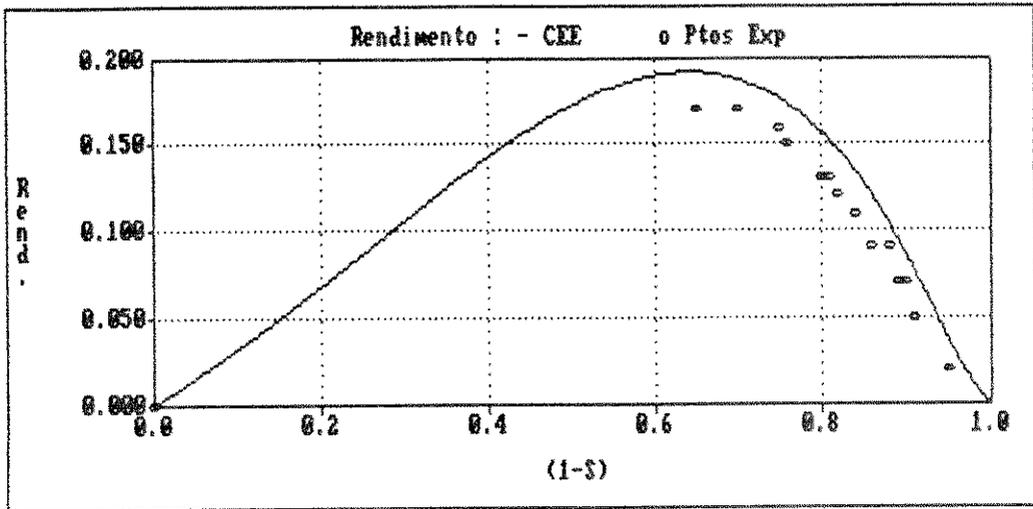


Figura 6.10 - Rendimento do CEE corrigido ($I_F = 5,0$ A)

6.6.2 - FORÇA PROPULSORA, FATOR DE POTÊNCIA E RENDIMENTO PARA ALIMENTAÇÃO A CORRENTE CONSTANTE DE 6,0 A

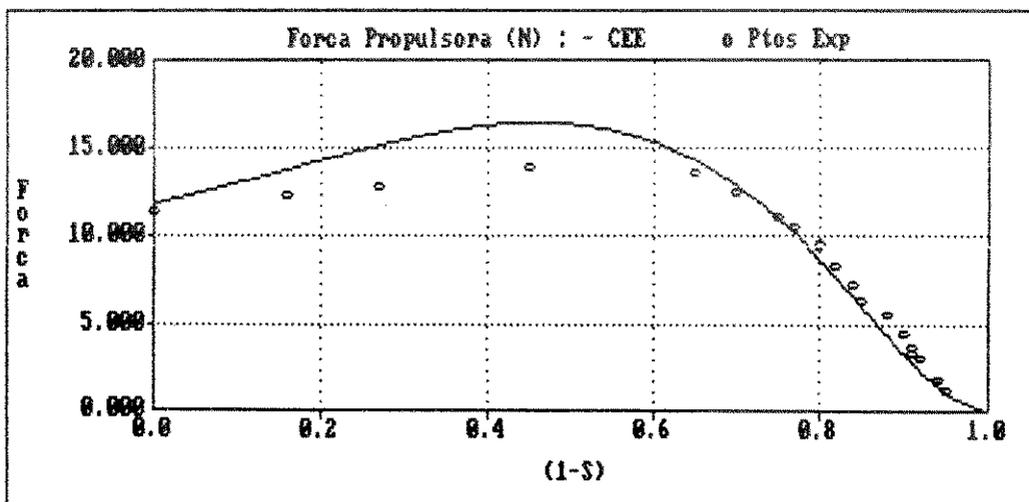


Figura 6.11 - Força Propulsora do CEE corrigido ($I_F = 6,0$ A)

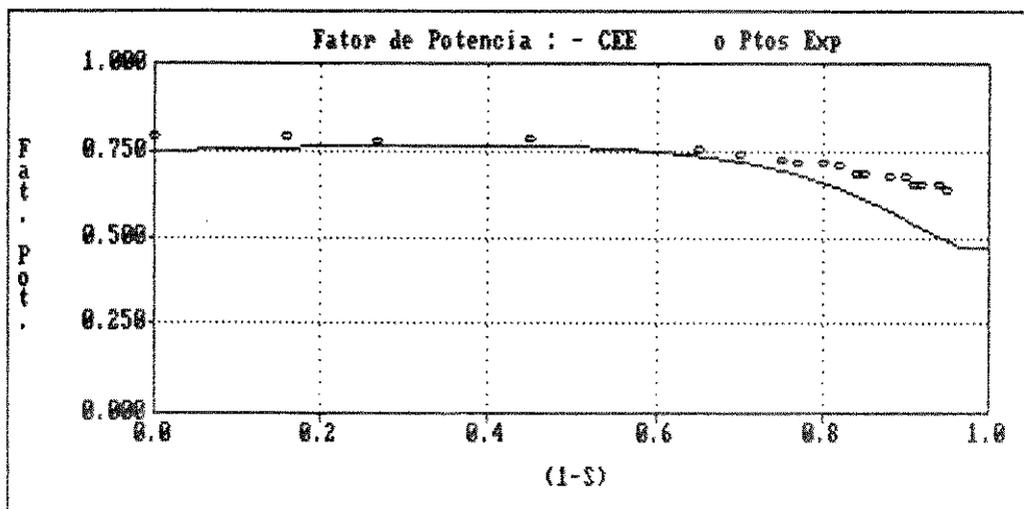


Figura 6.12 - Fator de Potência do CEE corrigido ($I_F = 6,0$ A)

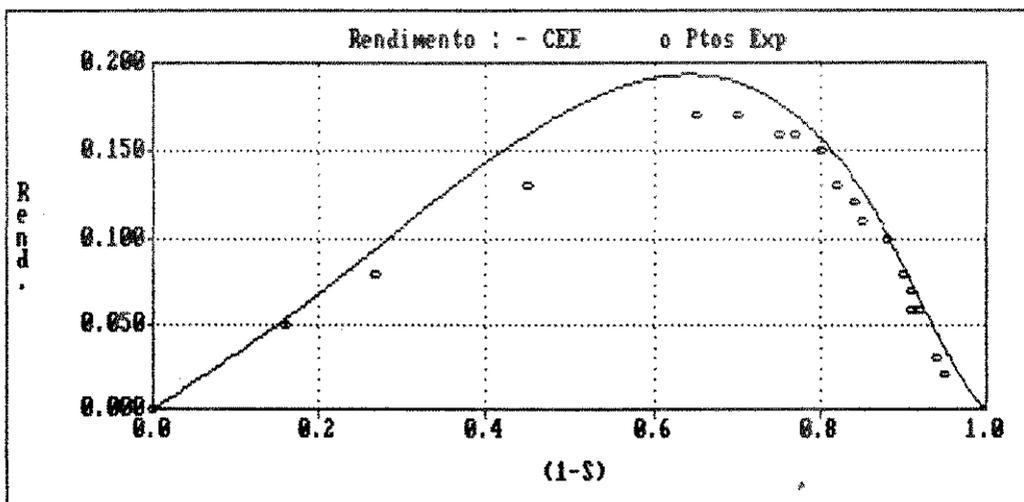


Figura 6.13 - Rendimento do CEE corrigido ($I_F = 6,0$ A)

6.6.3 - FORÇA PROPULSORA, FATOR DE POTÊNCIA E RENDIMENTO PARA ALIMENTAÇÃO A CORRENTE CONSTANTE DE 7,0 A

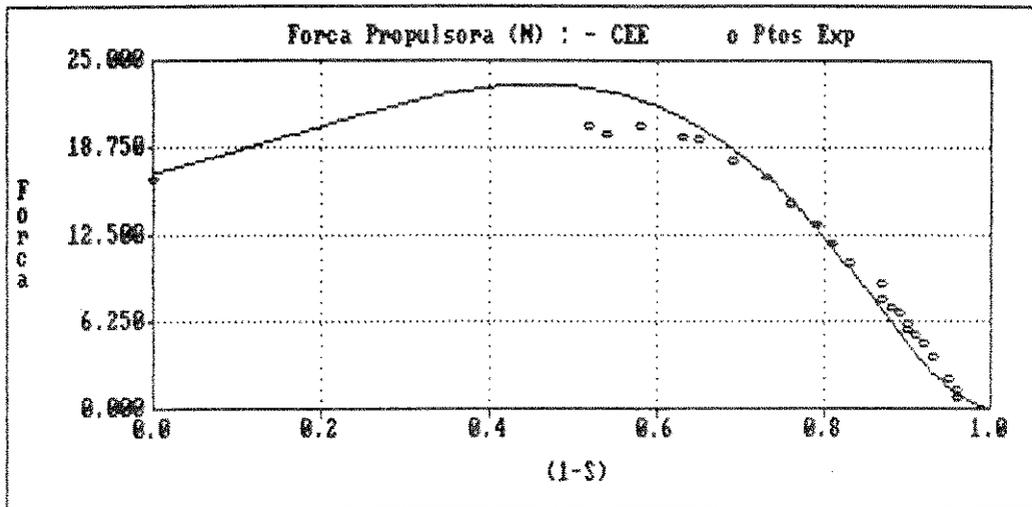


Figura 6.14 - Força Propulsora do CEE corrigido ($I_F = 7,0$ A)

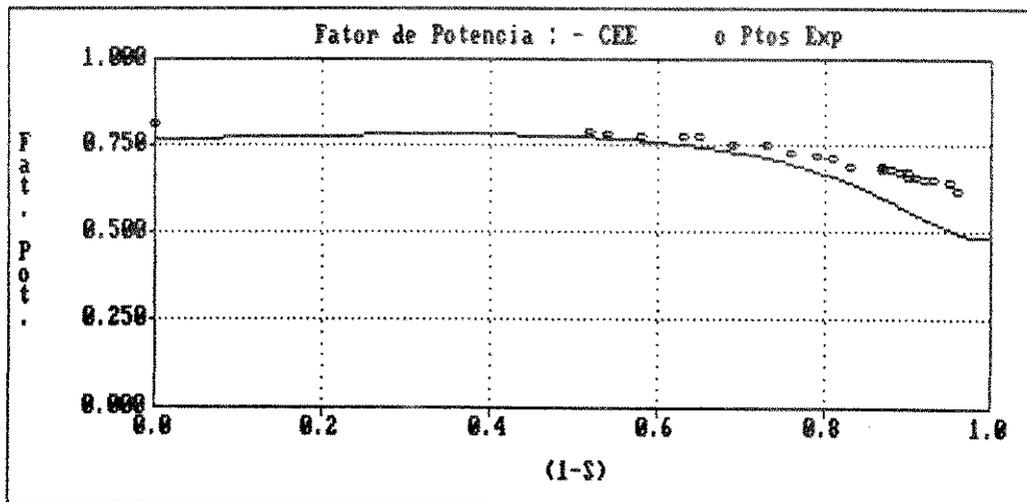


Figura 6.15 - Fator de Potência do CEE corrigido ($I_F = 7,0$ A)

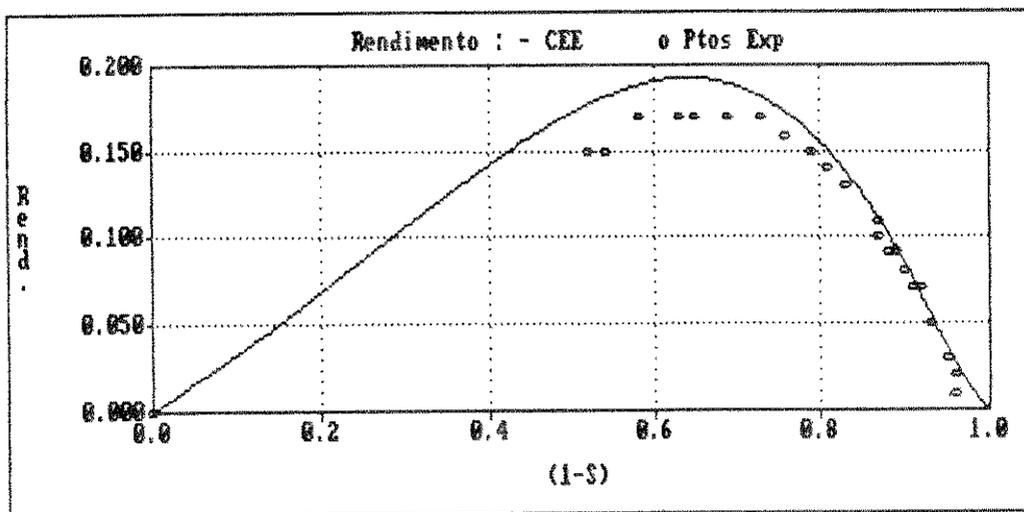


Figura 6.16 - Rendimento do CEE corrigido ($I_F = 7,0$ A)

6.6.4 - FORÇA PROPULSORA, FATOR DE POTÊNCIA E RENDIMENTO PARA ALIMENTAÇÃO A TENSÃO CONSTANTE DE 48,0 V

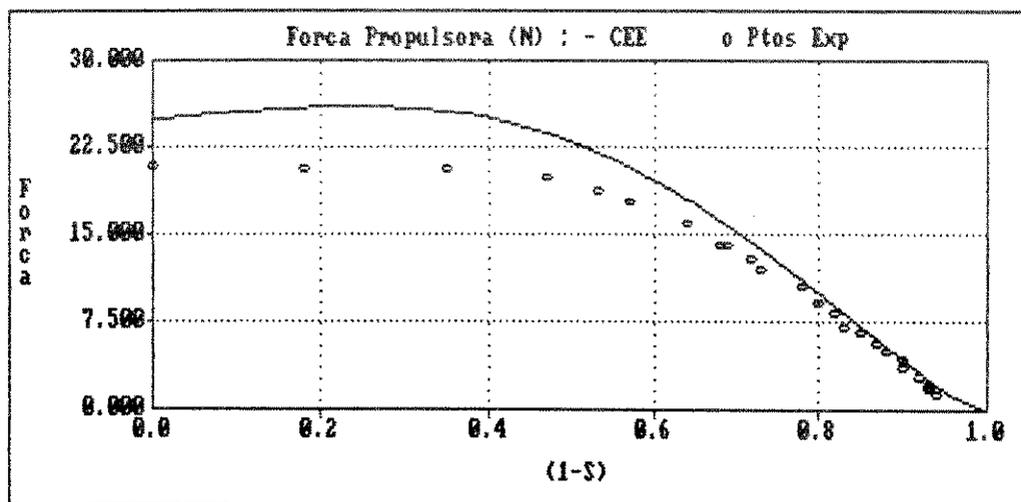


Figura 6.17 - Força Propulsora do CEE corrigido ($V_F = 48,0$ V)

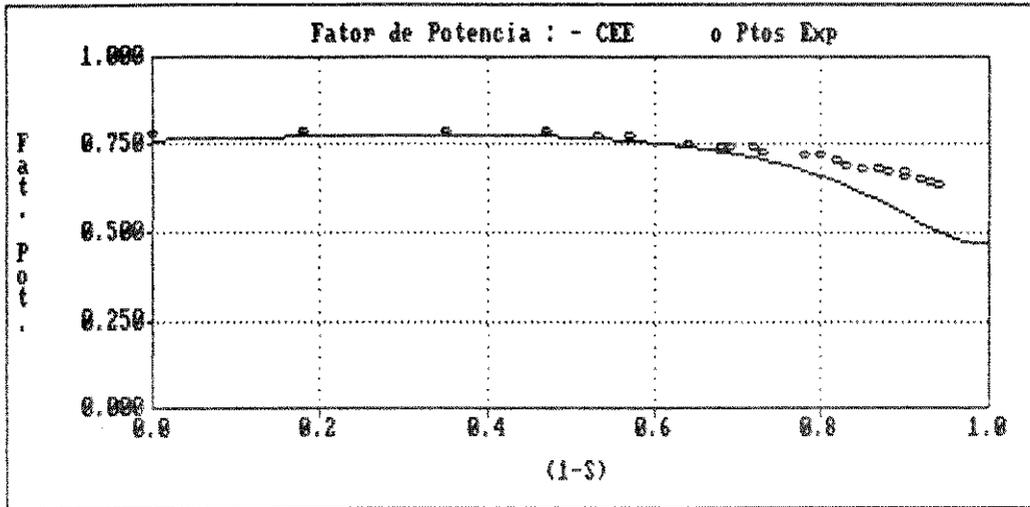


Figura 6.18 - Fator de Potência do CEE corrigido ($V_F = 48,0 \text{ V}$)

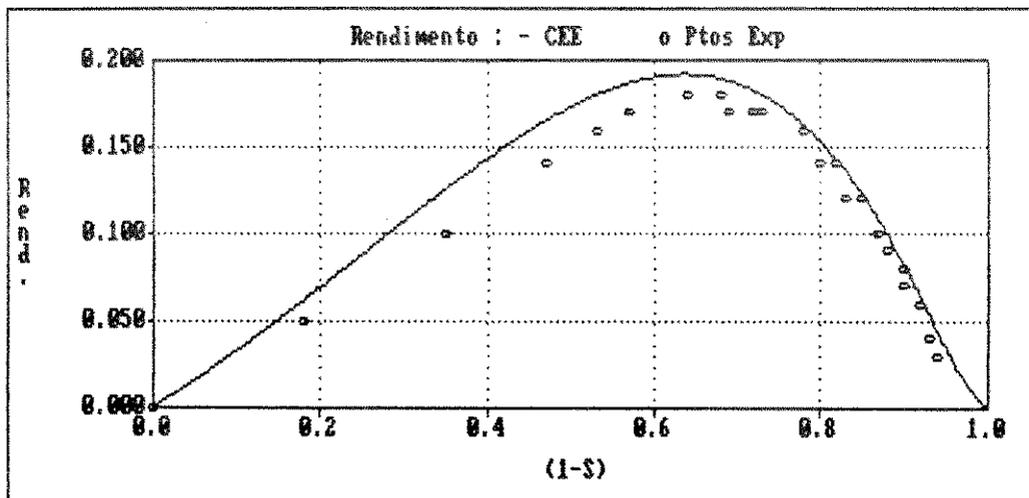


Figura 6.19 - Rendimento do CEE corrigido ($V_F = 48,0 \text{ V}$)

6.7 - COMENTÁRIOS

Observando os gráficos anteriores nota-se que o número de pontos experimentais está ligado ao valor da corrente de alimentação do conversor. Assim, para as menores correntes obtém-se as menores forças e o conversor é frenado com maior facilidade. Para alimentação a corrente constante de 7,0 A e para alimentação a tensão constante de 48,0 V um número maior de pontos experimentais é obtido.

As características Força-Velocidade, obtidas para os ensaios com corrente constante, apresentam um comportamento muito próximo dos pontos experimentais na região de 0 a 40 % de escorregamento e para o conversor bloqueado. Para a região de escorregamento maior que 40 %, os pontos experimentais não são mais igualmente confiáveis e estão relativamente distantes da curva obtida com o circuito equivalente. Existe uma dificuldade maior para o levantamento de pontos nesta região, devido à instabilidade de operação do freio e à grande vibração do conversor.

A característica Força-Velocidade para operação a tensão constante, obtida com o circuito elétrico equivalente corrigido, apresenta um comportamento superior ao do circuito tradicional, conseguindo mostrar a 'tendência' dos pontos experimentais, porém, com um maior desvio se comparada às características de corrente constante. Assim, para a operação a tensão constante, o circuito deve ser melhor analisado.

As características Fator de Potência-Velocidade, ao contrário das anteriores, apresentaram os maiores erros para os

menores escorregamentos, região onde a presença do Efeito de Extemidade Longitudinal é mais acentuado.

As características Rendimento-Velocidade apresentaram um comportamento muito próximo aos pontos experimentais, inclusive para o ensaio com tensão constante.

Dos gráficos pode-se observar, também, que o rendimento e o fator de potência não são função da corrente, ou tensão, aplicadas ao conversor [4].

6.8 - MÉTODO ALTERNATIVO PARA CÁLCULO DA FORÇA PROPULSORA

A partir das mesmas equações de densidade de campo magnético obtidas com o Modelo Unidimensional, apresentadas no Capítulo 2, a referência [11] estabelece o cálculo da força propulsora, para CALs dotados de dois estatores ativos e um linor longo (de alumínio ou cobre), através de uma equação de força, composta por duas parcelas referentes às duas ondas de densidade de campo magnético no entreferro.

O equacionamento da força é apresentado no Apêndice IV e a equação final de força propulsora, equação AIV.4, é utilizada para comparação de resultados com circuito elétrico equivalente corrigido e os pontos experimentais.

Como o equacionamento proposto no Apêndice IV refere-se a CALs operando com corrente eficaz constante, foram selecionados apenas os ensaios com corrente constante para confrontação de resultados com o circuito elétrico equivalente corrigido.

6.8.1 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

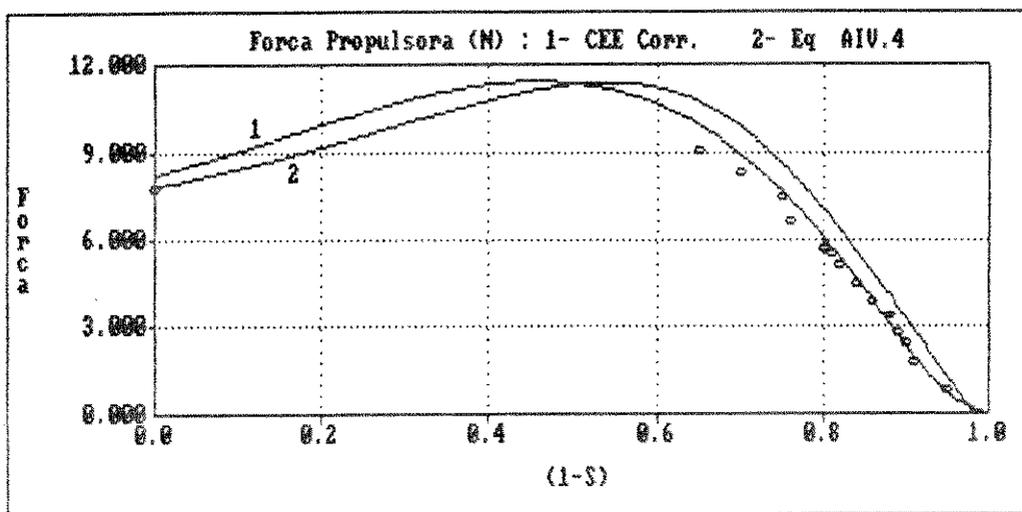


Figura 6.20 - Força Propulsora para operação com corrente constante $I_F = 5,0$ A (o - Ptos. Exp.)

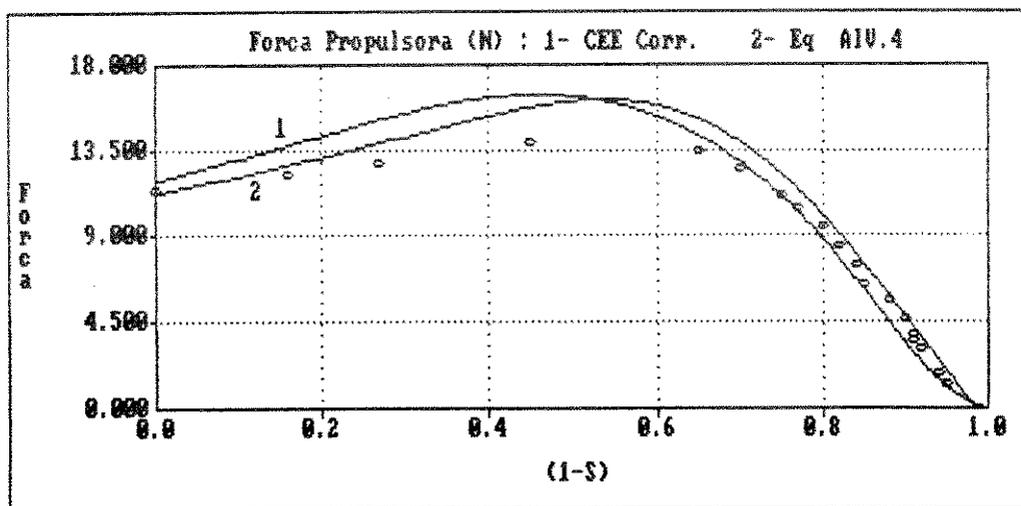


Figura 6.21 - Força Propulsora para operação com corrente constante $I_F = 6,0$ A (o - Ptos. Exp.)

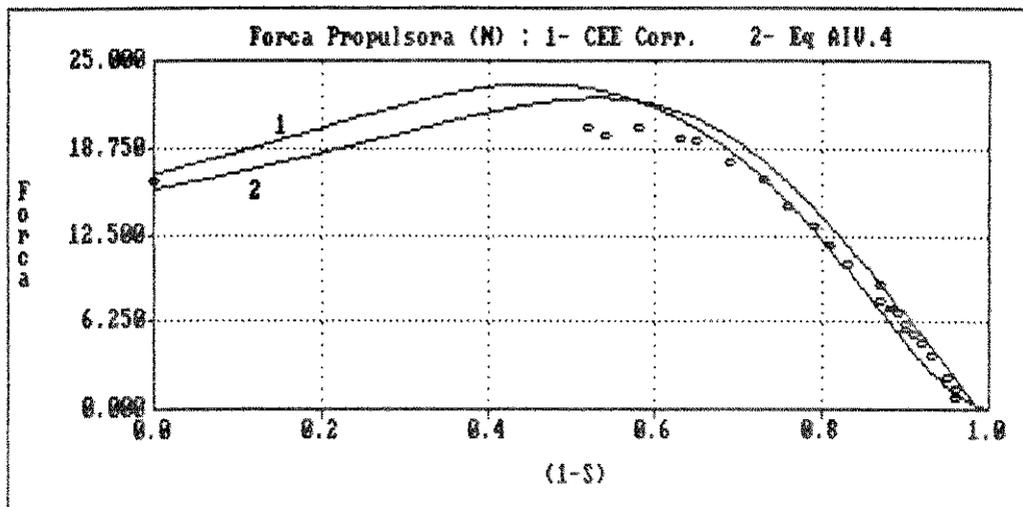


Figura 6.22 - Força Propulsora para operação com corrente constante $I_F = 7,0$ A (o - Ptos. Exp.)

CAPÍTULO 7

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

7.1 - INTRODUÇÃO

No presente trabalho foi efetuado um estudo dos Conversores Assíncronos Lineares, buscando um aprendizado de suas características e de suas diferenças em relação aos Conversores Assíncronos Rotativos.

No estudo realizado pode-se observar que a presença de um circuito magnético de estator não fechado, provoca uma grande degradação da densidade de campo magnético no entreferro e uma forte redução na força propulsora destes conversores. Esta redução de forças foi sentida principalmente em altas velocidades, evidenciando a ligação do Efeito Longitudinal de Extremidade, responsável pela redução da força, com a mesma.

A escolha do modelo Unidimensional, proposto por S. Yamamura [1] para o tratamento matemático do conversor e para a observação do Efeito Longitudinal de Extremidade, conduziu a um equacionamento relativamente simples e a resultados animadores.

A utilização de circuitos elétricos equivalentes, obtidos com os ensaios tradicionais, mostrou-se ineficaz para a simulação dos conversores lineares, pois, a atuação do Efeito Longitudinal de Extremidade modifica as características do

circuito para as diferentes velocidades de operação.

A construção de um circuito elétrico equivalente especial, onde os parâmetros são calculados através de equações derivadas do projeto de conversores rotativos [4], aliado a uma correção do Efeito Transversal de Borda [9] e do Efeito Longitudinal de Extremidade [1][3], levou a um circuito que apresentou uma resposta relativamente próxima aos valores levantados em laboratório, para a força propulsora, o fator de potência e para o rendimento.

A construção de um conversor assíncrono linear foi fundamental para a observação do circuito elétrico equivalente corrigido, sendo que, suas dimensões e características foram limitadas principalmente pela falta de recursos para a construção de um modelo de maior potência ou mais sofisticado. A indisponibilidade de melhores equipamentos de laboratório, não permitiu a execução de ensaios mais apurados, com controle mais preciso da corrente de alimentação e da operação na região de gerador.

Este primeiro contato com os conversores assíncronos lineares mostrou a existência de um campo muito grande para estudos e pesquisas, permitindo que se façam algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Aperfeiçoamento do modelo estático para a simulação do conversor linear considerando a variação dos parâmetros do circuito;
- Desenvolvimento de um modelo dinâmico do

conversor assíncrono linear que permita sua simulação em regime transitório e permanente;

- Estudo dos conversores assíncronos lineares que operam com linor construído com material ferromagnético;
- Estudo dos conversores assíncronos lineares operando com frequência do sinal de alimentação variável (inversores).

O estudo dos conversores assíncronos lineares permite que comparações mais realistas sejam estabelecidas entre estes e os conversores rotativos, propiciando uma escolha mais acertada de cada conversor, nas diversas aplicações possíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] YAMAMURA, S. - "Theory of Linear Induction Motors"
University of Tokyo Press, Tokyo, 1972
- [2] SIMONE, G. A. - "Uma Contribuição ao Estudo dos Conversores Assíncronos Lineares" - Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia M.G., 1989.
- [3] GIERAS, J. F. et alii - "A New Longitudinal End Effect Factor For Linear Induction Motors" - IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 1, Março, 1987.
- [4] SIMONE, G. A. - "Conversores Assíncronos Lineares de Dupla Face : Teoria e Projeto" - Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, S.P., 1992.
- [5] LAITHWAITE, E. R. - "The Goodness of a machine" - Proceedings IEE, vol. 112, No. 3, Março, 1965.
- [6] LAITHWAITE, E. R. - "Maquinas de Inducción Especiales" - Editorial Labor S.A., Barcelona, 1976.
- [7] BOLTON, H. - "Transverse Edge Effects in Sheet Rotor Induction Motors" - Proceedings IEE, Vol 116, No. 5, Maio, 1969.
- [8] BOLDEA, I et alii - "Optimum Goodness criterion for

- Linear Induction Motor Design" - Proceedings IEE, Vol. 123, No. 1, Janeiro 1976.
- [9] RUSSELL, E. L.- NORSWORTHY, K. H. - " Eddy Currents and Wall Losses in Screened-Rotor Induction Motors" - Proceedings IEE, Vol. 105 A, Abril 1958 .
- [10] PRESTON T. W. et alii - "Transverse Edge Effects in Linear Induction Motors" - Proceedings IEE, Vol. 116, No. 6, Junho 1969.
- [11] HIRASA, T. et alii - "Equivalent Circuit of Linear Induction Motors with End Effect Taken Into Account" - Electrical Engineering in Japan, Vol. 100, No. 2, 1980.
- [12] MATSUMIYA, T. et alii - "End Effect and Equivalent Circuit of Linear Induction Machines" - Electrical Engineering in Japan, Vol. 91, No. 1, 1971.
- [13] NONAKA, S. et alii - "Aproximate Equations for Calculation of Characteristics of Single Sided Linear Induction Motors" - Electrical Engineering in Japan, Vol. 102, No. 5, 1982.
- [14] ALGER, P. L. - "Induction Machines - Their Behavior and Uses" - Gordon & Breach Science Publishers - New York - 1970
- [15] BOLDEA, I. et alii - "A Complete Equivalent Circuit of a Linear Induction Motor with Sheet Secondary" - IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, No. 1, Janeiro, 1988.

- [16] LANGSDORF, A.S. - "Teoria de Las Máquinas de Corriente Alterna" - Segunda Edição, Libros McGraw-Hill, México, 1971.
- [17] CABRITA, C.M.P. - "Motor Linear de Indução - Análise Teórica, Projeto e Ensaio" - Tese de Doutorado, IST-UTL, Lisboa, 1988.
- [18] FALCONE, A.G. - "Proposta Para Uma Nova Aplicação dos Motores Planos de Indução" - Tese de Livre-Docência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.
- [19] POLOUJADOFF, M. - "The Theory of Linear Induction Machinery" - Clarendon Press, Oxford, 1980.
- [20] NASAR, S.A. & BOLDEA, I. - "Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications" - Prentice-Hall, New Jersey, 1987.
- [21] ADAMIAK, K. et alii - "The Cause and Consequences of Phase Unbalance in Single-Sided Linear Induction Motors" - IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, No. 6, Novembro, 1988.
- [22] LAITHWAITE, E.R. - "Linear Induction Motors" - Proc. IEE, Paper No. 2433U, Dezembro, 1957.
- [23] McLEAN, G.W. - "Review of Recent Progress in Linear Motors" - Proc. IEE, Vol. 135, Pt. B, No. 6, Novembro, 1988.
- [24] SIMONE, G. A. et alii - "O Motor Assíncrono Linear para Baixas Velocidades - Uma Técnica de Proto" - II Seminário Internacional de Motores Elétricos e Acionamentos Reguláveis, S.P., 1991

- [25] CREPPE, R.C. et alii - "Circuito Elétrico Equivalente para Conversores Assíncronos Lineares" - II Simpósio de Pesquisa e Pós-Graduação - UNESP - Campos Jordão - 1991.
- [26] GOLDEMBERG, C. et alii - "Determinação do Circuito Equivalente para Análise Estática e Dinâmica de Motores de Indução a partir de Catálogos de Fabricantes" - II SIMEAR, S.P., 1991.
- [27] LOBOSCO, O.S. et alii - "Seleção e Aplicação de Motores Elétricos" - Vol. 1, McGraw-Hill, São Paulo, 1988.

APÊNDICE I

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR UTILIZADO PARA ENSAIOS

AI.1 - ASPECTOS GERAIS

Para a construção de um CAL para os ensaios em laboratório alguns problemas como o espaço físico, custo de construção e o levantamento de suas características, que normalmente é muito mais complexo que nos conversores rotativos, tiveram que ser solucionados

O modelo a ser construído deveria ocupar um espaço relativamente pequeno, pois, os laboratórios para testes normalmente são projetados para conversores rotativos, que ocupam áreas de poucos metros quadrados (um motor 200 cv, carcaça ABNT-315M, possui um comprimento de 1,3 m, largura de 0,75 m considerando a caixa de ligação, ou seja, uma área de praticamente um metro quadrado). Já o conversor linear necessita de uma pista de grande comprimento para se transladar, obrigando a construção de um laboratório específico, com equipamentos especiais para o levantamento de suas características. Além disso, o material empregado em sua construção o tornaria proibitivo para o orçamento da maioria das Universidades.

Para contornar os problemas acima, foi construído um

CAL de pequenas dimensões, constituído de dois estatores, dotados de ranhuras e enrolamentos trifásicos, que permanecem fixos, facilitando medições de tensão, corrente e potência. O linor por sua vez, foi construído na forma de um disco de alumínio que, girando entre os estatores, suportado por rolamentos, faz o papel de pista de reação, permitindo que a força propulsora seja determinada a partir do conjugado observado no eixo. A figura AI.1 mostra, esquematicamente, uma vista lateral do conversor construído.

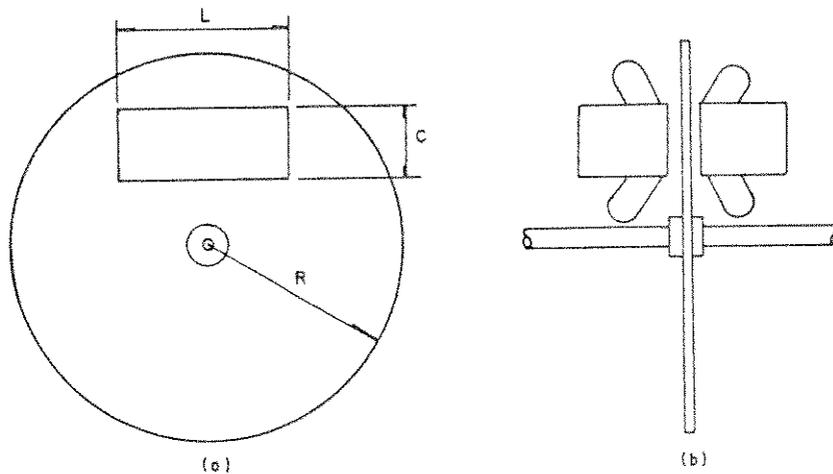


figura AI.1 - CAL utilizado em laboratório

AI.2 - CARACTERÍSTICAS

As principais características do conversor são:

Dimensões de um bloco estatórico : $40 \times 51,8 \times 290$ (mm³)

Diametro do disco de alumínio : 450 mm

Número de ranhuras por estator : 18

Número de pólos (p): 2

Número de ranhuras por pólo e por fase (q): 3

Número de fases (m): 3

Condutor estatórico : Cobre eletrolítico AWG # 17 - classe H

Resistividade condutor estatórico a 20°C (ρ_1): $1,754 \times 10^{-8} \Omega.m$

Temperatura de operação do enrolamento estator : 100°C

Resistividade lâmina linórica a 20°C (ρ_v): $2,828 \times 10^{-8} \Omega.m$

Temperatura de operação do linor : 72°C

Espessura da lâmina linórica (hr): 5,6 mm

Frequência do sinal de alimentação (f): 60 Hz

Entreferro (g): 7,9 mm

Largura do estator (c): 40 mm

Largura do linor (c'): 119,8 mm

Passo polar (tp): 0,125 m

Passo de bobina (tb): 0,125 m

Velocidade linear Síncrona (V_{sx}): 15 m/s

Permeabilidade magnética do ar $\cong \mu_0$: $4.\pi \times 10^{-7} H/m$

Comprimento do estator (L): 290 mm

Comprimento de "cabeça de bobina" (lcb): 0,20 m

Comprimento médio de condutor ativo (lm): 0,24 m

Número de condutores ativos por fase (NF): 240

Fator de ocupação da ranhura : 35 %

Constante de translação da onda (k): $2,51 m^{-1}$

Distância entre dentes do estator (α_1): 1,5 mm

Largura da ranhura (α_2): 7,0 mm

Profundidade da entrada de ranhura (h_3): 2,9 mm

Profundidade início de ranhura (h_2): 3,5 mm

Profundidade da ranhura (h_1): 15,2 mm

Perda específica do ferro (ω_F): 0,8 watt/kgf

Peso específico do ferro (γ_F): $7,8 \times 10^3 kgf/m^3$

APÊNDICE II

CARACTERÍSTICAS DO CAL OBSERVADAS EM LABORATÓRIO

AII.1 - CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA

O comportamento magnético do CAL utilizado para ensaios em laboratório pode ser definido como 'magneticamente linear', devido ao grande entreferro ($\cong 8$ mm) do mesmo.

Para verificar a afirmação acima foi realizado um ensaio para construir a curva Tensão-Corrente para o CAL operando sem carga mecânica.

A Figura AII.1 mostra o comportamento das correntes das três fases do CAL para diferentes tensões aplicadas.

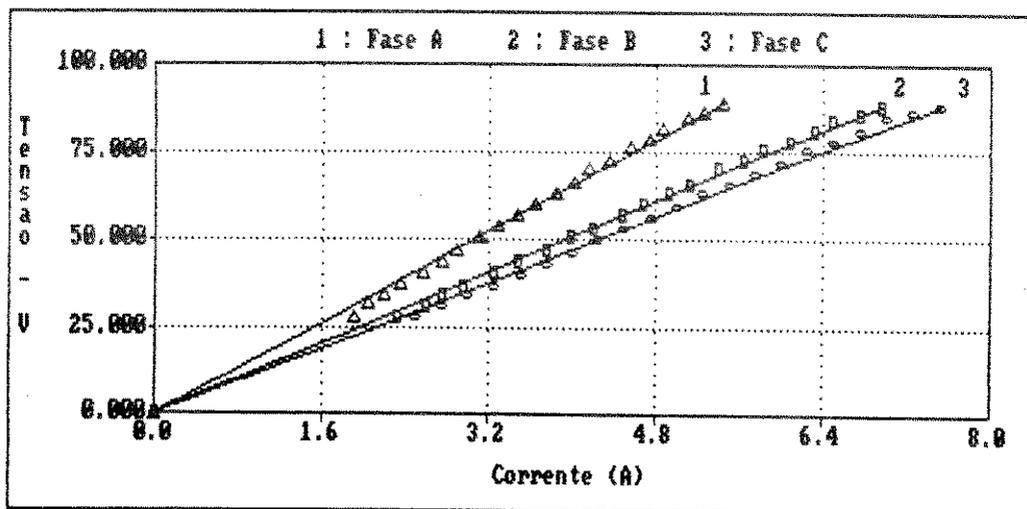


Figura AII.1 - Variação das correntes de fase do CAL para diferentes tensões aplicadas

AII.2 - VARIACÃO DAS CORRENTES COM O ESCORREGAMENTO

O comportamento das correntes de fase com o escorregamento pode ser observado nos gráficos seguintes levantados para operação em corrente constante e tensão constante.

A influência do Efeito Longitudinal de Extremidade pode ser notada quando o CAL opera em regiões de alta velocidade (baixo escorregamento), alterando profundamente o valor das correntes de fase. Nas figuras a bobina da fase próxima à extremidade de entrada é designada por (E), a bobina próxima a de saída por (S) e a bobina central por (C)

Também são apresentados gráficos comparando o valor médio das correntes e o valor médio quadrático (equação 6.1) utilizado nos ensaios e simulações

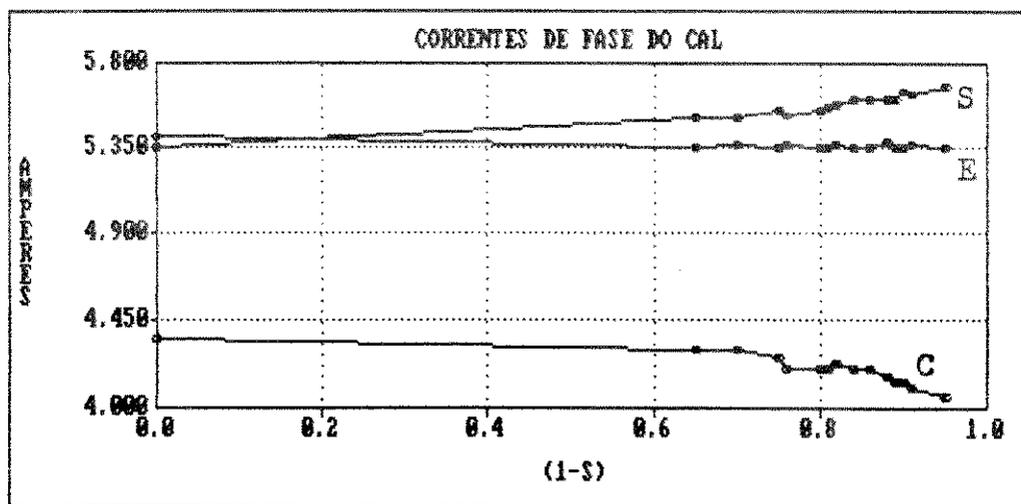


Figura AII.2 - Variação das correntes de fase com a velocidade para corrente média constante de 5,0 A

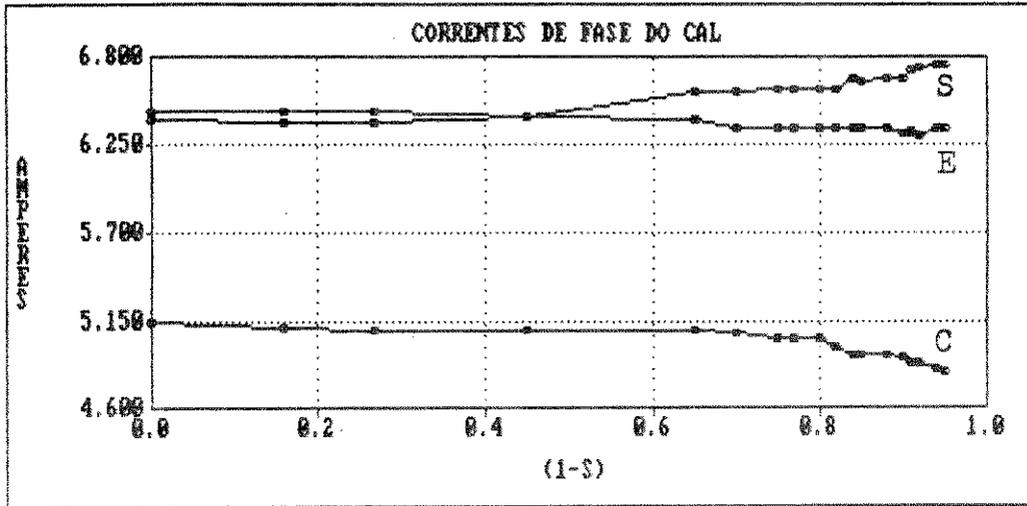


Figura AII.3 - Variação das correntes de fase com a velocidade para corrente média constante de 6,0 A

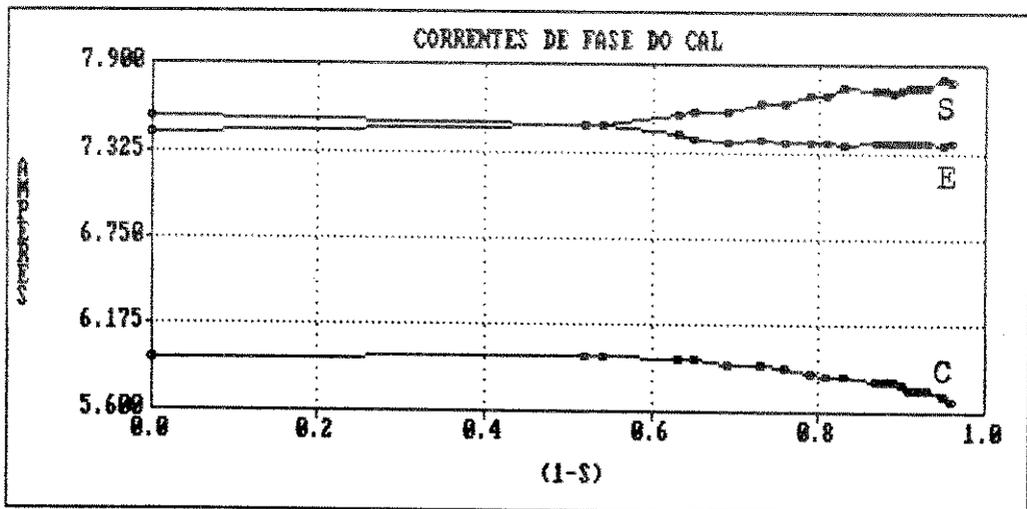


Figura AII.4 - Variação das correntes de fase com a velocidade para corrente média constante de 7,0 A

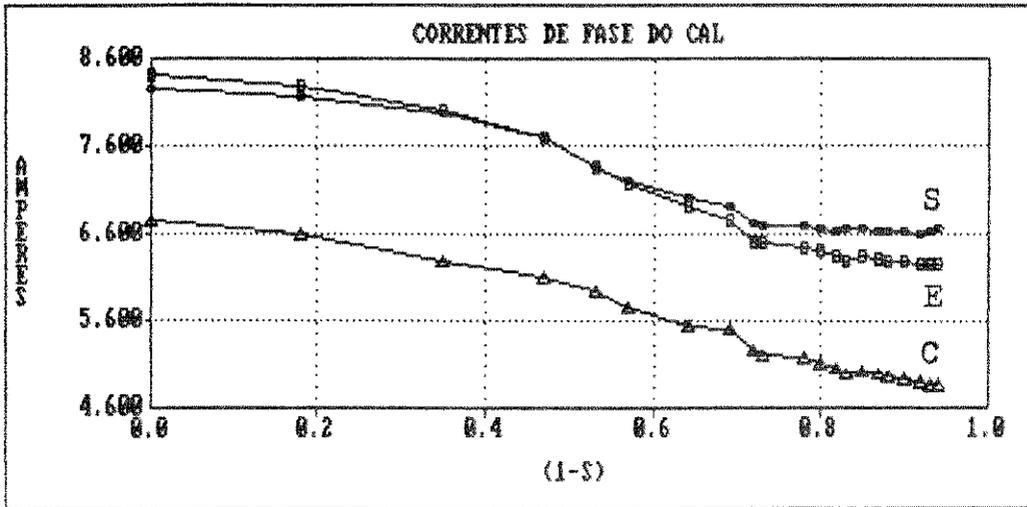


Figura AII.5 - Variação das correntes de fase com a velocidade para tensão constante de 48 V

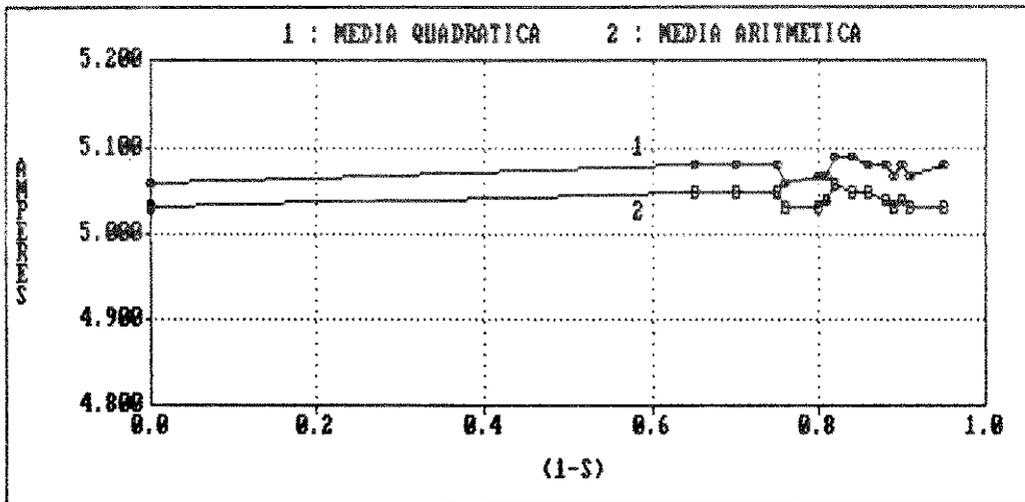


Figura AII.6 - Valor médio e valor médio quadrático (eq. 6.1) das correntes de fase para $I_F = 5,0$ A

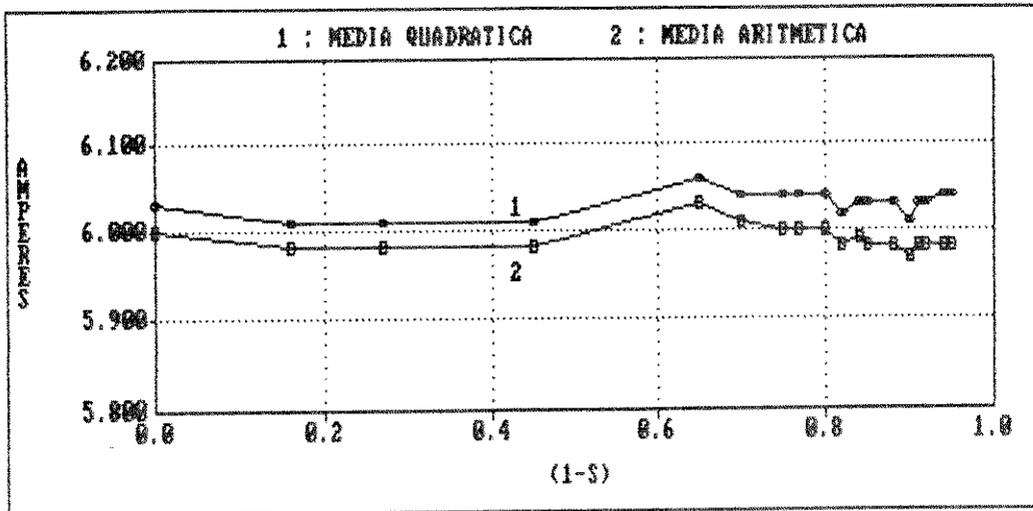


Figura AII.7 - Valor médio e valor médio quadrático (eq. 6.1) das correntes de fase para $I_F = 6,0$ A

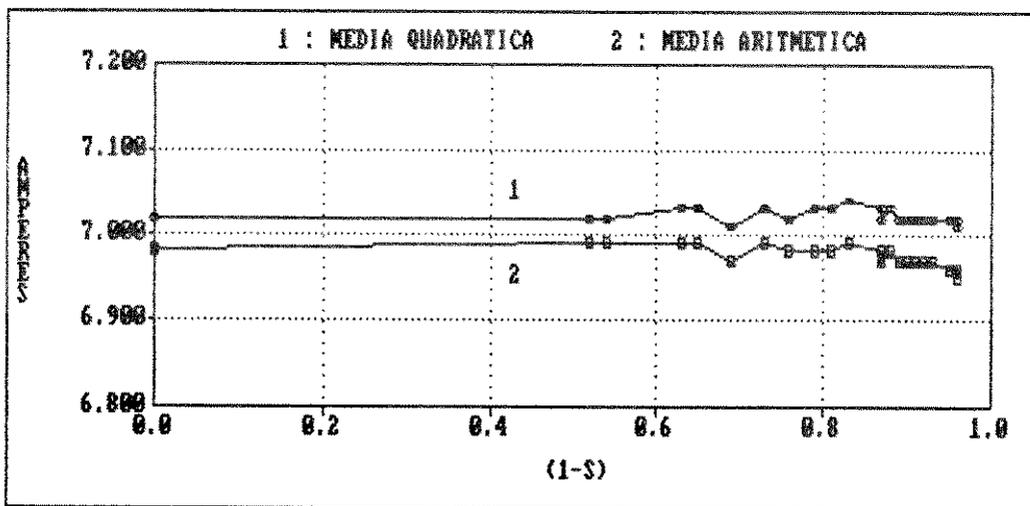


Figura AII.8 - Valor médio e valor médio quadrático (eq. 6.1) das correntes de fase para $I_F = 7,0$ A

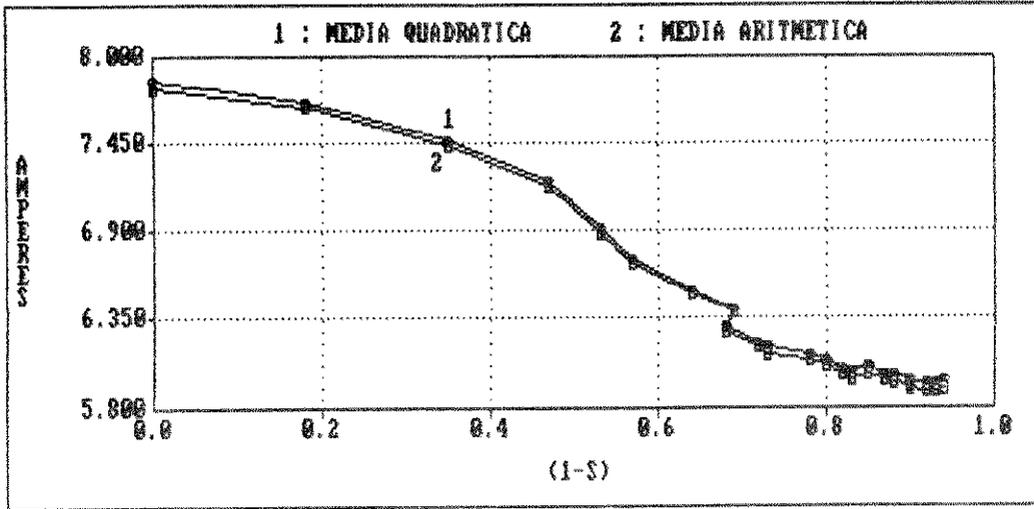


Figura AII.9 - Valor médio e valor médio quadrático (eq. 6.1)
das correntes de fase para $V_F = 48 \text{ V}$

APÊNDICE III

DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE CAMPO B_1 E DO ÂNGULO δ COM O ESCORREGAMENTO

AIII.1 - INTRODUÇÃO

A variação do ângulo δ , que é o ângulo entre as ondas de densidade de campo magnético B_s e B_1 do CAL, pode ser calculada a partir de equacionamento proposto por T. Hirasa [11], que estabelece equações para o cálculo do valor máximo da onda de densidade de campo magnético B_1 , relacionada a extremidade longitudinal de entrada do CAL e do ângulo δ , estabelecido entre esta onda e a onda normal de densidade de campo magnético B_s .

AIII.2 - EQUAÇÕES

O cálculo das grandezas é baseado no modelo unidimensional, que tem como equação fundamental:

$$b(x,t) = B_s \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\pi \cdot x}{t_p} + \delta_s\right] + \\ + B_1 \cdot \exp\left[-\frac{x}{\alpha_1}\right] \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\pi \cdot x}{t_{pe}} + \delta_1\right] \quad (\text{AIII.1})$$

A equação acima despreza o efeito longitudinal de

extremidade de saída e seus termos podem ser expressos por:

$$B_s = \frac{J_{SM}}{\left[\left[\frac{\pi \cdot g_0}{\mu_0 \cdot t_p} \right]^2 + \left[\frac{s \cdot V_{rx}}{\rho_r} \right]^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{AIII.2})$$

$$\text{tg}(\delta_s) = \frac{\pi \cdot \rho_r \cdot g_0}{\mu_0 \cdot t_p \cdot s \cdot V_{rx}} \quad (\text{AIII.3})$$

$$B_1 = \frac{D_1}{A_1 \cdot \text{sen}(\delta_1) + A_2 \cdot \text{cos}(\delta_1)} \quad (\text{AIII.4})$$

$$\text{tg}(\delta_1) = \frac{D_1 \cdot A_1 - D_2 \cdot A_2}{D_2 \cdot A_1 + D_1 \cdot A_2} \quad (\text{AIII.5})$$

onde:

$$A_1 = \left[1 + \frac{1}{D_2 \cdot V_{rx} \cdot \alpha_1} \right] \quad (\text{AIII.6})$$

$$A_2 = \left[\frac{\pi}{D_2 \cdot V_{rx} \cdot t_{pe}} \right] \quad (\text{AIII.7})$$

$$D_1 = -B_s \cdot [A_2 \cdot \text{cos}(\delta_s) + \text{sen}(\delta_s)] \quad (\text{AIII.8})$$

$$D_2 = \frac{\mu_0}{\rho_r \cdot g_0} \quad (\text{AIII.9})$$

$$D_3 = -\frac{\rho_r \cdot J_{SM}}{V_{rx}} + B_s \cdot [A_2 \cdot \text{sen}(\delta_s) - \text{cos}(\delta_s)] \quad (\text{AIII.10})$$

sendo J_{SM} o valor máximo da densidade superficial de corrente do estator.

Com base no equacionamento acima é possível

determinar-se o comportamento do ângulo δ e do valor máximo da densidade de campo magnético da onda normal (B_s) e da onda de Efeito Longitudinal de Extremidade (B_1).

Ressaltar que o valor da resistividade superficial da lâmina laminar (ρ_r), não leva em conta o Efeito Transversal de Borda.

Para o motor utilizado nos testes, a variação do ângulo δ através do equacionamento proposto acima e o equacionamento proposto no capítulo IV, equação (4.41), considerando uma variação linear, são mostradas na Figura AIII.1.

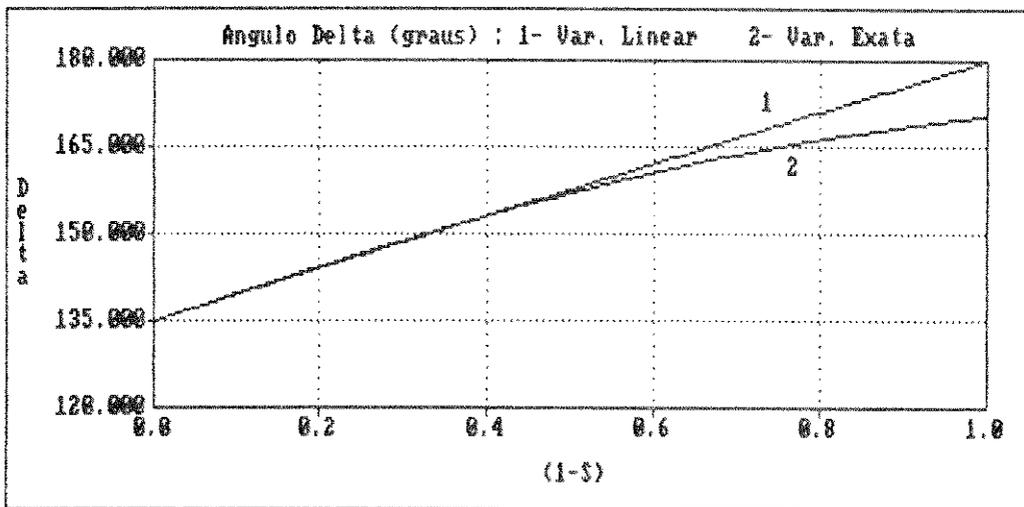


Fig AIII.1 - Variação do ângulo delta

Pode-se notar, através da Figura acima, que a variação do ângulo δ , para os dois métodos de cálculo, conduzem a um mesmo valor inicial (135°) e que os valores calculados são muito próximos na região $0,6 \leq (1-s) \leq 1,0$.

APÊNDICE IV

CÁLCULO DA FORÇA PROPULSORA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE FORÇA

AIV.1 - INTRODUÇÃO

Um outro enfoque para o cálculo da força propulsora dos CALs foi dado pela referência [11], que também discute a utilização de um circuito elétrico equivalente, desenvolvido a partir das equações básicas de campo do Modelo Unidimensional.

A partir da equação da densidade de campo magnético no entreferro do CAL (equação 2.39), observa-se que o campo magnético é representado por três ondas distintas, representando a componente de campo "normal" e os Efeitos Longitudinais de Extremidade de Entrada e Saída.

A referência [11] também despreza o Efeito Longitudinal de Extremidade de Saída, tornando a força propulsora como resultante da onda normal (B_s) e da onda de Efeito Longitudinal de Extremidade de Entrada (B_A):

$$b(x,t) = B_s \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi \cdot x}{t_p} + \delta_s\right) + B_A \cdot \exp\left[-\frac{x}{\alpha_A}\right] \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi \cdot x}{t_{pe}} + \delta_A\right) \quad (\text{AIV.1})$$

Utilizando o conceito de 'lâmina de corrente', em

substituição aos enrolamentos trifásicos depositados em ranhuras, a distribuição de corrente pela superfície do estator pode ser dada pela expressão:

$$j_1 = J_{1MAX} \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (\text{AIV.2})$$

A força propulsora do CAL, pode então ser calculada, para um estator do CAL:

$$f_{xr} = \frac{c}{2} \cdot \int_0^L \operatorname{Re} \left[j_1 \cdot b(x,t)^* \right] \cdot dx \quad (\text{AIV.3})$$

onde c é a largura do estator, L seu comprimento e $b(x,t)^*$ o complexo conjugado de $b(x,t)$.

A equação (AIV.3) desenvolvida com o auxílio das equações de densidade de campo de da lâmina de corrente, tem como expressão:

$$f_{xr} = \frac{c \cdot L \cdot J_{1MAX} \cdot B_s}{2} \cdot \cos(\delta_s) + \frac{c \cdot J_{1MAX} \cdot B_1 \cdot A_2}{\left(\frac{2 \cdot \pi}{t_{pa}} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{t_{p1}}{\alpha_1 \cdot \pi} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{AIV.4})$$

$$A_2 = \exp\left(\frac{-L}{\alpha_1}\right) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \cdot L}{t_{pa}} - \delta_1 - \delta_a\right) - \operatorname{sen}(\delta_1 + \delta_a) \quad (\text{AIV.5})$$

$$\frac{1}{t_{pa}} = \frac{1}{t_p} - \frac{1}{t_{pe}} \quad (\text{AIV.6})$$

$$\operatorname{tg}(\delta_a) = \frac{-t_{pa}}{\alpha_1 \cdot \pi} \quad (\text{AIV.7})$$

A força propulsora dada pela equação (AIV.4) apresenta duas componentes distintas: uma componente de força originada pela onda B_s e uma segunda componente, originada pela onda B_x de Efeito longitudinal de Extremidade de Entrada.

APÊNDICE V

VALORES OBTIDOS EM LABORATÓRIO

AV.1 - INTRODUÇÃO

A seguir são apresentadas tabelas com pontos obtidos experimentalmente com o CAL ligado a uma bancada de medição trifásica composta por:

- três amperímetros para medição da corrente de fase
marca Yokogawa - classe de exatidão 0,5 - 0/7,5/15 A
- três voltímetros para medição da tensão de fase
marca Lier - classe de exatidão 1 - 0/150 V
- três wattímetros
marca Lier - classe de exatidão 1 - 0/10 A 0/120 V
- dinamômetro
marca Kratos - 0/2,0 kgf - menor divisão 20 gf
- tacômetro digital
marca Mitutoyo - 0/6.000 rpm - precisão ± 1 rpm
- termômetro de contato
marca Gossen - 0/100 90/200 °C - menor divisão 2 °C
- freio tipo Prony com braço de compensação
comprimento do braço - 412,5 mm

A alimentação do CAL foi efetuada através de um autotransformador trifásico com controle simultâneo das três tensões de fase. Dado o desequilíbrio do CAL os valores de tensão e corrente eram mantido como um valor médio constante, através das equações [2]:

$$I_F = \left[\frac{(I_a)^2 + (I_b)^2 + (I_c)^2}{3} \right]^{1/2} \quad (AV.1)$$

$$V_F = \left[\frac{(V_a)^2 + (V_b)^2 + (V_c)^2}{3} \right]^{1/2} \quad (AV.2)$$

AV.2 - TABELAS

Tabela AV.1 - Tabela de Corrente e Tensão para corrente
média constante ($I_F = 5,0 \text{ A}$)

	$I_a \text{ (A)}$	$I_b \text{ (A)}$	$I_c \text{ (A)}$	$V_a \text{ (V)}$	$V_b \text{ (V)}$	$V_c \text{ (V)}$
01	5,35	5,40	4,35	30,00	30,00	27,00
02	5,51	5,35	4,30	37,00	37,50	35,00
03	5,50	5,36	4,30	37,50	39,00	36,00
04	5,55	5,35	4,25	38,75	40,00	36,50
05	5,52	5,36	4,20	38,75	40,50	36,50
06	5,55	5,35	4,20	39,00	41,25	37,50
07	5,56	5,35	4,20	39,50	41,50	37,50
08	5,58	5,36	4,23	39,50	42,00	37,50
09	5,60	5,35	4,20	40,00	42,50	38,00
10	5,60	5,35	4,19	40,00	42,50	38,00
11	5,60	5,38	4,15	40,00	43,00	38,00
12	5,61	5,35	4,12	40,00	43,00	38,00
13	5,65	5,35	4,12	40,00	43,50	38,50
14	5,63	5,36	4,10	40,50	43,50	39,00
15	5,68	5,35	4,06	41,00	44,00	39,00

Tabela AV.2 - Tabela de Potência, Força e Velocidade
para corrente média constante ($I_F = 5,0 \text{ A}$)

	W_a (W)	W_b (W)	W_c (W)	F (gf)	N (rpm)
01	140,00	110,00	95,00	280,00	0,00
02	170,00	140,00	115,00	325,00	529,00
03	170,00	140,00	120,00	300,00	571,00
04	175,00	140,00	120,00	270,00	606,00
05	173,00	138,00	110,00	240,00	619,00
06	175,00	138,00	112,00	205,00	650,00
07	178,00	138,00	110,00	198,00	657,00
08	178,00	138,00	115,00	184,00	662,00
09	180,00	135,00	110,00	160,00	681,00
10	180,00	130,00	120,00	138,00	697,00
11	178,00	130,00	108,00	120,00	711,00
12	175,00	130,00	108,00	100,00	721,00
13	180,00	126,00	110,00	88,00	727,00
14	180,00	125,00	105,00	65,00	741,00
15	180,00	120,00	100,00	30,00	766,00

Tabela AV.3 - Tabela de Corrente e Tensão para corrente média constante ($I_F = 6,0 \text{ A}$)

	$I_a \text{ (A)}$	$I_b \text{ (A)}$	$I_c \text{ (A)}$	$V_a \text{ (V)}$	$V_b \text{ (V)}$	$V_c \text{ (V)}$
01	6,40	6,45	5,15	38,00	38,00	34,00
02	6,38	6,45	5,12	38,00	38,00	35,00
03	6,38	6,45	5,10	40,00	40,00	36,50
04	6,42	6,42	5,10	42,50	42,50	39,00
05	6,58	6,40	5,10	46,50	47,50	43,50
06	6,58	6,36	5,08	47,50	49,00	45,00
07	6,60	6,35	5,05	48,00	50,00	45,50
08	6,60	6,35	5,05	48,50	51,00	46,00
09	6,60	6,35	5,05	48,00	51,00	46,50
10	6,60	6,35	5,00	49,00	52,00	47,00
11	6,66	6,35	4,95	49,50	52,50	47,50
12	6,65	6,35	4,95	49,50	52,50	47,50
13	6,66	6,35	4,94	50,00	53,00	47,50
14	6,66	6,32	4,92	50,00	53,00	47,50
15	6,71	6,32	4,90	50,50	53,75	48,00
16	6,71	6,33	4,90	50,50	54,00	48,00
17	6,73	6,31	4,90	51,00	54,00	48,50
18	6,75	6,35	4,85	51,00	54,50	48,75
19	6,75	6,35	4,84	51,00	55,00	49,00

Tabela AV.4 - Tabela de Potência, Força e Velocidade
para corrente média constante ($I_F = 6,0 \text{ A}$)

	$W_a \text{ (W)}$	$W_b \text{ (W)}$	$W_c \text{ (W)}$	$F \text{ (gf)}$	$N \text{ (rpm)}$
01	215,00	175,00	140,00	408,00	0,00
02	215,00	178,00	142,00	440,00	133,00
03	220,00	180,00	150,00	460,00	218,00
04	235,00	195,00	160,00	500,00	367,00
05	258,00	208,00	170,00	485,00	523,00
06	260,00	205,00	170,00	450,00	568,00
07	260,00	200,00	170,00	400,00	610,00
08	260,00	200,00	170,00	375,00	625,00
09	260,00	200,00	170,00	340,00	644,00
10	260,00	200,00	170,00	300,00	665,00
11	262,00	200,00	165,00	265,00	684,00
12	260,00	195,00	165,00	230,00	692,00
13	262,00	195,00	164,00	200,00	711,00
14	260,00	190,00	162,00	165,00	725,00
15	265,00	185,00	160,00	125,00	741,00
16	265,00	185,00	160,00	135,00	735,00
17	266,00	182,00	160,00	110,00	744,00
18	265,00	182,00	165,00	65,00	759,00
19	265,00	180,00	156,00	45,00	770,00

Tabela AV.5 - Tabela de Corrente e Tensão para corrente
média constante ($I_F = 7,0 \text{ A}$)

	$I_a \text{ (A)}$	$I_b \text{ (A)}$	$I_c \text{ (A)}$	$V_a \text{ (V)}$	$V_b \text{ (V)}$	$V_c \text{ (V)}$
01	7,45	7,55	5,95	47,00	46,50	41,50
02	7,50	7,50	5,96	52,50	52,50	49,00
03	7,60	7,50	5,95	54,00	55,00	51,00
04	7,50	7,50	5,96	53,00	53,50	50,00
05	7,58	7,45	5,94	54,00	55,50	51,50
06	7,60	7,42	5,95	54,50	56,00	52,50
07	7,60	7,40	5,90	56,00	57,50	53,00
08	7,65	7,42	5,90	56,50	58,00	54,00
09	7,65	7,40	5,88	57,50	59,50	54,50
10	7,70	7,40	5,85	57,50	60,00	55,00
11	7,71	7,40	5,84	58,00	60,50	55,50
12	7,75	7,38	5,84	58,00	61,50	56,00
13	7,73	7,40	5,80	58,00	61,50	56,00
14	7,72	7,40	5,80	58,50	62,00	56,00
15	7,73	7,40	5,80	58,50	62,00	56,25
16	7,72	7,40	5,80	58,50	62,50	56,50
17	7,73	7,40	5,78	58,50	62,50	56,25
18	7,73	7,40	5,78	58,50	62,50	56,25
19	7,75	7,40	5,75	58,50	62,50	56,25
20	7,75	7,40	5,75	58,50	62,50	56,25
21	7,75	7,40	5,75	58,50	62,50	56,25
22	7,81	7,38	5,70	58,50	62,50	56,00
23	7,80	7,40	5,68	58,50	62,50	56,00
24	7,80	7,40	5,65	58,50	62,50	56,00

Tabela AV.6 - Tabela de Potência, Força e Velocidade
para corrente média constante ($I_F = 7,0 \text{ A}$)

	$W_a \text{ (W)}$	$W_b \text{ (W)}$	$W_c \text{ (W)}$	$F \text{ (gf)}$	$N \text{ (rpm)}$
01	315,00	252,00	200,00	590,00	0,00
02	345,00	280,00	235,00	725,00	418,00
03	350,00	285,00	240,00	728,00	470,00
04	342,00	280,00	235,00	710,00	440,00
05	352,00	285,00	236,00	700,00	510,00
06	360,00	282,00	240,00	690,00	524,00
07	358,00	282,00	240,00	640,00	562,00
08	362,00	282,00	240,00	595,00	594,00
09	360,00	280,00	240,00	525,00	619,00
10	362,00	280,00	237,00	475,00	641,00
11	360,00	275,00	235,00	425,00	659,00
12	362,00	265,00	230,00	380,00	672,00
13	360,00	262,00	225,00	320,00	702,00
14	360,00	262,00	225,00	280,00	708,00
15	360,00	260,00	220,00	260,00	711,00
16	360,00	260,00	220,00	245,00	724,00
17	360,00	255,00	220,00	220,00	726,00
18	355,00	250,00	220,00	200,00	732,00
19	355,00	250,00	220,00	190,00	740,00
20	355,00	245,00	215,00	170,00	744,00
21	350,00	245,00	215,00	130,00	752,00
22	352,00	238,00	210,00	80,00	766,00
23	345,00	230,00	200,00	50,00	774,00
24	344,00	225,00	200,00	30,00	779,00

Tabela AV.7 - Tabela de Corrente e Tensão para tensão
média constante ($U_F = 48 \text{ V}$)

	$I_a \text{ (A)}$	$I_b \text{ (A)}$	$I_c \text{ (A)}$	$U_a \text{ (V)}$	$U_b \text{ (V)}$	$U_c \text{ (V)}$
01	8,25	8,40	6,75	50,00	50,00	45,00
02	8,15	8,28	6,60	50,00	50,00	45,00
03	7,98	8,00	6,30	50,00	50,00	45,50
04	7,70	7,70	6,10	50,00	50,00	46,50
05	7,35	7,35	5,95	49,00	50,00	46,00
06	7,20	7,15	5,75	48,50	50,00	46,00
07	7,02	6,92	5,55	48,50	50,00	46,00
08	6,90	6,75	5,50	48,50	50,00	46,00
09	6,80	6,66	5,35	47,50	50,00	45,00
10	6,73	6,52	5,25	47,50	50,00	45,00
11	6,70	6,50	5,20	47,50	50,00	45,00
12	6,70	6,44	5,15	47,50	50,00	45,50
13	6,65	6,40	5,10	47,50	50,00	45,50
14	6,63	6,34	5,03	47,50	50,00	45,50
15	6,66	6,28	4,98	47,50	50,50	45,50
16	6,66	6,35	5,02	47,50	51,00	46,25
17	6,64	6,31	4,96	47,50	51,00	46,00
18	6,64	6,30	4,93	47,50	51,25	45,50
19	6,62	6,28	4,91	47,50	51,25	45,50
20	6,60	6,25	4,90	47,50	51,25	45,50
21	6,60	6,25	4,88	47,50	51,25	45,50
22	6,62	6,25	4,85	47,50	51,25	45,50
23	6,62	6,25	4,85	47,50	51,50	45,50
24	6,65	6,25	4,85	47,50	51,50	45,50

Tabela AV.8 - Tabela de Potência, Força e Velocidade
para tensão média constante ($V_F = 48 \text{ V}$)

	$W_a \text{ (W)}$	$W_b \text{ (W)}$	$W_c \text{ (W)}$	$F \text{ (gf)}$	$N \text{ (rpm)}$
01	362,00	290,00	240,00	750,00	0,00
02	360,00	286,00	240,00	735,00	146,00
03	350,00	280,00	230,00	742,00	286,00
04	340,00	270,00	225,00	715,00	381,00
05	310,00	255,00	210,00	670,00	433,00
06	300,00	245,00	205,00	640,00	459,00
07	290,00	215,00	200,00	575,00	518,00
08	280,00	220,00	190,00	505,00	557,00
09	270,00	210,00	185,00	500,00	553,00
10	262,00	210,00	180,00	458,00	581,00
11	261,00	203,00	178,00	430,00	595,00
12	260,00	200,00	170,00	378,00	634,00
11	258,00	198,00	170,00	326,00	645,00
14	255,00	190,00	164,00	295,00	661,00
15	252,00	185,00	160,00	255,00	676,00
16	252,00	185,00	160,00	235,00	690,00
17	250,00	180,00	160,00	205,00	701,00
18	245,00	180,00	156,00	175,00	714,00
19	245,00	180,00	152,00	150,00	726,00
20	242,00	175,00	150,00	130,00	730,00
21	240,00	170,00	150,00	100,00	744,00
22	240,00	165,00	145,00	75,00	756,00
23	240,00	165,00	145,00	70,00	754,00
24	240,00	162,00	142,00	50,00	765,00

APÊNDICE VI

CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE UTILIZANDO OS ENSAIOS TRADICIONAIS

AVI.1 - INTRODUÇÃO

O comportamento do CAL foi verificado a partir de um circuito elétrico equivalente com parâmetros obtidos através de um ensaio em vazio e outro com lator bloqueado, semelhante ao adotado para o estudo dos conversores rotativos.

Neste levantamento foi admitido que a reatância $X'2$ é desprezível, dado o secundário construído com uma lâmina de alumínio. Assim, o circuito elétrico para análise é semelhante ao mostrado na Figura AVI.1.

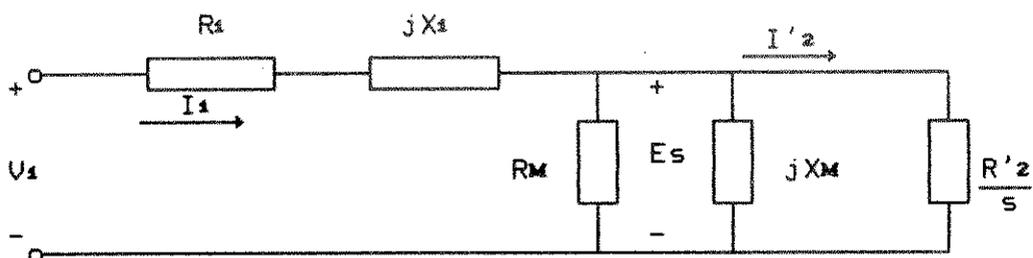


Figura AVI.1 - Circuito Elétrico Equivalente

AVI.2 - ENSAIO EM VAZIO

Para a determinação dos parâmetros do circuito mostrado na figura AVI.1, primeiramente é realizado um ensaio em vazio onde são levantados os valores de tensão, corrente e potência por fase:

V_0 - tensão no ensaio em vazio por fase

I_0 - corrente no ensaio em vazio por fase

W_0 - potência no ensaio em vazio por fase

Para este ensaio o circuito pode ser reduzido a uma impedância equivalente, como mostrado na figura AVI.2

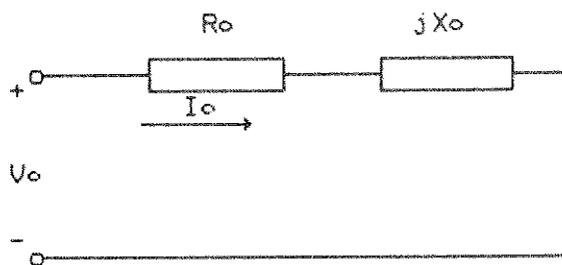


Figura AVI.2 - Circuito Elétrico Equivalente para Ensaio em Vazio.

Os valores de R_0 e X_0 , do circuito anterior, podem ser determinados através das leituras efetuadas:

$$Z_0 = R_0 + j.X_0 \quad (\text{AVI.1})$$

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (\text{AVI.2})$$

$$R_0 = \frac{W_0}{I_0^2} \quad (\text{AVI.3})$$

$$X_o = \left[Z_o^2 - R_o^2 \right]^{1/2} \quad (\text{AVI.4})$$

AVI.3 - ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO

O segundo ensaio realizado, é feito com o linor travado mecânicamente, e são feitas leituras de tensão, corrente e potência por fase:

V_b - tensão no ensaio em linor bloqueado por fase

I_b - corrente no ensaio em linor bloqueado por fase

W_b - potência no ensaio em linor bloqueado por fase

Neste ensaio o circuito elétrico é reduzido a uma impedância equivalente, como mostrado no circuito da figura AVI.3:

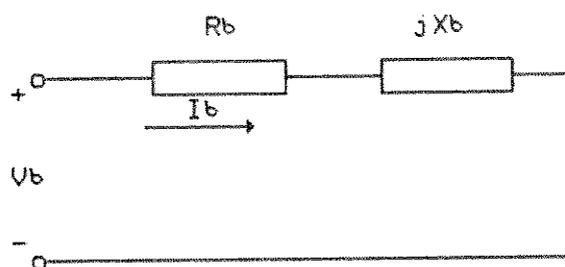


Figura AVI.3 - Circuito Elétrico Equivalente para Ensaio com Linor Bloqueado.

Os valores de R_b e X_b , do circuito da figura AVI.3 pode ser calculado através das leituras efetuadas:

$$Z_b = R_b + j.X_b \quad (\text{AVI.5})$$

$$Z_b = \frac{V_o}{I_o} \quad (\text{AVI.6})$$

$$R_b = \frac{W_b}{I_b^2} \quad (\text{AVI.7})$$

$$X_b = \left[Z_b^2 - R_b^2 \right]^{1/2} \quad (\text{AVI.8})$$

AVI.4 - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO TRADICIONAL

Com os valores calculados nos tópicos anteriores e admitindo que os circuitos calculados para operação em vazio e em línor bloqueado diferem apenas pelo escorregamento, pode-se comparar o circuito da figura AVI.1 com o das figuras AVI.2 e AVI.3. As equações resultantes dessas comparações são:

comparando-se os circuitos das Figuras AVI.1 e AVI.2, obtém-se:

$$\frac{(s_o \cdot X_M \cdot R_M + R'z \cdot X_M) \cdot (X_M \cdot R_M \cdot R'z)}{(R_M \cdot R'z)^2 + (s_o \cdot X_M \cdot R_M + X_M \cdot R'z)^2} + R_s = R_o \quad (\text{AVI.9})$$

$$\frac{(R'z \cdot R_M) \cdot (X_M \cdot R_M \cdot R'z)}{(R_M \cdot R'z)^2 + (s_o \cdot X_M \cdot R_M + X_M \cdot R'z)^2} + X_s = X_o \quad (\text{AVI.10})$$

comparando-se os circuitos das Figuras AVI.1 e AVI.3, obtém-se:

$$\frac{(s_b \cdot X_M \cdot R_M + R'z \cdot X_M) \cdot (X_M \cdot R_M \cdot R'z)}{(R_M \cdot R'z)^2 + (s_b \cdot X_M \cdot R_M + X_M \cdot R'z)^2} + R_s = R_b \quad (\text{AVI.11})$$

$$\frac{(R'z \cdot R_M) \cdot (X_M \cdot R_M \cdot R'z)}{(R_M \cdot R'z)^2 + (s_b \cdot X_M \cdot R_M + X_M \cdot R'z)^2} + X_s = X_b \quad (\text{AVI.12})$$

Deve-se ressaltar que o valor de R_1 é obtido através de um ensaio com corrente contínua aplicada aos terminais do enrolamento de estator e que os escorregamentos s_0 e s_b , das equações anteriores são diferentes e, para os conversores rotativos, são tomados como:

$$s_0 = 0$$

$$s_b = 1$$

Isto significa que para conversores rotativos o escorregamento em vazio é desprezível. Esta consideração também foi feita para os conversores lineares, apesar de não ser uma hipótese válida, para simular o resultado que um projetista encontraria se fosse calcular o circuito elétrico de maneira tradicional. O resultado para este procedimento é apresentado no Capítulo 6, Figuras 6.4 à 6.7.

Para tentar melhorar o circuito obtido outros cálculos foram efetuados, considerando s_0 diferente de zero e obtendo-se novos parâmetros para o circuito equivalente. A tabela abaixo, mostra os valores calculados para diversos escorregamentos em vazio e para operação com corrente constante de de 6,0 A.

Tabela AVI.1 - Parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente

	$s_0 = 0$	$s_0 = 5 \%$	$s_0 = 10 \%$	$s_0 = 15 \%$
R_1	2,600	2,600	2,600	2,600
X_1	2,658	2,658	2,658	2,658
R_M	8,191	9,166	10,561	12,727
X_M	6,050	6,050	6,050	6,050
R'_z	4,057	3,854	3,651	3,448