

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

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por GILIO ALUISIO SIMONE  
e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 17 06 92  
Orientador

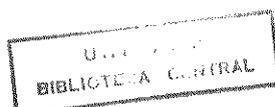
CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES DE DUPLA FACE  
- TEORIA E PROJETO -

Autor: GILIO ALUISIO SIMONE

Orientador: PROF. DR. CARLOS RODRIGUES DE SOUZA†

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

JUNHO - 1992



À minha esposa Zilda

## AGRADECIMENTOS

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

Ao Professor Renato Crivellari Creppe pela ajuda constante, ao longo do 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 Edwin Avólio, Paulo José Amaral Serni e Ivo Reis Fontes, que muito contribuíram para o sucesso alcançado.

Ao amigo e Diretor, Professor Doutor Nivaldo José Bósio, pelo incentivo e a atenção facultada.

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

Ao Engenheiro Alfredo Ulson pela montagem do protótipo BRU-03 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 pesquisar o funcionamento dos CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES, os fenômenos que cercam esta família de conversores, desenvolver, de forma explícita, as equações que governam o funcionamento dos mesmos, buscando e comparando métodos de análise e compensação dos efeitos mais atuantes, desenvolver uma técnica de projeto que permita desenvolver e ensaiar os referidos conversores.

Para tanto, desenvolve-se equações, modelos matemáticos e, a partir da teoria dos Conversores Assíncronos Rotativos, desenvolve-se uma técnica de projeto, constroi-se um protótipo, que é levado a testes. Auxiliado por uma Rotina Simuladora, efetua-se simulações e compara-se com os dados obtidos com o protótipo construído e ensaiado.

Uma Rotina Computacional, usando a técnica de projeto é desenvolvida e aplicada na obtenção dos parâmetros mecânicos e elétricos, para a construção do protótipo.

## ABSTRACT

The behavior of the LINEAR INDUCTION MOTORS and the phenomena involved with this family of electrical machines are investigated in this Thesis. Equations which govern linear machines analysis and models are presented. The different ways used to compensate end effects are also discussed and appropriately considered in the development of a linear motor design technic which is the ultimate aim of this study.

A prototype was designed with the developed tool and tests were performed using this machine now available in the laboratory. Simulation results obtained from linear machine equations showed good correlation with corresponding output measured in the real machine.

The linear motor design digital program may be applied to obtain both electrical and mechanical machine parameters.

## Í N D I C E

### CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

1.1: Aspectos Gerais.....	1
1.2: Proposta do Trabalho e Conteúdo dos demais capítulos.....	6

### CAPÍTULO 2 : O CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR DE DUPLA FACE

2.1: Introdução.....	11
2.2: Classificação dos CALs.....	12
2.2.1: Máquinas de Força.....	16
2.2.2: Máquinas de Energia.....	17
2.2.3: Máquinas de Potência.....	18
2.3: Aplicações Presentes e Futuras de Conversores Assíncronos Lineares.....	19
2.3.3: Propulsão Eletromagnética.....	20
2.4: Elementos Fundamentais do Estudo dos CALs.....	21
2.4.1: Aspectos Gerais.....	21
2.4.2: Velocidade Linear Síncrona do Campo Magnético de Translação.....	21
2.4.3: Expressão da Potência Mecânica Convertida, para os CALs.....	24

2.5: Expressão do Campo Magnético de Translação no entreferro dos Conversores Assíncronos Lineares.....	25
2.6: Fator de Qualidade - G -.....	27
2.6.1: Introdução.....	27
2.6.2: Comportamento das correntes induzidas na Lâmina Linórica.....	32
2.6.3: Entreferro Realístico.....	36
2.6.4: O Fator de Qualidade Realístico.....	37
2.7: Densidade Linear de Corrente.....	40
2.7.1: Introdução.....	41
2.7.2: O Conceito de Densidade Linear de Corrente.....	42
2.7.3: Expressão Temporal da Densidade Linear de Corrente, em CALs de Dupla Face.....	44
2.8: Efeito Pelicular na Lâmina Linórica.....	47

CAPÍTULO 3: ANÁLISE UNIDIMENSIONAL DO CONVERSOR  
ASSÍNCRONO LINEAR

3.1: Introdução.....	51
3.2: Comportamento da Densidade de Campo Magnético no Entreferro dos CALs.....	55
3.2.1: Conversor operando em vazio.....	55
3.2.1.1: Conversores com número par de polos.....	60
3.2.1.2: Conversores com número ímpar de polos.....	61
3.2.1.3: Considerações.....	62

3.2.2: Conversor operando em carga.....	62
3.2.3: Conversor de indutor muito longo operando em carga.....	67
3.2.4: Comportamento Fasorial da Densidade Linear de Corrente e da Densidade de Campo Magnético.....	71
3.3: Estudo do Comportamento da Densidade de Campo Magnético na Coroa do Indutor dos CALs, operando em vazio.....	74
3.3.1: Introdução.....	74
3.3.2: Altura da Coroa do Indutor nos Converso- res com número par de polos.....	77
3.3.3: Altura da Coroa do Indutor nos Converso- res com número ímpar de polos.....	79
3.3.4: Conclusões.....	80
3.4: Estudo do Comportamento das Forças Eletromo- trizes Induzidas para Indutores muito Longos e Linores Contínuos.....	82
3.4.1: Forças Eletromotrizes Induzidas nos Con- dutores Indutóricos.....	82
3.4.1.1: Introdução.....	82
3.4.1.2: Densidade Média de Campo Magnético.....	86
3.4.1.3: Considerações.....	88
3.4.2: Forças Eletromotrizes Induzidas no Linor	89
3.4.2.1: Introdução.....	89
3.4.2.2: Força atuante na Lâmina Linórica	94
3.5: Considerações.....	97

## CAPÍTULO 4: EFEITOS DE EXTREMIDADES

4.1: Introdução.....	99
4.2: Comportamento da Densidade de Campo Magnético, em presença do Efeito Longitudinal de Extremi- dade.....	106
4.3: Comportamento da Densidade de Campo Magnético, em presença do Efeito Transversal de Borda.....	113
4.4: Conversores Assíncronos Lineares de Baixa e de Alta Velocidades.....	125
4.4.1: Introdução.....	125
4.4.2: Curvas Características.....	127
4.4.3: A Influência do entreferro no com- portamento dos CALs.....	129
4.5: Conclusões.....	130

## CAPÍTULO 5: UM CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

5.1: Introdução.....	131
5.2: O Circuito Elétrico Equivalente dos CALs.....	133
5.2.1: Aspectos Gerais.....	133
5.2.2: Fatores Corretores de Bolton.....	136
5.2.3: Fator Corretor de Rusell - Norsworthy...	139
5.2.4: A presença do Efeito Transversal de Bor- da no desempenho dos CALs.....	140
5.2.5: A influência do Efeito Longitudinal de Extremidade no Intensidade da Força Pro- pulsora dos CALs.....	143

5.2.5.1:	Fator de Extremidade de Entrada	143
5.2.5.2:	Conjunto de Hipóteses para o estabelecimento do "Fator de Extremidade de Entrada".....	146
5.2.5.3:	Circuito Elétrico Equivalente desenvolvido para compensar a influência do Efeito Longitudinal de Extremidade.....	148
5.2.5.4:	Equacionamento do Fator de Extremidade - $K_E$ .....	152
5.3:	Considerações.....	155

CAPÍTULO 6: UM OUTRO ENFOQUE PARA A CORREÇÃO DA  
 PRESENÇA DO EFEITO LONGITUDINAL DE  
 EXTREMIDADE NO COMPORTAMENTO DOS CALS

6.1:	Introdução.....	157
6.2:	A Força Propulsora e o Efeito Transversal de Borda.....	160
6.3:	Forças Eletromotrizes Induzidas nos condutores do Indutor, no modelo "por fase".....	162
6.3.1:	Considerações.....	165
6.4:	Forças Eletromotrizes Induzidas nos condutores Indutóricos, em presença dos Efeitos de Extremidades.....	165
6.5:	Conclusões.....	166

CAPÍTULO 7: ANÁLISE DO MÉTODO PARA O CÁLCULO DOS  
PARÂMETROS ELÉTRICOS E MECÂNICOS DOS  
CALs DE DUPLA FACE

7.1: Introdução.....	169
7.2: Filosofia de Projeto.....	170
7.3: Desenvolvimento das Equações Fundamentais para o projeto de CALs.....	171
7.3.1: Resistência do Enrolamento Indutório, por fase e por indutor.....	174
7.3.2: Altura Fictícia da Lâmina de Corrente do Indutor.....	178
7.3.3: Resistência Equivalente do Linor, "por fase".....	179
7.3.3.1: Análise da Resistência Equivalente do Linor, "por fase".....	181
7.3.3.2: Efeito Pelicular.....	183
7.3.3.3: Influência da Trajetória das Cor- rentes Induzidas.....	186
7.3.3.4: Reflexão da Resistência Equiva- lente do Linor.....	189
7.3.3.5: Análise.....	190
7.3.4: Reatância de Magnetização dos CALs, para o modelo "por fase".....	192
7.3.5: O Fator de Qualidade Realístico e sua pre- sença no estudo dos CALs.....	196
7.3.6: Reatância de Dispersão do Indutor.....	199
7.3.6.1: Reatância de Dispersão na região das ranhuras.....	201

7.3.6.2: Reatância Diferencial de Dispersão.....	205
7.3.6.3: Reatância de Dispersão nas Cabeças de Bobinas.....	206
7.3.7: Força Propulsora Teórica.....	207
7.3.8: Largura do Indutor.....	208
7.3.9: Altura Mínima da Coroa do Indutor.....	210
7.3.10: Número de Polos e de Condutores Ativos "por fase".....	213
7.3.11: Perdas no Ferro, "por fase".....	217
7.3.12: A Operação com Dois Estatores Ativos.....	219
7.3.13: Rendimento dos CALs.....	222
7.3.14: Fator de Potência dos CALs.....	225
7.4: Conclusões.....	228

## CAPÍTULO 8: DESENVOLVIMENTO DE ROTINA COMPUTACIONAL PARA O PROJETO DE CALS

8.1: Aspectos Gerais.....	229
8.2: Filosofia do Programa.....	230
8.2.1: Dados Fornecidos ao Programa.....	230
8.2.2: Fluxograma.....	231
8.3: Exemplo de Aplicação.....	239
8.4: Conclusões.....	244

## CAPÍTULO 9: O CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR EM ENSAIO

9.1: Introdução.....	247
9.2: Características Fundamentais do Protótipo.....	249

9.3: Ensaio para a Determinação de Dados.....	252
9.3.1: Freio de Prony.....	253
9.3.2: Ensaio a Corrente Constante.....	254
9.4: Análise dos Dados Obtidos nos Ensaio.....	264
9.5: Conclusões.....	264

## CAPÍTULO 10: COMENTARIOS E CONCLUSÕES

10.1: Introdução.....	267
-----------------------	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	271
---------------------------------	-----

### APÊNDICE I - FATOR DE CARTER

AI-1: Introdução.....	277
-----------------------	-----

### APÊNDICE II - COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNETICO EM UM CAL OPERANDO EM VAZIO

AII-1: Aspectos Gerais.....	279
-----------------------------	-----

### APÊNDICE III - ANÁLISE DO FLUXO MAGNETICO POLAR

AIII-1: Aspectos Gerais.....	283
------------------------------	-----

### APÊNDICE IV - A FORÇA PROPULSORA A PARTIR DA ANÁLISE UNIDIMENSIONAL

AIV-1: Aspectos Gerais.....	286
-----------------------------	-----

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

#### 1.1. ASPECTOS GERAIS

O interesse pelos conversores com configuração linear tem início, concomitante, com o interesse pelos conversores com configuração cilíndrica. A mais antiga menção a conversores lineares parece ser a patente concedida a Mayor, de Pittsburg - E.U.A.[2]. Nesta patente é feita a primeira descrição de uma máquina de indução linear, isto em 1890. Em seguida, uma outra patente é concedida a Weaver, Jacquard and Electric Shuttle, Co., a qual, julgada pelo seu título, trazia enorme esperança para o campo das máquinas lineares - propunha-se utilizá-las na propulsão de projéteis, em artilharia. Patentes e estudos subsequentes mostram o interesse dos pesquisadores do final do século passado, no conversor com configuração linear.

Ao final da II Guerra Mundial, foram produzidas máquinas lineares para acelerar aeronaves em pistas de decolagem instaladas na cobertura de porta-aviões. Estas máquinas, operando como motores, chegaram a alcançar potências de 8.000 HP e 10.000 HP, respectivamente. Aceleravam uma aeronave de 5000 kgf, do repouso à velocidade de 210 Km/h, num percurso de 170 m, em 4,2 segundos.

O ano de 1946 marca o início do estudo dos conversores lineares seguindo metodologia científica. Em 1957, o Prof. Eron R. Laithwaite faz publicar nos "IEE Proceedings", matéria específica sobre os referidos conversores - "Linear Induction Motors". Esse artigo é leitura obrigatória para os pesquisadores desta imensa família a qual, ao longo de todo este trabalho, será chamada de CONVERSORES LINEARES. Dado a pronunciada espessura do entreferro destes conversores, os mesmos podem ser analisados como magneticamente lineares, sem perda da necessária precisão. No entanto, o termo "LINEAR", a que se fará referência ao longo de todo o estudo, está e estará associado à configuração dos conversores e não ao seu comportamento magnético.

A configuração linear vem ganhando espaço e hoje presta-se às mais variadas e diversas aplicações - desde o acionamento de portas, bombeamento de metais líquidos em plantas nucleares, operação oscilatória em teares, posicionamento de ferramentas em máquinas de precisão até o transporte de passageiros a altas velocidades, de que são exemplos o veículo "HSST-03", da "Japan Air Line" e os veículos metroviários de Tóquio, Osaka, Vancouver e Toronto.

De forma semelhante aos japoneses e canadenses, estão trabalhando em veículos de transporte de passageiros, em escala real, os alemães, os americanos, os ingleses e os romenos. Observa-se, apesar da restrita literatura existente, que cada qual procura soluções próprias, particulares, adaptadas aos seus particulares casos - translação, suspensão e alimentação.

Com relação ao estudo de conversores lineares no Brasil, pesquisa bibliográfica mostrou existir, até o momento, duas teses e três dissertações apresentadas. A primeira tese, a nível de doutorado, foi apresentada em 1972 pelo Prof. Délio P. Guerrini à EESC-USP. A segunda, a nível de livre docência, foi apresentada em 1988, pelo Prof. Aurio G. Falcone à Escola - Politécnica - USP. A primeira dissertação, a nível de mestrado, foi apresentada por G. A. Simone, em 1989, à FEE da Universidade Federal de Uberlândia. As demais dissertações, a nível de mestrado, foram apresentadas em 1992, respectivamente, por R. C. Creppe, à FEE - UNICAMP e M. Moreira, a COPPE - UFRJ. Nenhum dos trabalhos enumerados entrou no mérito do projeto dos conversores lineares. Todos escolheram para estudo e análise, a categoria assíncrona. P. L. Alouche, escrevendo para a Revista Engenharia, publicada pelo Instituto de Engenharia, em Agosto de 1990, assim se manifesta: "A década de 90 se inicia marcada pela escassez de recursos para investimentos pesados, como os metrô. Procura-se a redução dos custos, tanto de implantação quanto de operação. Surge o motor linear a revolucionar o conceito de tração nas rodas, usado por um século de ferrovia. As rampas não tem mais limite para a tração".

"Os metrô leves de Toronto, Vancouver e Osaka o adotam na sua configuração de motor a estator curto. Berlim desenvolve um sistema elevado de metrô pequeno, tipo 'people move', utilizando motor linear a estator curto, com levitação magnética, tecnologia não aplicável, ainda, para metrô de maior capacidade...". Mais adiante, explica Alouche: "O metrô se prepara, assim, com passos firmes mas seguros em direção à adoção eventual, nas suas linhas futuras, da tecnologia do motor linear, que

torna o trem mais leve, permite vencer rampas de até 8% a 10% e reduzir o tamanho dos túneis, visto que as rodas só tem como função a sustentação do material e não sua tração. O motor linear, na sua tecnologia de estator curto e aplicável em metrô, está em desenvolvimento, tendo sido utilizada em Vancouver, Toronto e Osaka, em veículos leves. Ainda não tem aplicação em metrô pesado como o nosso, mas através dos estudos que estão sendo desenvolvidos na Companhia, nos Institutos de Pesquisas, nas Universidades e nos Fornecedores, a decisão, para sua eventual adoção nas futuras linhas do metrô de São Paulo, poderá ser tomada com base mais sólida".

Conversores lineares, principalmente os assíncronos, podem ser utilizados com vantagens, sobretudo onde prevaleçam movimentos com trajetórias lineares ou onde existam sistemas de execução complexa e manutenção difícil ou precária, como é o caso dos sistemas de irrigação por jato contínuo, dos moto-redutores, dos sistemas de tração em veículos ferroviários e metroviários [2]. Existem, pois, aspectos positivos que colocam os conversores lineares como fonte de estudo, apesar de que possam haver algumas características dos mesmos, não plenamente satisfatórias:

- i) O conversor assíncrono linear - CAL - possui, normalmente, rendimento e fator de potência relativamente menores, quando comparados com os apresentados pelos conversores assíncronos rotativos - CARs;
- ii) Devido a problemas técnicos e de construção, o

funcionamento em baixas velocidades (Número de Reynolds Magnético inferior a 1) sob frequência industrial constante, possui limitações econômicas [1];

iii) Não é propósito imediato o abandono das vantagens da transmissão de energia a partir de conjuntos de engrenagens, mesmo que estes possam mostrar-se complexos, onerosos e de difícil manutenção, e;

iv) No campo da tração ferroviária e metroviária, a roda e o trilho satisfazem as tarefas de sustentação, guia e acionamento, quando as rampas apresentam aclividade menor do que 4%. O coeficiente de atrito entre a roda e o trilho, proporciona a necessária força nas faixas de aclives e velocidades usuais nos sistemas de transporte ferroviário e metroviário [1].

Paralelo a estes fatores que, aparentemente, são desvantajosos para os CALs, encontram-se razões que são amplamente favoráveis, servindo para incrementar a utilização dos mesmos:

- i) São, praticamente, imunes às condições ambientais;
- ii) Exigem manutenção mínima, por não possuírem peças móveis e ou desgastáveis;

- iii) Oferecem elevada confiabilidade devido à construção robusta e relativamente simples;
- iv) Quando associados a sistemas eletrônicos de controle, oferecem amplas possibilidades de variação da força propulsora e da velocidade de translação;
- v) Conduzem à eliminação de componentes mecânicos de baixo rendimento e constante manutenção, necessários à conversão de movimentos rotativos em movimentos de translação, e;
- vi) Quando aplicados ao sistema ferroviário e metroviário, permitem aclives de 8% a 10%. Aclives maiores exigem potências incompatíveis e causam desconforto ao usuário.

O primário de um conversor assíncrono linear é o membro que é conectado à fonte de alimentação. O secundário pode ser formado por um núcleo magnético ranhurado dotado de um enrolamento, por um núcleo magnético ranhurado dotado de um enrolamento em curto circuito, semelhante a uma gaiola (Ladder) ou por uma lâmina fina, não magnética, na qual correntes elétricas são induzidas. O primário, estático ou não, será denominado INDUTOR. O secundário, LINOR, termo proposto por Laithwaite[35].

## 1.2. PROPOSTA DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo, desenvolver um estudo teórico pormenorizado dos conversores assíncronos lineares - CALs - de dupla face operando com linor laminar não magnético, estudar os Efeitos de Extremidades e demais efeitos presentes e desenvolver uma técnica de projeto dos referidos conversores, levando em conta os mencionados efeitos. O trabalho é concluído com o desenvolvimento e ensaio de um protótipo.

No Capítulo 2, desenvolve-se classificação topológica dos CALs, apresenta-se o CAL de dupla face, mostra-se aplicações específicas dos mesmos no importante campo do bombeamento de metais líquidos em plantas nucleares e na possível propulsão de navios e submarinos, atuando elétrica e magneticamente sobre o veio líquido. Em seguida, analisa-se os conceitos de Fator de Qualidade, de Densidade Linear de Corrente e de Densidade de Campo Magnético, aplicados a indutores muito longos e lineares contínuos.

No Capítulo 3, a partir de um modelo unidimensional, analisa-se o comportamento da Densidade de Campo Magnético no entreferro e nas coroas dos indutores, assim como o comportamento das forças eletromotrizes induzidas nos condutores indutóricos e no linor, guardadas as hipóteses do capítulo anterior.

No Capítulo 4, analisa-se a presença dos Efeitos de Extremidades - Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda - em CALs com indutores curtos. A aplicação do modelo unidimensional leva à pesquisa do comportamento da Densidade de Campo Magnético na direção longitudinal do conversor. Um modelo bidimensional permite analisar o comportamento da referida densi-

dade, na direção transversal do mesmo. Fatores de Correção de diversos fenômenos, são discutidos.

No Capítulo 5 introduz-se o Circuito Elétrico Equivalente no estudo dos CALs. Com auxílio de Fatores de Correção, leva-se o circuito elétrico equivalente empregado nos CARs a simular a operação dos CALs. A abordagem se faz necessária porque é tradicional o emprego de circuitos elétricos equivalentes no estudo de conversores, embora a precisão conseguida com o uso dos mesmos em CALs, seja relativa, quando seus resultados são comparados com os obtidos em conversores reais.

No Capítulo 6 aborda-se o comportamento dos CALs a partir da aplicação da equação da Densidade de Campo Magnético, obtida no Capítulo 4, na equação geral da força propulsora. Este enfoque se faz necessário, porque o projetista necessita de fortes ferramentas de controle ao longo das etapas do projeto.

No Capítulo 7 desenvolve-se as equações necessárias ao projeto de CALs de dupla face, levando-se em conta os vários efeitos atuantes nos mesmos. Além de expressões para os parâmetros mecânicos, desenvolve-se expressões para os elementos do Circuito Elétrico Equivalente, adaptando-o para simular a operação dos CALs.

No Capítulo 8 analisa-se uma Filosofia de Projeto, desenvolve-se Rotina Computacional para cálculo dos parâmetros mecânicos e elétricos de CALs e aplica-se a mesma no projeto de uma unidade conversora.

No Capítulo 9, com os parâmetros apurados no Capítulo anterior, confecciona-se um protótipo, submete-se o mesmo a ensaios, aquilata-se valores e, auxiliando-se de uma rotina computacional desenvolvida na referência [31], analisa-se os elementos obtidos.

No Capítulo 10 comenta-se o trabalho efetuado, analisa-se resultados e efetua-se propostas para novas pesquisas.

Nos Apêndices aborda-se temas relativos à passagens matemáticas e apresenta-se demonstrações de equações visualizadas no corpo do trabalho.

## CAPÍTULO 2

### O CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR DE DUPLA FACE

#### 2.1. INTRODUÇÃO

Na maioria das vezes, um movimento de translação é derivado do acoplamento de um conversor rotativo a um sistema mecânico que, com auxílio de engrenagens, parafusos com rosca sem fim e cremalheiras, efetua a conversão. Embora esta possa ser a forma mais convencional, pode não ser a mais confiável, a mais conveniente ou a mais simples, notadamente quando o movimento de translação deve processar-se por centenas de metros ou de quilômetros. Outros mecanismos podem ser grandemente simplificados quando a configuração linear é adotada. Toma-se, para exemplo, as bombas magnetohidrodinâmicas empregadas no bombeamento de metais líquidos em determinados estágios de plantas nucleares e os motores empregados na tração elétrica.

Inicialmente, achava-se que o conversor assíncrono linear - CAL - era um desdobramento do conversor assíncrono rotativo. Se, de forma hipotética, cortar-se axialmente o conversor assíncrono rotativo e dar-se às peças resultantes, uma forma plana, estar-se-á linearizando o entreferro do mesmo; é a modelagem característica do conversor fisicamente linear. Atualmente, refu-

ta-se análise tão simplista. A teoria dos CALs mostra, de forma clara, que os conversores assíncronos rotativos são casos particulares de suas contrapartidas lineares. A teoria dos CALs, simplificada, é potente ferramenta para os estudos dos CARs.

Este trabalho tratará dos CALs de duas faces magnéticas, sendo uma ou duas elétricas, dotados de lâmina móvel, magneticamente não condutora. Esta configuração é a porta de entrada para o estudo dos CALs - controla-se, com maior segurança, a variedade de efeitos presentes nos conversores de configuração linear. A Figura 2.1 permite a visualização do conversor em estudo. Ele é dotado de dois estatores ou INDUTORES e uma lâmina movel ou LINOR.

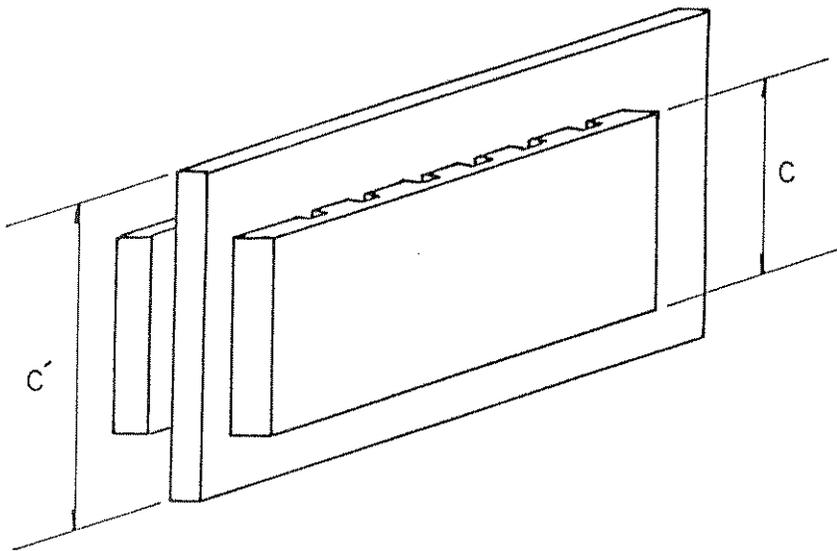


Figura 2.1: Conversor Assíncrono Linear de Dupla Face

Os indutores são sedes dos enrolamentos responsáveis pelo Campo Magnético de Translação. O linor é sede de correntes

elétricas induzidas que circulam por trajetórias ligadas às características dos indutores e do próprio linor. A interação do fluxo magnético linórico com o fluxo magnético indutórico, é a responsável pela força propulsora que atua no conversor.

Os princípios que embasam toda a teoria dos conversores, sejam eles do campo elétrico ou magnético, permitem afirmar que todo conversor rotativo possui uma contrapartida linear. Como a configuração cilíndrica é limitante, as possibilidades do estator e do rotor ficam, de certa forma, restritas. A configuração linear, por caracterizar-se como uma configuração 'aberta', dá ao pesquisador um sem número de opções. Tanto os conversores que operam em corrente contínua, como os que operam em corrente alternada, síncronos ou assíncronos, podem ser construídos em configuração linear. Uma das configurações mais desenvolvidas e pesquisadas, dentro das configurações lineares, é aquela implantada com o conversor assíncrono linear, tendo o primário ou indutor enrolado e o secundário ou linor em forma laminar, condutora elétrica e não magnética.

## 2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS CALs QUANTO A CONSTRUÇÃO

A Figura 2.2 mostra a grande família dos conversores assíncronos não rotativos. As variantes de conversores assíncronos não rotativos podem alcançar a casa da centena. Entretanto, muitas delas não tem nenhuma importância prática, ainda. Dentro das possibilidades da configuração indutor plano, linor laminar, pode-se visualizar duas de extrema aplicação prática [28]:

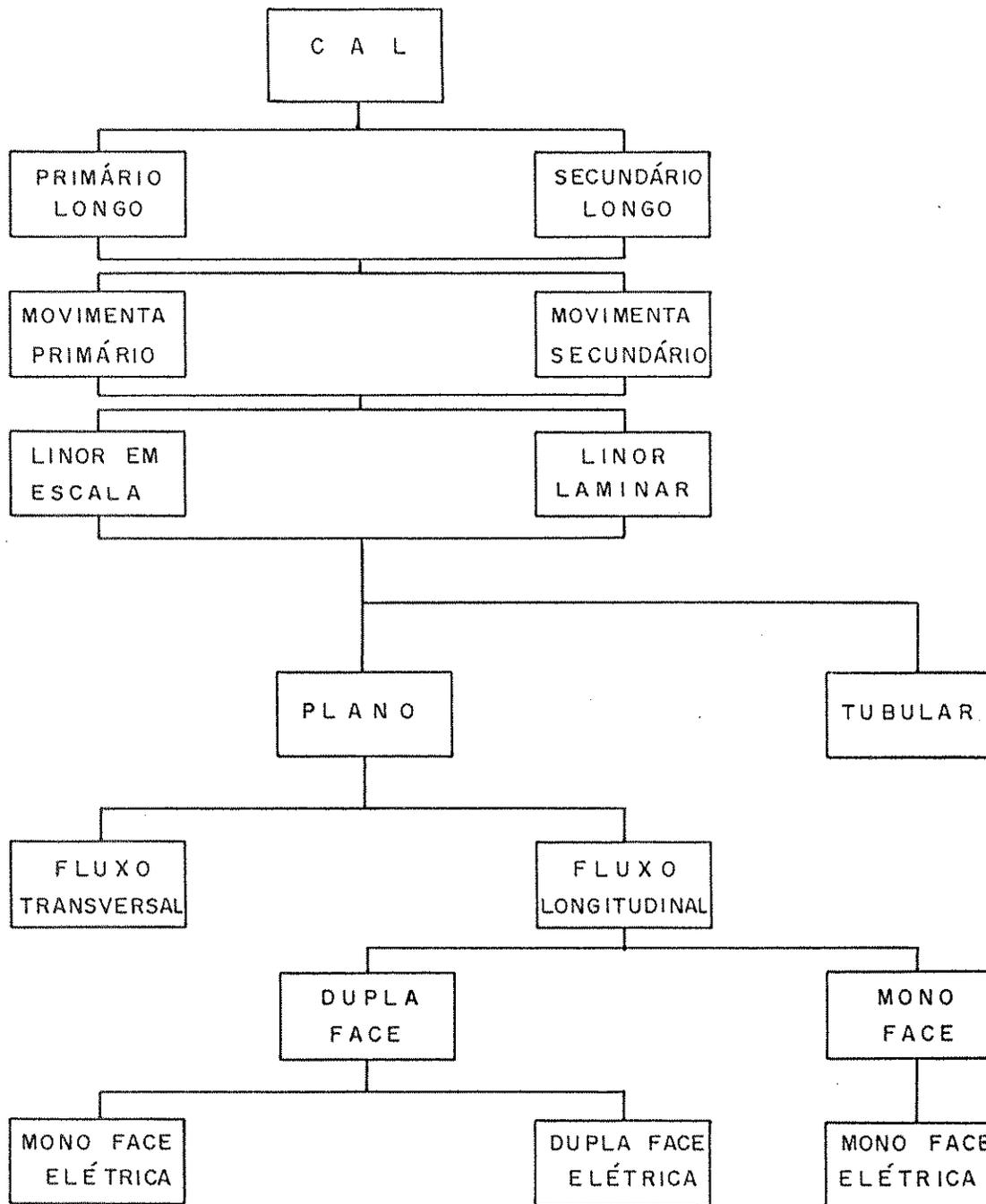


Figura 2.2: Os Conversores Assíncronos Lineares e suas variantes

- i) **Indutor Longo:** nesta variante o enrolamento indutor é estático e está depositado ao longo de todo perfil de translação. O secundário, um condutor elétrico laminar, viaja ao longo do perfil de translação - Figura 2.3(a), e;
- ii) **Indutor Curto:** nesta, o enrolamento indutor tem sede no membro móvel, que tem comprimento restrito e o secundário - linear - tem forma plana e não é condutor magnético. O indutor viaja ao longo do perfil de translação - Figura 2.3(b).

A Figura 2.3 mostra as configurações referidas. Em ambas, o enrolamento indutório é alojado em ranhuras praticadas em pacotes de chapas magnéticas, desprovidas de orientação magnética preferencial.

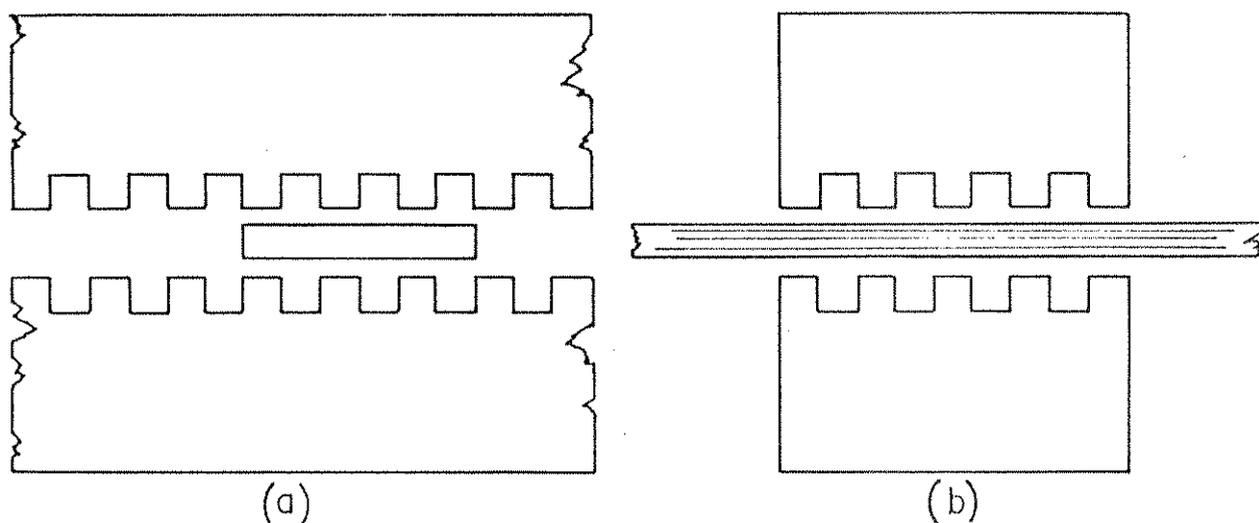


Figura 2.3: Configurações Básicas com Duplo Indutor

Na década de 50, teve início a divisão dos conversores lineares em três grupos distintos, cada um dos quais com suas próprias particularidades, vantagens e suas inerentes limitações.

Os três grupos de aplicação dos conversores lineares, são:

2.2.1. MAQUINAS DE FORÇA: São comumente conhecidas como "atuadores" e são normalmente empregadas para o desenvolvimento de baixas velocidades, em termos eletromecânicos. Frequentemente elas são requeridas para produzirem pressão e movimento matematicamente virtuais. As vantagens dos conversores lineares que operam como atuadores, com pequenas e médias forças propulsoras, são muitas. Os referidos conversores operam de forma não poluente, o que é de real importância, tanto em usos residenciais, como industriais. Eles são facilmente desconectados e reconectados em locais diferentes, tornando flexível sua operação. Se uma força maior é requerida, unidades adicionais podem ser anexadas. As unidades primárias podem ser mergulhadas em resina, tornando-se "a prova d'água" e adaptam-se a climas tropicais e atmosferas ativas. Sintetizando, são conversores destinados à produção de grandes acelerações, com finalidade primordial de tirar do repouso grandes massas e acelerá-las, perfazendo pequenos espaços e dando, como resultado final, pequenas velocidades.

2.2.2. MAQUINAS DE ENERGIA: Os aceleradores lineares foram o marco da história dos conversores lineares. O Lançador de Aeronaves Electropult, construído em 1945 foi, indubitavelmente, o maior, o mais rápido e o mais potente conversor linear, até o ano de 1950. Ele desenvolvia 10.000 HP e acelerava uma aeronave de 5.000 Kgf, do repouso a 210 Km/h, em 4,2 s. Sua Velocidade Linear Síncrona era de 362 Km/h. Antes do Electropult, Bikerland patenteou o canhão eletromagnético. Foi construída uma miniatura, somente. As principais vantagens dos conversores operando como Aceleradores ou Máquinas de Energia, são:

- i) O custo inicial é inferior, quando comparado com qualquer outro sistema análogo, mesmo os que operam por gravidade, e;
- ii) A velocidade final é controlada dentro de limites muito estreitos.

Em meados de 1960 um equipamento de testes para carros foi construído pela "Moters Industry Research Laboratories", de Nuneaton, Inglaterra. Quando o veículo era lançado contra a parede de concreto, a unidade motora, automaticamente, separava-se e conduzia-se ao repouso, por meio de um sistema de engrenagens. Esta máquina permaneceu em serviço por mais de 10 anos e, posteriormente, foi modificada para fornecer velocidades superiores a 50 Km/h. Fundamentalmente, Aceleradores ou Máquinas de Energia,

são conversores destinados a aplicar, a grandes massas, intensa força propulsora, de forma a levá-las, do repouso à elevado valor de velocidade, num curto espaço de tempo e dentro de uma especificada distância.

2.2.3. MÁQUINAS DE POTÊNCIA: Diversos fatores atrasaram a exploração dos conversores lineares em geral e das máquinas de potência em particular. Para desenvolver um sistema ferroviário como o proposto por Zehden, em 1905 ou o de Bachelet, em 1914, sem qualquer garantia de sucesso, dificuldades imensas deveriam ser transpostas. Uma aplicação da técnica linear, que recebeu grande incentivo foi o bombeamento de metais líquidos em plantas nucleares. A eficiência destas bombas, na ordem de 30%, somente serviu para confirmar que os conversores lineares seriam, do ponto de vista de rendimento, máquinas pobres.

As máquinas de Potência podem ter diversas aplicações específicas, tais como o transporte terrestre em altas velocidades e grandes distâncias e o transporte metroviário, com suas diversas filosofias. A aplicação específica e a localização do indutor, são

funções da variante escolhida ou proposta pelo projetista. A Velocidade Linear Síncrona do conversor é função do comprimento do passo polar e da frequência do sinal aplicado no enrolamento indutor . O número de pólos do enrolamento é qualquer, podendo ser par ou ímpar.

### 2.3. APLICAÇÕES PRESENTES E FUTURAS DE CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES [2]

As três últimas décadas puderam observar a evolução dos conversores lineares e suas variantes. Pesquisam-se conversores síncronos, assíncronos, de corrente contínua, de passo, etc e os resultados, em todas as áreas, são extremamente promissores. Haja vista as experiências japonesas, alemãs, canadenses e norte americanas, isto na aplicação 'transporte de massas'. Os conversores lineares são também projetados e desenvolvidos para aplicações mais simples, como o acionamento de portas, esteiras rolantes, pontes rolantes, ventiladores, etc.

Uma aplicação onde estes conversores são imbatíveis, está no bombeamento de metais líquidos em plantas nucleares (sódio, sódio-potássio) constituindo uma variante dos conversores magnetohidrodinâmicos de operação em corrente alternada. Nestes, o órgão móvel é o próprio metal líquido. Para colocar-se o mesmo em movimento, utiliza-se um Campo Magnético de Translação dotado de Velocidade Linear Síncrona  $V_{sx}$  e gerado por um enrolamento polifásico, adequadamente energizado. De acordo com a forma do canal pelo qual desliza o metal líquido (imerso no Campo Magnético de Translação) as bombas eletromagnéticas, denominadas de indução,

são classificadas.

**PROPULSÃO ELETROMAGNÉTICA** pode ser produzida pela reação entre o campo formado por um eletroímã e uma corrente elétrica fluindo, de forma adequada, pela água do mar. A idéia de usar esta espécie de propulsão - propulsão eletromagnética - nasceu em 1961. Em face da sofisticada tecnologia necessária para desenvolver um campo magnético de densidade suficientemente elevada, tecnologia esta não disponível na época, a idéia não pode, imediatamente, ser implementada. Entretanto, recentes avanços na tecnologia de temperaturas ultra baixas e de materiais supercondutores de elevado desempenho, tem tornado possível a produção de eletroímãs supercondutores, os quais são capazes de criar o formidável campo magnético necessário à propulsão de um navio ou de um submarino.

Em 1979, a "Kobe University of Mercantile Marine", do Japão, construiu o primeiro modelo de navio propulsado por eletroímãs supercondutores, protótipo a que denominou "ST-500". A "Japan Foundation of Shipbuildings Advancement" tem levado adiante o esforço de desenvolver e ensaiar um navio de 100 toneladas, propulsado a partir de eletroímãs supercondutores, alcançando velocidade de 8 nós (1990). Paralelamente, o "Tsukuba Institute" está desenvolvendo testes de desempenho em um modelo de navio, na escala 1:10, propulsado por eletroímãs supercondutores.

Outros campos, usando a propulsão dinâmica por magnetoplasma (MPD), estão sendo analisados com seriedade, como é o caso de vetores propulsados por MPD, usando o hidrogênio plasmático.

co - incríveis valores de correntes e de densidades de campo magnético são necessários para obter a força propulsora requerida.

## 2.4. ELEMENTOS FUNDAMENTAIS NO ESTUDO DOS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

### 2.4.1. ASPECTOS GERAIS

A teoria que norteia o estudo dos CALs pode ser caracterizada como uma teoria geral dos conversores assíncronos ( em regime). Alguns elementos básicos, como Densidade Linear de Corrente, Velocidade Linear Síncrona, Passo Polar adquirem, no conversor linear, importância primordial. Os CALs podem ser estudados a partir de dois critérios distintos: o critério da corrente e o da tensão constantes. Foi adotado para o desenvolvimento deste trabalho, o critério da corrente constante. A razão de tal escolha reside na atual facilidade de, por meios eletrônicos, escolher e manter uma corrente com valor eficaz constante. Mantida a mesma constante, obtém-se controle direto sobre a Densidade Linear de Corrente, que se caracteriza em importante parâmetro para a análise e o projeto dos CALs.

### 2.4.2. VELOCIDADE LINEAR SÍNCRONA DO CAMPO MAGNÉTICO DE TRANSLAÇÃO

Um CAL acompanha uma pista circular de raio de curvatura muito maior do que o comprimento longitudinal do mesmo. Um ponto M, vinculado a onda de densidade de campo, descreve uma trajetória circular de raio R. Como uma trajetória retilínea pode

ser analisada como sendo circular e possuindo um raio que tende para valores infinitos, escreve-se:

-  $w$ : velocidade angular do ponto  $M$  em torno de um ponto  $P$ , centro da trajetória circular;

-  $V$ : velocidade tangencial do referido ponto  $M$ :

$$V = w \cdot R \quad (2.1)$$

O Passo Polar do enrolamento depositado no CAL acima referido, pode ser descrito por:

$$t_p = \pi \cdot D / p \quad (2.2)$$

$$w = \omega_s \cdot (2/p)$$

onde  $D$  é o diâmetro de uma circunferência imaginária de raio  $R$ , a qual passa a meia distância no entreferro do conversor e  $p$  é o número de pólos magnéticos criados pelo enrolamento depositado no indutor do mesmo.

Associando-se as equações (2.1) e (2.2) obtém-se:

$$V_{sx} = R \cdot w = R \cdot (2\pi f) \cdot (2/p)$$

ou ainda:

$$V_{sx} = 2 \cdot t_p \cdot f \quad (2.3)$$

equação que expressa a Velocidade Linear Síncrona do Campo Magnético de Translação. Como o conversor é assíncrono, o membro móvel, operando como motor, translada-se a uma velocidade  $V_{RX} < V_{SX}$ , definindo, desta forma, uma função escorregamento  $s$  que pode ser expressa por:

$$s = \frac{V_{SX} - V_{RX}}{V_{SX}} \quad (2.4)$$

e:

$$V_{RX} = V_{SX} (1 - s) \quad (2.5)$$

que expressa a velocidade real do membro móvel dos CALs.

A equação (2.3) não é convencional no estudo dos conversores rotativos, porém, é de cardeal importância no estudo dos CALs.

Análise detalhada da equação (2.3), permite escrever:

- i) O conversor linear tem sua velocidade de translação aumentada se, mantida a taxa de escorregamento, aumentar-se o comprimento do Passo Polar;
- ii) O Passo Polar  $t_p$  está ligado a um grupo de bobinas que define uma porta elétrica. Como o indutor tem forma linear e tem um comprimento  $L$ , pode abrigar muitos grupos de bobinas de mesma

fase. Elevando-se o número de grupos, eleva-se o número de pólos, pode-se elevar a potência do conversor sem, contudo, modificar a sua Velocidade Linear Síncrona;

iii) A Velocidade Linear Síncrona cresce com a frequência do sinal aplicado às portas elétricas do enrolamento indutor, caracterizando-se como formidável meio de controle da velocidade dos CALs, e;

iv) O número de pólos do enrolamento residente no indutor é qualquer, podendo ser par ou ímpar. Este número pode intervir na potência e, se for ímpar, intervém nas distribuições das Densidades de Campo Magnético no entreferro e na coroa magnética do indutor.

#### 2.4.3: EXPRESSÃO DA POTÊNCIA MECANICA CONVERTIDA PARA OS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

Representando-se por  $f_x$  a força propulsora que atua em um CAL e por  $P_E$  a potência que atravessa o entreferro (potência convertida), escreve-se:

$$P_E = f_x \cdot \frac{dx}{dt}$$

onde  $x$  é um genérico deslocamento de um ponto qualquer do linor, em relação a um referencial estabilizado no indutor. Sendo  $V_{rx}$  a

velocidade do referido ponto em relação ao estabelecido referencial:

$$P_E = f_x \cdot V_{RX} \quad (2.6)$$

Como os conversores em estudo são assíncronos, a condição da operação dos mesmos, como motores, exige:

$$V_{RX} < V_{SX} \quad (2.7)$$

Ressalte-se que a presença da onda de Efeito Longitudinal de Extremidade de Entrada, em conversores definidos como de Baixa Velocidade, pode produzir forças aditivas e levar o conversor a operar, em vazio, em velocidades iguais ou superiores à Velocidade Linear Síncrona  $-V_{SX}$ . Este ponto será analisado no Capítulo 4.

Levando-se as equações (2.3) e (2.5) à equação (2.6), obtém-se:

$$P_E = f_x \left[ 2 \cdot t_p \cdot f \right] (1 - s) \quad (2.8)$$

equação que estabelece relação entre a potência convertida e parâmetros elétricos e mecânicos do conversor. A presença dos Efeitos de Extremidades impede, neste momento, qualquer análise da força propulsora  $f_x$ .

O fenômeno a que se denomina Campo Magnético Girante, presente nos conversores rotativos síncronos e assíncronos, é mantido quando, ficticiamente, os referidos conversores são cortados axialmente e linearizados (guardadas as peculiares condições de um conversor linear de indutor e ou linor finitos). O campo magnético presente, agora translada-se com Velocidade Linear Síncrona  $V_{sx}$ , dada pela equação (2.3).

O indutor do conversor pode possuir  $m$  portas elétricas, defasadas no espaço do entreferro de um determinado valor  $X_0$ , que será função das características do enrolamento.

Com as portas do indutor convenientemente dispostas e alimentadas a partir de uma fonte de correntes simétricas e equilibradas, obtém-se uma distribuição de forças magnetomotrizes no entreferro do conversor. A partir de uma cuidadosa distribuição de bobinas faz-se com que, na extensão de um passo polar, apareça uma onda de força magnetomotriz com comportamento tal que permite a sua decomposição em uma onda fundamental e em um dosado conteúdo harmônico. A técnica de enrolar, se for desejável, pode levar à minimização de alguns harmônicos presentes no referido conteúdo.

Quando o critério adotado é o da corrente constante, a Densidade de Campo Magnético no entreferro, para indutor ou indutores e linor infinitamente longos, tem por expressão:

$$b_s(x,t) = B_m(s) \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \delta_s) \quad (2.9)$$

onde  $\delta_s$  é o ângulo de defasamento entre a Densidade de Campo Mag-

nético no entreferro e a Densidade Linear de Corrente ( $\bar{J}_s$ ), observadas como fasores. O ângulo de defasamento  $\delta_s$  é função do escorregamento do conversor e para  $s \rightarrow 0$ , o ângulo de defasamento  $\delta_s \rightarrow \pi/2$ . Observar o comportamento de  $\delta_s$  na Figura 2.4.

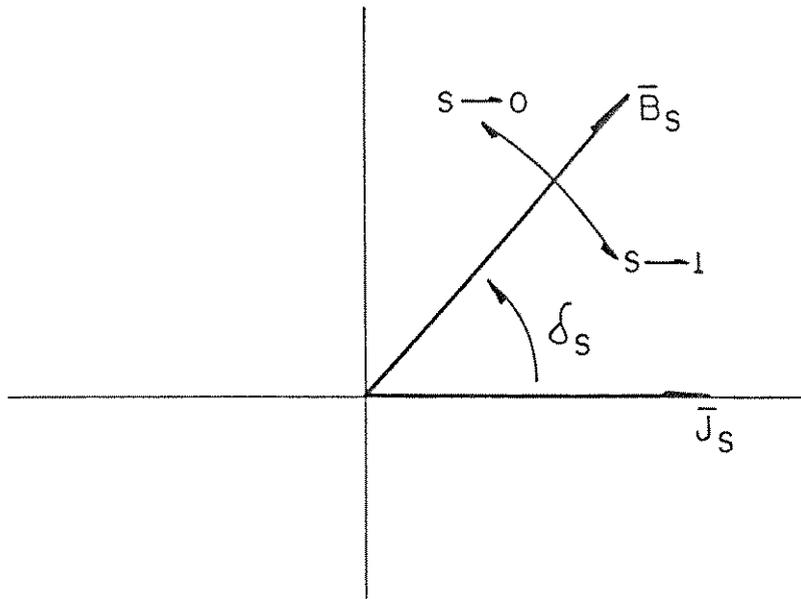


Figura 2.4: Comportamento dos Fasores  $\bar{B}_s$  e  $\bar{J}_s$

## 2.6. FATOR DE QUALIDADE - G -

### 2.6.1. INTRODUÇÃO

O Fator de Qualidade - G - expressa a habilidade de um conversor eletromagnético em converter energia elétrica em mecânica ou vice-versa. Foi proposto por E.R. Laithwaite [13] em 1965. A base conceitual do Fator de Qualidade está em que, para o estabelecimento de um fluxo magnético em determinada estrutura eletromecânica e este fluxo transferir energia, existe a necessi-

dade de se efetuar circulação de uma corrente elétrica por um enrolamento associado àquela. Desta forma, associa-se uma força eletromotriz a uma corrente elétrica, esta a uma força magnetomotriz que, por sua vez, é associada a um fluxo magnético. Muitos dos aspectos que envolvem um circuito elétrico, são conhecidos por leigos e estes podem identificar aspectos nocivos que possam existir em determinada instalação elétrica. Menos familiar, porém não menos importante, é o circuito magnético, o qual difere do circuito elétrico, principalmente no que tange à isolação ou a permeabilidade (a hipótese  $\mu=0$  é inexistente nos circuitos magnéticos). O problema de projetar elementos que envolvam circuitos magnéticos requer do projetista conhecimentos específicos, principalmente aqueles relacionados à dispersão de fluxo, às correntes parasitas, aos comportamentos  $B = B(H)$  e  $\mu = \mu(H)$ . Estabelecido um consistente conjunto de hipóteses, pode-se aplicar aos circuitos magnéticos as regras empregadas no projeto de circuitos elétricos.

Fluxo de dispersão a parte, existem leis que norteiam o projeto de circuitos elétricos, as quais podem ser empregadas no projeto de circuitos magnéticos, dotando estes de comportamento tal que permite enquadrá-los como bons circuitos magnéticos [13]. Nos circuitos elétricos existe a necessidade de uma diferença de potencial ou de uma força eletromotriz, para que haja circulação de corrente. Nos circuitos magnéticos, necessita-se de uma diferença de potencial magnético ou de uma força magnetomotriz, para que se obtenha um fluxo magnético. O Fator de Qualidade é o elemento que estabelece a ligação entre os circuitos elétrico e magnético acoplados e está relacionado com a facilidade de obter-se uma certa corrente elétrica, a partir de uma força eletromotriz e

um certo fluxo magnético, a partir de uma determinada corrente elétrica. Entre muitas relações que se pode estabelecer envolvendo o Fator de Qualidade [5], ressalte-se:

$$G_L \sim \frac{L}{R_E} \quad (2.10)$$

O acoplamento elétrico-magnético mostrado na Figura 2.5, permite uma primeira análise.

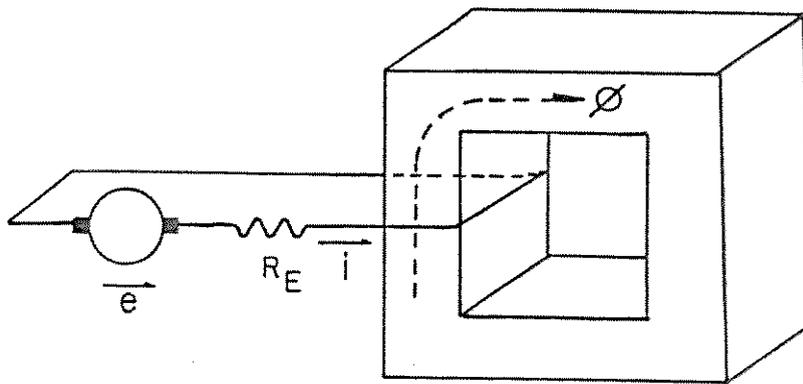


Figura 2.5: Acoplamento elétrico-magnético

A expressão (2.10) mostra que  $G_L$  (Fator de Qualidade proposto por Laithwaite) é proporcional à relação  $L/R_E$ , a qual possui a dimensão de tempo. Como é desejável que o fator pesquisado seja adimensional, uma das possíveis formas de fazê-lo, será adotar um parâmetro elétrico que contenha a variável  $1/\text{tempo}$ , como, por exemplo, a velocidade angular  $\omega_s$ , que está relacionada à frequência do sinal de alimentação do indutor. Assim:

$$G_L = \frac{\omega_s \cdot L}{R_E} \quad (2.11)$$

Assim, o conceito de Fator de Qualidade pode ser

estendido a qualquer conversor eletromagnético.

Em um conversor eletromecânico existe, normalmente, um ou mais circuitos elétricos que enlaçam um circuito magnético comum a todos. Isto torna necessário especificar a qual dos circuitos nominados se relacionam os parâmetros  $w_s$ ,  $L$  e  $R_e$ .

Se o estudo está voltado para CALs dotados de lâmina móvel, pode-se considerar que a corrente elétrica que chega aos terminais de entrada é subdividida em três parcelas que circulam em três ramos distintos:

- Uma para o ramo constituído pela reatância de magnetização  $X_{mag}$ ;
- Uma para o ramo constituído pela resistência simuladora das perdas no ferro  $R_{fe}$ ;
- Uma para o ramo constituído pelo circuito de força, representado pela resistência do circuito linórico, refletida no circuito indutórico.

Embora a corrente que passa pelo ramo de  $R_{fe}$  seja muito pequena em relação às correntes que passam pelos outros dois ramos, manter-se-á, ao longo de todo este trabalho, o ramo simulador das perdas no ferro.

No que tange ao conversor, o mecanismo de conversão eletromecânica de energia começa no ponto de intervenção do circuito magnético, isto é, a conversão eletromecânica é independente do valor da impedância do circuito primário e das perdas no ferro.

Assim, se o Circuito Elétrico Equivalente for empregado como auxiliar para análise, somente os ramos de magnetização e de força estão envolvidos no processo de conversão eletromecânica de energia e, portanto, na caracterização de GL. Como nos CALs a dispersão de fluxo magnético na lâmina linórica não é considerada, o Fator de Qualidade proposto por Laithwaite [5], tem por expressão:

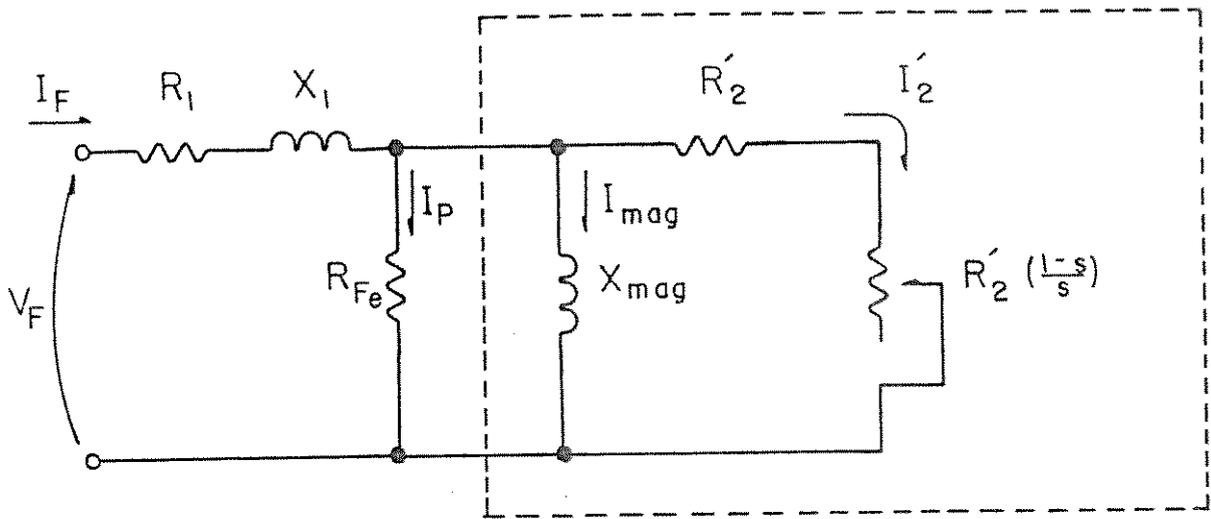


Figura 2.6: Circuito Elétrico Equivalente de um CAL, desconsiderando-se os Efeitos de Extremidades

$$GL = X_{mag} / R'_2 \quad (2.12)$$

Demonstra-se, a partir da equação (2.12) que, sustentada a hipótese da lâmina linórica não apresentar dispersão de fluxo, o Fator de Qualidade para os CALs pode ser expresso por:

$$GL = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot \omega s}{\rho'_R \cdot \Pi^2 \cdot g} \quad (2.13)$$

onde  $\rho'_R$  representa a resistividade superficial da lâmina linórica, desconsiderado o comportamento da corrente induzida na mesma.

## 2.6.2: COMPORTAMENTO DAS CORRENTES INDUZIDAS NA LÂMINA LÂMINAR

Os CARs que operam com rotor gaiola de esquilo, apresentam barras rotóricas de alumínio ou de cobre, curto-circuitadas por anéis. Quando a resistência ôhmica destes anéis puder ser desprezada, em relação à resistência ôhmica das barras, o Fator de Qualidade dos referidos conversores poderá ser calculado a partir das dimensões das barras, da resistividade volumétrica do material de que são feitas, da temperatura operacional das mesmas, de parâmetros mecânicos (passo polar, entreferro) e de parâmetros elétricos e magnéticos (permeabilidade magnética e frequência do sinal de alimentação). É aplicação direta da equação (2.13), proposta por Laithwaite.

Quando o conversor assíncrono, linear ou rotativo, apresentar lator ou rotor laminar, com lâmina de espessura constante, a distribuição das correntes induzidas na referida lâmina e a forma como estas percorrem a mesma passam a ter profunda influência no comportamento do referido - influenciando na força propulsora e em tudo que dela derive. Russell e Norsworthy [17], trabalhando com CARs, encontraram expressões que, alterando ficticiamente a resistividade volumétrica do material de que é feita a lâmina rotórica, explicam a alteração do comportamento da função  $T=T(s)$ . Para os CALs, conseguem explicar alteração no comportamento da função  $f_x = f_x(s)$ .

Sendo  $K_s$  o fator proposto pela referência [17], escreve-se:

$$\rho_{RR}'' = \left[ \frac{\rho_v}{h_R} \right] \cdot \frac{1}{K_S} \quad (2.14)$$

sendo  $\rho_v$  a resistividade volumétrica do material de que é feito o linor,  $h_R$  a espessura da lâmina do referido e  $K_S$  o fator proposto por Russell e Norsworthy, adaptado para os CALs.

$$K_S = 1 - \left[ \frac{\operatorname{tgh}(e_x)}{e_x(1 + \operatorname{tgh}(e_x) \cdot \operatorname{tgh}(e_y))} \right] \quad (2.15)$$

onde:

$$e_x = \frac{C \cdot \pi}{2 \cdot t_p} \quad e \quad e_y = \frac{d \cdot \pi}{t_p} \quad (2.16)$$

Análise detalhada à equação (2.15) e as auxiliares (2.16), mostra que o Fator de Correção  $K_S$ :

- i) É função, unicamente, dos parâmetros mecânicos da lâmina linórica e do indutor ( $C$ ,  $C'$  e  $t_p$ ), e;
- ii) É menor do que a unidade.

Portanto, a atuação de  $K_S$ , na equação (2.14), faz com que a resistividade fictícia ou aparente da lâmina linórica cresça. No Capítulo 7, poder-se-á observar o comportamento da função  $f_x = f_x(s)$ , que é fortemente dependente de  $K_S$ .

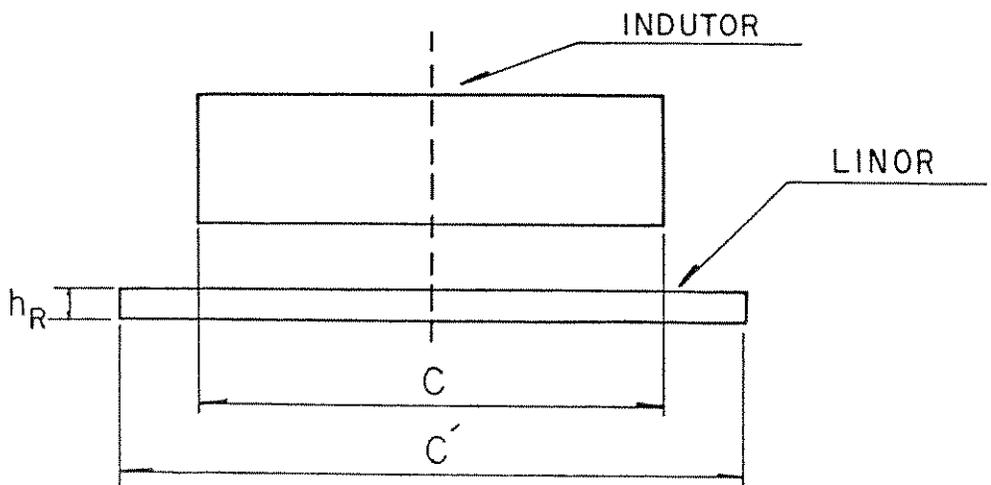


Figura 2.7: Vista Frontal do Indutor e do Linor

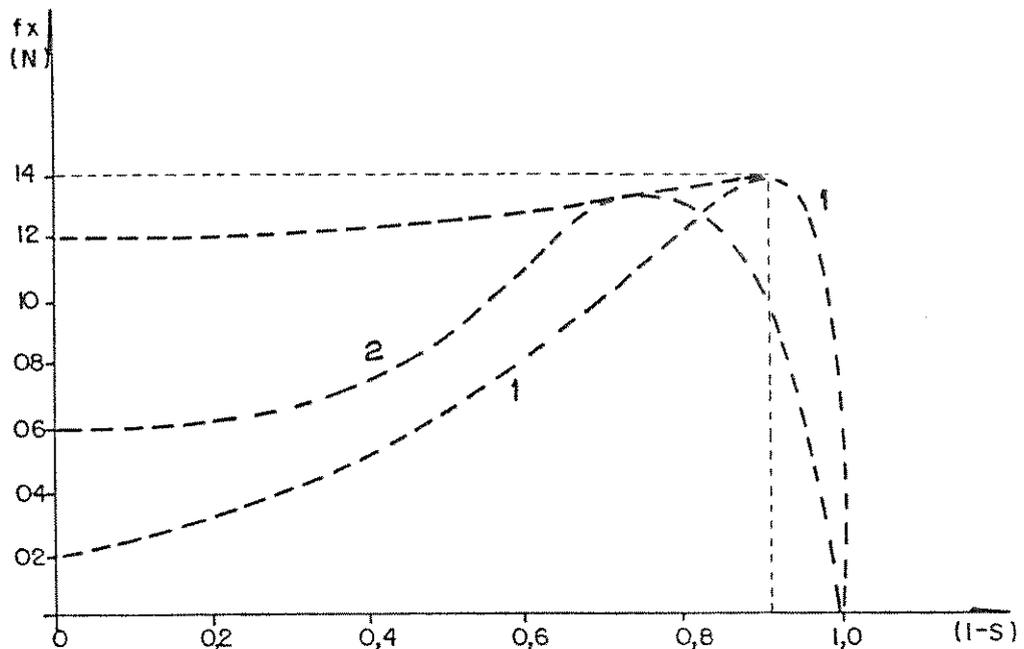
Mantida a proposta da referência [17], o Fator de Qualidade passa a:

$$G_E = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot \omega_s}{\rho_{RR}' \cdot \pi^2 \cdot g} \quad (2.17)$$

Se  $\rho_{RR}' > \rho_R'$ , o Fator de Qualidade, na forma proposta por Laithwaite [5], passa a assumir valores numericamente menores, mostrando que a habilidade do conversor em efetuar conversão eletromecânica de energia, altera-se. Simulações executadas com diferentes valores de  $\rho_{RR}'$ , mostram que:

- i) A força propulsora de partida dos CALs, cresce com o crescimento de  $\rho_{RR}'$ ;
- ii) O ponto de máximo da função  $f_x = f_x(s)$  decresce com o crescimento de  $\rho_{RR}'$  e caminha para valores maiores de  $s$ , e;

iii) De maneira coerente, tudo se passa como se a resistência do enrolamento rotórico de um CAR, fosse crescendo. Ver Figura 2.8.



curva 1: resistividade  $\rho'_{RR} = \rho'_R$  ( $K_s = 1$ )

curva 2: resistividade  $\rho'_{RR} > \rho'_R$  ( $K_s < 1$ )

Figura 2.8: Comportamento Comparativo de  $f_x$  para valores diferentes de  $K_s$

O melhor conversor é aquele que tem o maior valor de  $X_{mag}$ , o menor valor de  $R'^2$  - reatância de dispersão da lâmina linórica - e cuja velocidade de funcionamento em vazio é a mais próxima da de sincronismo. Se o conversor em estudo, possuir lâmina móvel executada em material não magnético, o fluxo de dispersão de secundário ou linórico pode ser desprezado e o Fator de Qualidade pode ser expresso, por [13] :

$$GE = X_{mag} / R'^2 \quad (2.18)$$

sendo  $G_e$  o Fator de Qualidade do CAL, onde o Efeito Transversal de Borda é levado em conta. Os Capítulos que seguem trarão mais luz ao conceito de Fator de Qualidade real de um conversor.

### 2.6.3. ENTREFERRO REALÍSTICO

O valor do entreferro de um conversor pode ser determinado a partir de medidas efetuadas nas partes mecânicas do mesmo. Ocorre, porém, que quando uma força magnetomotriz é aplicada à região do entreferro, a relutância magnética que o fluxo encontrará, muito provavelmente será maior do que aquela oferecida pelo entreferro medido, dado a existência das ranhuras presentes no indutor ou nos indutores. O efeito da presença destas ranhuras é levado em conta pelo Fator de Carter -  $K_c$ . Este fator é calculado segundo os parâmetros mecânicos do conversor na região das ranhuras, o desenho e a existência das mesmas em um ou em ambos os indutores.

Assim, denominar-se-á entreferro realístico a um valor calculado para o entreferro, levando em consideração a presença das ranhuras e a interferência destas na propagação do fluxo magnético:

$$g_E = K_c \cdot g \quad (2.19)$$

O entreferro realístico -  $g_E$  - é sempre maior do que  $g$ , a quem se denominará entreferro mecânico. Como a lâmina linórica não é condutora magnética, o espaço de ar de um conversor assíncrono linear é menor do que o entreferro. Exame detalhado à

equação (2.17) mostra que a referida equação, na forma como está proposta, ainda não contém os elementos que são necessários para a análise rigorosa das características do conversor real:

- i) O entreferro realístico leva em conta os elementos que podem alterar o valor da relutância magnética, na região do entreferro, e;
- ii) A resistividade superficial do material de que é feito o linor, foi corrigida levando-se em conta a temperatura operacional do referido membro, a distribuição anormal das correntes linóricas e a sua espessura, somente.

Quanto maior for o valor de  $G_r$  - Fator de Qualidade Realístico - maior será a habilidade de um conversor em efetuar conversão eletromecânica de energia.

Nos CALs, os circuitos elétricos equivalentes deixam de ser convencionais, pois a reatância de magnetização, as perdas no ferro e a resistência do ramo de força -  $R'z$  - passam a variar com o escorregamento e aqueles podem apresentar comportamentos surpreendentes, como, por exemplo, quando alimentados com tensão constante, a corrente elétrica em vazio, ser maior do que a corrente a meia carga. No Capítulo 5 estudar-se-á o Efeito Longitudinal de Extremidade e um Circuito Elétrico Equivalente, dotado de características próprias, será apresentado.

#### 2.6.4 - O FATOR DE QUALIDADE REALÍSTICO

O Fator de Qualidade formulado por Laithwaite, apresentado nas referências [5] e [13] e, neste trabalho simbolizado por  $G_L$ , é explicitado na equação (2.13). Por não considerar a presença de ranhuras e a não uniformidade da distribuição das correntes linóricas, o referido fator, assim expresso, é muito particularizado, isto é, aplica-se a conversores onde a corrente secundária circula por anéis de curto circuito muito espessos e as ranhuras são, praticamente fechadas, o que pode ocorrer em projetos muito específicos. Nos CALs dotados de linores em escada - (Ladder) e de indutores com ranhuras semi-fechadas, o fator descrito em (2.13) pode conduzir a resultados satisfatórios. Nos CARs dotados de rotor em caneca (Cup) e nos CALs dotados de linores laminares, a distribuição da corrente induzida no secundário exige que compensação seja introduzida. De forma artificiosa, leva-se à resistividade superficial da lâmina o efeito adverso, a que se denomina Efeito Transversal de Borda.

Por meio de um fator, que pode ser o fator  $K_s$ , proposto na referência [17] ou o fator  $K_{s'}$ , proposto na referência [11], altera-se o valor da resistividade superficial da lâmina linórica:  $\rho_R' + \rho_{RR}'$ . Como  $\rho_{RR}' > \rho_R'$ , o Fator de Qualidade ganha novo valor numérico e as curvas características, teoricamente esperadas, alteram-se. No item 2.6.2 fez-se referência ao Fator de Russell -  $K_s$  - como forma de compensar o Efeito Transversal de Borda:

$$\rho_{RR}' = \left[ \frac{\rho_v}{h_R} \right] \cdot \left[ \frac{1}{K_s} \right] \quad (2.14)$$

ou ainda:

$$\rho_{RR}' = \frac{\rho_R'}{K_S} \quad (2.20)$$

Levando-se à equação (2.13), as novas definições para entreferro e resistividade superficial, escreve-se:

$$G_R = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot w_s}{\rho_{RR}' \cdot \Pi^2 \cdot g_E} \quad (2.21)$$

equação que leva a um fator de qualidade dinâmico, o qual pode atender às particulares características de um determinado conversor. Observar que o conceito inicial de Fator de Qualidade está evoluindo e acabará abrangendo todos os fenômenos que envolvem um particular conversor.

Para obter-se um conversor com bom desempenho, principalmente aqueles que operam em altas velocidades, propostas diversas tem sido feitas no sentido de compensar as consequências adversas dos Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda. Yamamura [4], propõe método para compensar o Efeito Longitudinal de Extremidade. Entretanto, as proposições feitas por este e por outros pesquisadores, tem custos elevados e desempenhos pouco satisfatórios na região de baixos escorregamentos [16]. As diretrizes para um projeto apropriado de um CAL de Alta Velocidade tem, necessariamente, que levar em conta os Efeitos de Extremidades, assim como os aspectos mecânicos que envolvem a aplicação dos métodos de compensação propostos.

Um CAL desenvolvido para aplicações em altas velocidades tem entreferro comparativamente maior do que um CAR conven-

cional. Conseqüentemente, a dispersão de fluxo indutórico torna-se mais preponderante e o efeito final é levado em conta a partir de um Fator de Dispersão -  $K_L$  - que atua sobre o valor do entreferro corrigido.

$$g_T = K_L \cdot g_E \quad (2.22)$$

$$t_p = V_{sx} / (2 \cdot f) \quad (2.23)$$

$$K_L = \left[ (t_p) / (g \cdot \Pi) \right] \cdot \sinh \left[ (\Pi \cdot g) / (t_p) \right] \quad (2.24)$$

para CALs de dupla face [9] [18].

Todas as considerações efetuadas estão assentadas na hipótese que nos CALs, o fluxo de dispersão de linor é desprezível, principalmente para baixos escorregamentos. (Ressaltar que um escorregamento de 10% para um CAL, é escorregamento normal).

Com as considerações efetuadas e com a alteração de  $g_E$  para  $g_T$ , escreve-se:

$$G_T = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot w_s}{\rho_{RR}' \cdot \Pi^2 \cdot g_T} \quad (2.25)$$

equação que expressa o Fator de Qualidade Realístico de um CAL onde uma variada gama de fenômenos já foi considerada e agora, escreve-se  $G_T = X_{mag} / R'^2$ .

## 2.7. DENSIDADE LINEAR DE CORRENTE

## 2.7.1. INTRODUÇÃO

A Figura 2.9 mostra o circuito elétrico de um conversor idealizado.

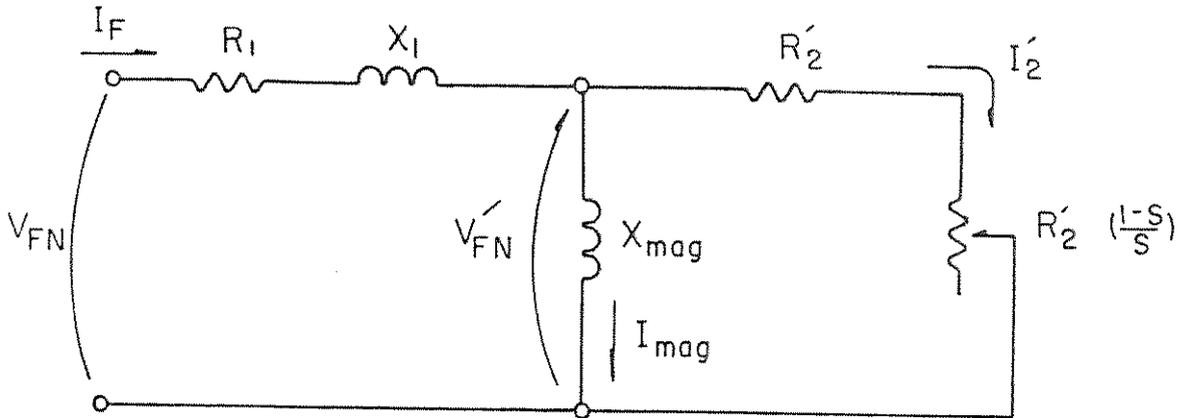


Figura 2.9: Circuito Elétrico Equivalente do Conversor idealizado

Para esta análise, as perdas no ferro são tomadas como desprezíveis. Do circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 2.9, escreve-se:

$$I_F = \left[ (I'_2)^2 + (I_{mag})^2 \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

de onde:

$$I_F^2 = (I'_2)^2 + (V'_{FN} / X_{mag})^2 \quad (2.27)$$

Por outro lado:

$$I'_2 = \frac{V'_{FN}}{(R'_2/s)} \quad (2.28)$$

A partir da equação (2.26), escreve-se:

$$I_F^2 = (V_{FN})^2 \left[ \left( \frac{s}{R'_2} \right)^2 + \left( \frac{1}{R'_2 \cdot Gr} \right)^2 \right]$$

$$I_F^2 = \left( \frac{V_{FN}}{R'_2/s} \right)^2 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot Gr)^2} \right] \quad (2.29)$$

Associando as equações (2.27) e (2.29), resulta:

$$I'_2 = \left( I_F \right) \cdot \left[ \left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot Gr)^2} \right]^{-1/2} \right] \quad (2.30)$$

equação que permite relacionar, para um conversor idealizado, as correntes de indutor e de linor (refletida). Mesmo sabendo-se que a equação (2.30) é imprecisa para o estudo dos CALs devido, fundamentalmente, à presença do Efeito Longitudinal de Extremidade, não se pode deixar de observar que ela mostra importante relação entre correntes. Assim, se for possível manter sob controle a corrente  $I_F$ , será mais fácil manter sob controle alguns parâmetros elétricos importantes do conversor, como, por exemplo, a Densidade Linear de Corrente.

### 2.7.2: O CONCEITO DE DENSIDADE LINEAR DE CORRENTE

A estrutura ranhurada dos indutores e os enrolamentos dispostos nas mesmas, não formam um conjunto de fácil análise, quando o pesquisador precisa lançar mão das 'equações de campo' que governam o modelo eletromagnético de um CAL. Para superar as restrições impostas pelo ranhuramento e distribuição discreta dos condutores indutóricos, adota-se um indutor fictício, liso, plano, onde o enrolamento discreto é substituído por elementos fictícios

de corrente, infinitamente finos, denominados LAMINAS DE CORRENTE. A distribuição da densidade de corrente nesta lâmina de corrente, é equivalente à configuração de corrente oferecida por infinitos condutores colocados em infinitas ranhuras, variando no tempo, de forma que a força magnetomotriz gerada por estes infinitos condutores propaga-se no espaço do entreferro, como uma onda senoidal dotada de velocidade de propagação  $V_{sx}$ . O entreferro do modelo real é substituído por um entreferro corrigido, expresso por:

$$g_T = K_c \cdot K_L \cdot g \quad (2.31)$$

O fluxo de dispersão no entreferro aumenta, aparentemente, a espessura do mesmo. A influência na mesma é mostrada, de forma relativa, na Figura (2.10). A distribuição senoidal no espaço do entreferro é idealizada e desejável, porém, na realidade, esta distribuição não pode ser conseguida com condutores imersos em ranhuras [18]. A distribuição de forças magnetomotrizes no entreferro, para um enrolamento real, disposto em ranhuras praticadas no indutor, é escalonada e, se analisada por série de Fourier, apresenta uma componente fundamental, como mostra a Figura (2.11). Neste trabalho, a componente fundamental (ou predominante) desta distribuição é considerada como fonte única do campo magnético no entreferro. Uma lâmina de corrente de Densidade Linear de Corrente -  $J_s(x,t)$ -, é calculada, a partir de [4]:

$$\bar{J}_s = 3 \cdot \left[ \frac{N_{FF} \cdot I_F}{p \cdot t_p} \right] \cdot K_{we} \quad (2.32)$$

onde  $N_{FF}$  é o número de condutores ativos por fase do enrolamento,  $I_F$  é a intensidade da corrente que circula por um condutor ativo,

$p$  é o número total de pólos de um indutor,  $t_p$  é o passo polar,  $K_{we}$  é o fator de enrolamento do embobinamento depositado na peça indutórica e  $\bar{J}_s$  é a densidade linear de corrente, em seu valor eficaz.

A Densidade Linear de Corrente ou a "capa de corrente" ou ainda, a lâmina de corrente é dada em A/m e, para os CALs, adota-se:

$$20.000 \text{ A/m} \leq \bar{J}_s \leq 120.000 \text{ A/m} \quad (2.33)$$

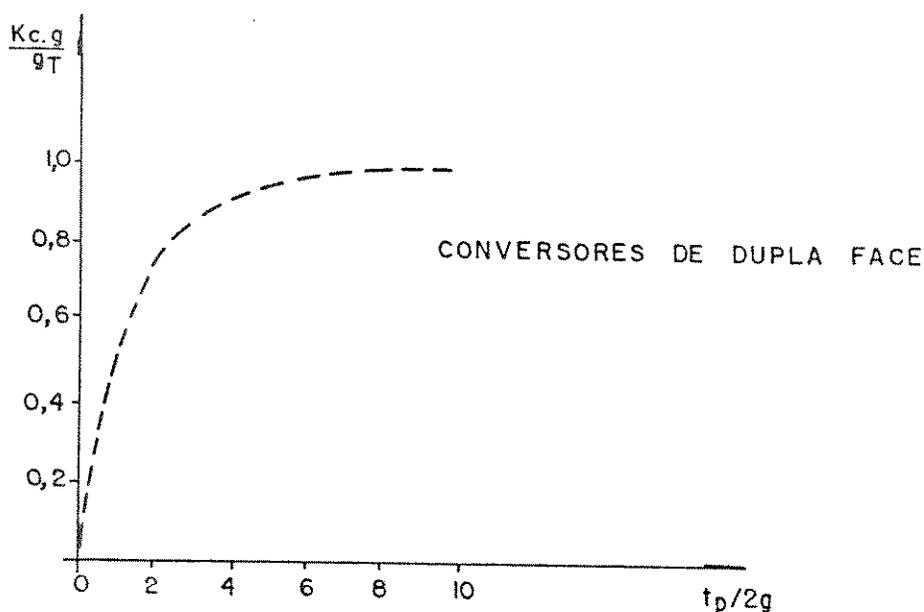


Figura 2.10: Comportamento Relativo do Entreferro Corrigido [18]

A equação (2.32) aplica-se a conversores trifásicos. Para conversores  $m$  fásicos, escreve-se:

$$\bar{J}_s = m \left[ \frac{N_{FF} \cdot I_F}{P \cdot t_p} \right] \cdot K_{we} \quad (2.34)$$

### 2.7.3. EXPRESSÃO TEMPORAL DA DENSIDADE LINEAR DE CORRENTE EM CALs DE DUPLA FACE

A Figura (2.1) mostra um CAL de dupla face. Os indutores são confeccionados em chapas de aço-silício, eletricamente isoladas e consideradas magneticamente ideais ( $\mu_{fe} \rightarrow \infty$ ). Para construção do modelo matemático, os condutores imersos em ranhuras são substituídos por lâminas fictícias de corrente, depositadas nas faces voltadas para o entreferro. Como linor, está presente uma lâmina condutora elétrica e não magnética, dotada de resistividade volumétrica  $\rho_v$  e espessura  $h_r$ .

A distribuição de corrente na lâmina indutórica ou primária é de tal feitura que o seu comportamento produz uma força magnetomotriz igual àquela produzida pelo enrolamento indutórico, considerada, somente, sua componente fundamental, como propõe a Figura (2.11).

Para CALs projetados segundo o critério de corrente constante, adota-se a Densidade Linear de Corrente indutórica -  $\bar{J}_s$  - como referência fasorial para as demais variáveis.

$$J_s(x,t) = J_M \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) \quad (2.35)$$

$$b_s(x,t) = B_M(s) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \delta_s) \quad (2.9)$$

A Figura 2.12 mostra, em corte longitudinal, os indutores e o linor portando lâminas de corrente. O sistema de eixos ortogonais é vinculado aos indutores. A lâmina móvel translada-se na direção do eixo  $x$ , as correntes indutóricas e linórica, na direção do eixo  $z$  e a densidade do fluxo fundamental, na direção de  $y$ . A lâmina linórica tem espessura finita -  $h_r$ .

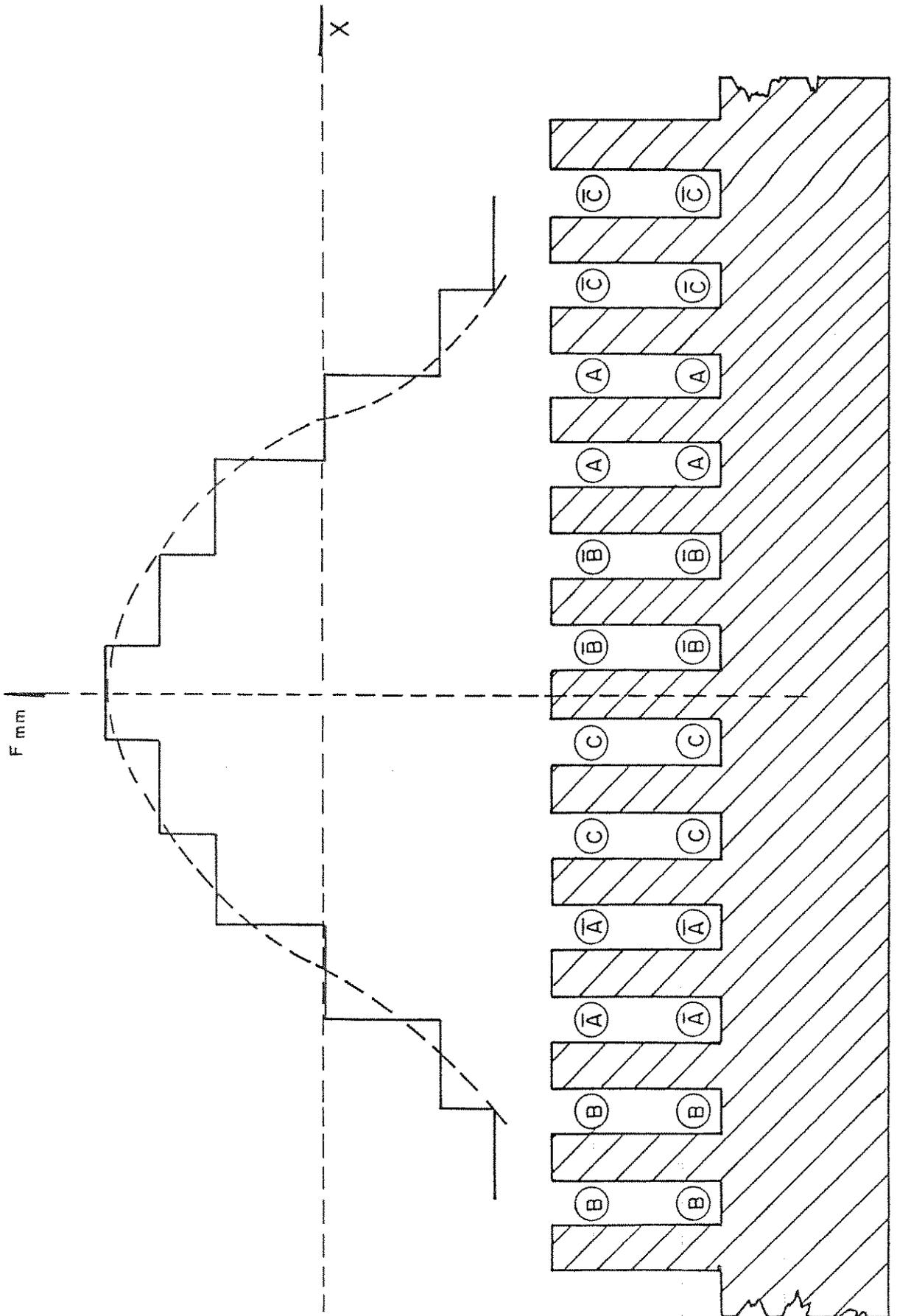


Figura 2.11: Distribuição da Força Magnetomotriz de um Enrolamento de Passo Completo

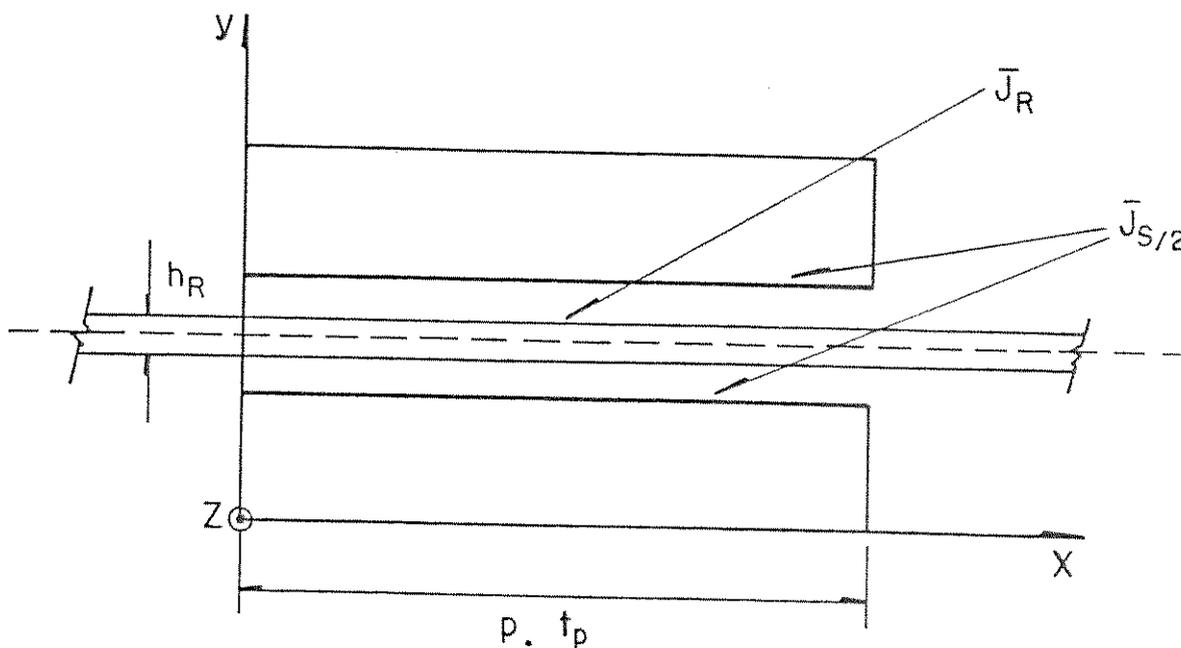


Figura 2.12: Corte Longitudinal de um CAL de Dupla Face

## 2.8. EFEITO PELICULAR NA LAMINA LINÓRICA

No modelo unidimensional o sistema de referência é alocado nos indutores. Algumas hipóteses devem ser levantadas para o estudo do Efeito Pelicular no linor:

- i) As variáveis temporais, variam senoidalmente no tempo;
- ii) O enrolamento indutórico é substituído por uma lâmina de corrente e somente a componente fundamental da referida é considerada, e;
- iii) O Efeito Transversal de Borda é levado em conta através de Fatores Corretores que atuam sobre a condutibilidade elétrica do linor.

Dado a lâmina linórica apresentar espessura finita e estar submetida a correntes elétricas variantes no tempo e no espaço, deve-se introduzir uma forma de considerar a distribuição de corrente não uniforme no linor. O efeito pelicular pode ser levado em conta e sua presença pode ser introduzida no estudo do conversor a partir do Fator de Correção  $K_{SK}$ , maior do que a unidade e que, atuando sobre a condutibilidade do material linórico, a faz decrescer:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_v}{K_{SK}} \quad (2.36)$$

- Para conversores de dupla face [28]:

$$K_{SK} = \left( \frac{K_{12}}{2} \right) \cdot \left[ \frac{\sinh(K_{12}) + \sin(K_{12})}{\cosh(K_{12}) - \cos(K_{12})} \right] \quad (2.37)$$

$$K_{12} = \left[ h_R / K_\phi \right] \quad (2.38)$$

$$K_\phi = \left[ 2 \cdot \mu_0 \cdot w_s \cdot B / \rho_v \right]^{-1/2} \quad (3.39)$$

Com as adoções da dispersão de fluxo magnético e da presença ranhuras das linóricas, o entreferro aparente teve seu valor aumentado.

Foi visto que o Efeito Pelicular opera no sentido de aumentar a resistividade aparente do material de que é feito o linor. Assim:

$$\rho_R'' = K_{SK} \cdot \rho_{RR}'' = \left[ \frac{\rho_V}{hr} \right] \cdot \left[ \frac{K_{SK}}{K_S} \right] \quad (2.40)$$

Desta maneira, o Fator de Qualidade vai evoluindo e agora pode abranger:

- Ranhuramento Indutórico.....Fator de Carter.....K<sub>c</sub>
- Efeito Transversal de Borda.....Fator de Russell.....K<sub>s</sub>
- Dispersão de Fluxo Magnético.....Fator de Dispersão...K<sub>L</sub>
- Efeito Pelicular.....Fator de Correção.....K<sub>SK</sub>

e a equação (2.25), evolui para:

$$G = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot \omega_s}{\rho_R'' \cdot \Pi^2 \cdot g_T} \quad (2.41)$$

o que equivale a redefinir o Fator de Qualidade. Passo a passo este fator avançou no sentido de tornar-se geral, abrangendo todos os fenômenos presentes, exceto o Efeito Longitudinal de Extremidades e agora:

$$G = \frac{X_{mag}}{R'z} \quad (2.42)$$

## CAPÍTULO 3

## ANÁLISE UNIDIMENSIONAL DO CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR

## 3.1. INTRODUÇÃO

Os conversores assíncronos lineares podem admitir uma ampla gama de configurações. Para o desenvolvimento de uma teoria consistente, o pesquisador deve operar com ferramental apropriado. Desta forma, numa primeira análise, poder-se-ia pensar em usar uma análise tridimensional. Porém a dificuldade de interpretação das informações obtidas cresce de forma assustadora. Assim, é mais prudente efetuar-se, inicialmente, uma análise unidimensional, analisar-se os fenômenos que se mostram e, numa segunda etapa, aplicar-se análises bi e tridimensionais, no sentido de melhor aquilatar, qualificar e quantificar os fenômenos que se apresentam. S. Yamamura [4], aplicou, gradativamente, as três formas de análise e concluiu que a análise unidimensional é bastante satisfatória para a compreensão do fenômeno denominado Efeito Longitudinal da Extremidade e que os demais efeitos poderiam ser analisados gradativamente e os resultados, superpostos. Assim, para o estudo de fenômenos longitudinais, trabalhar-se-á com um modelo unidimensional e uma modelagem 'duplo estator elétrico curto, linor laminar contínuo e não magnético'. Os estatores, colocados face a face, delimitam um entreferro de espessura  $g$  onde se move, sem atrito, uma lâmina não magnética de espessura  $h$  e velocidade

de translação  $V_{rx}$ .

Para uma análise desse porte, torna-se necessário algumas hipóteses:

- i) O material de que são feitos os estatores não é condutor elétrico e possui permeabilidade magnética relativa muito alta, de forma que, para algumas demonstrações, será tomada como infinita. Esta hipótese é consistente porque o entreferro dos CALs, quando comparado com o entreferro dos CARs, é proporcionalmente muito maior, fazendo com que a maior parte da energia armazenada, na forma de um campo magnético, concentre-se no entreferro daqueles;
- ii) A saturação do circuito de ferro praticamente não existe, dada a presença do efeito linearizador do entreferro. As perdas por efeito histerese podem ser desprezadas, sem introduzir erros apreciáveis;
- iii) O comprimento finito do estator ( $p \cdot t_p$ ) é suficientemente longo, quando comparado com a espessura do entreferro e com a altura do pacote indutor. Isto permite que um modelo unidimensional possa ser assumido, sem risco de comprometer os resultados. A dispersão de fluxo magnético não é explicada adequadamente pelo modelo, embora com-

pensação seja providenciada, com o auxílio de Fatores de Correção, tais como os Fatores de Dispersão e de Carter;

iv) A peça móvel, formada por uma lâmina de comprimento muito longo, de espessura  $h$  (proporcionalmente muito fina), de condutibilidade volumétrica  $\sigma_v$  e transportando uma corrente induzida, função das variáveis  $x$  e  $t$ , desloca-se dentro da região ativa dos indutores, na direção do eixo  $x$ , como mostra a Figura 3.1. A largura  $C'$  do linor é maior do que a largura  $C$  das peças indutóricas, de forma que aquela sobressai lateralmente aos indutores e forma as 'abas do linor'. O espalhamento e a forma de propagar das corrente linóricas, fazem com que a condutibilidade do material de que é feito o linor deva ser corrigida, o que é feito por fatores propostos por Russell [17], por Bolton [11] e por Alger [33], e;

v) Um enrolamento polifásico composto por  $m.N$  condutores ativos de comprimento  $C$ , colocados paralelamente a direção do eixo  $z$ , é depositado em ranhuras praticadas no indutor ou indutores.

A estrutura física dos CALs têm forma tal que existe uma inerente descontinuidade em seus circuitos magnéticos. Em geral, as consequências destas descontinuidades tem sido globalizadas dentro do estudo dos Efeitos Longitudinal de Extremidade e

Transversal de Borda. A presença do Efeito Longitudinal de Extremidade torna a análise dos CALs particularmente diferente da análise dos CARs convencionais.

Para atender às hipóteses introdutórias, os indutores são construídos em chapas de aço-silício, isoladas entre si, sem orientação preferencial. A isolação elétrica existente entre chapas, na direção do eixo  $z$ , torna a condutibilidade nesta direção, desprezível. A parte móvel do conversor é feita em alumínio maciço. O comprimento do indutor é referido à zona ativa que corresponde a um conversor de  $p$  pólos. O efeito dos dentes e das ranhuras indutóricos não é, explicitamente, levado em conta na fase do embasamento teórico. Para as análises que serão levadas a cabo, a energização indutórica será simulada por lâminas fictícias de corrente dotadas de altura  $h_s$  e de densidade linear de corrente  $\bar{J}_s(x,t)$ .

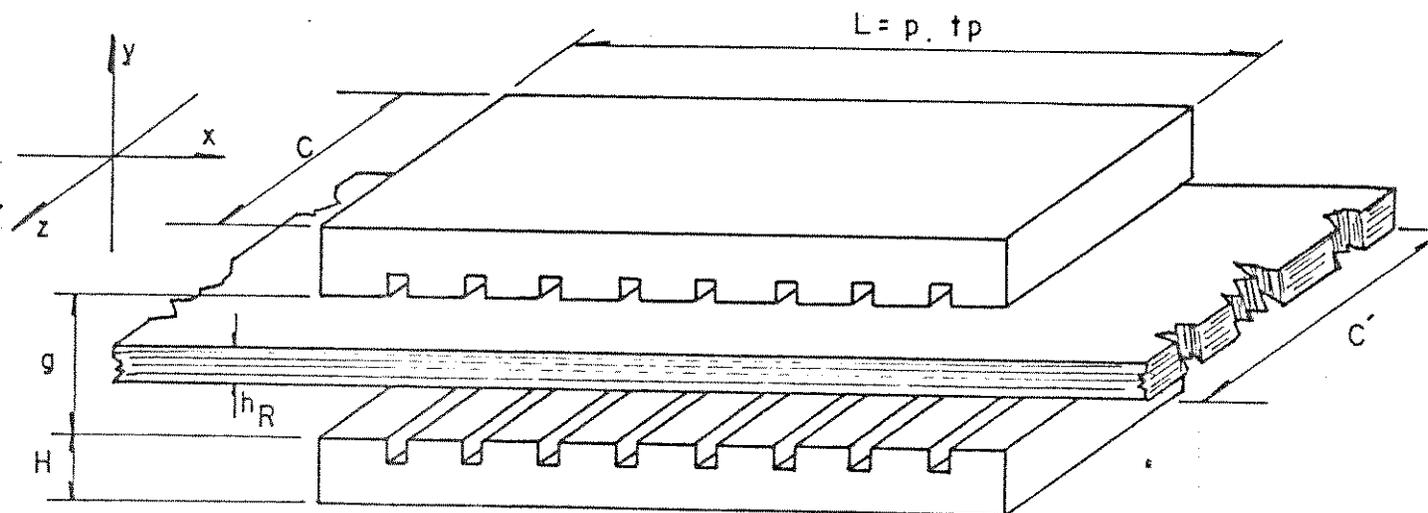


Figura 3.1: Conversor Assíncrono Linear de Dupla Face

A Densidade de Campo Magnético no entreferro do CAL será expressa por  $b$  e é função de  $x$  e de  $t$ :

$$b = b(x,t) \quad (3.1)$$

### 3.2. COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO DOS CALs

#### 3.2.1: CONVERSOR OPERANDO EM VAZIO

A expressão 'operar em vazio', quando empregada em conversores assíncronos rotativos - CARs - induz operação em velocidades rotóricas tais que o escorregamento pode ser dado como desprezível. No estudo dos CALs, a operação em vazio pode conduzir a três situações diferentes. Se o CAL for de Baixa Velocidade, a sua velocidade linórica pode ser igual ou levemente maior do que a Velocidade Linear Síncrona do Campo de Translação. Se o CAL for de Alta Velocidade, garantidamente a velocidade linórica em vazio é menor do que a referida velocidade síncrona, caracterizando escorregamento positivo. Por outro lado, se o CAL for de velocidade intermédia, quando em vazio terá um escorregamento tão pequeno que poderá ser desprezado. Isto se deve à presença do Efeito Longitudinal de Extremidade. Para o presente estudo, tomar-se-á, como fundamental hipótese, a que a força propulsora é nula somente para a condição  $s = 0$ .

No item 2.5 afirmou-se que os CALs, quando alimentados por três correntes alternadas e defasadas no tempo de  $2\pi/3$  rad. entre si, são residências de campos magnéticos que se trans-

ladam com Velocidades Lineares Síncronas expressas em (2.3), campos estes expressos, de forma geral, por:

$$b_s(x,t) = E_M(s) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \delta_s) \quad (2.9)$$

A equação (2.9) é válida para indutores planos, infinitos e recobertos por lâminas de corrente que respeitem a equação (2.35):

$$J_s(x,t) = J_M \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) \quad (2.35)$$

Porém, os conversores sob estudo possuem indutores curtos, de comprimento magnético ideal igual a  $(t_p \cdot p)$ , fato este que introduz comportamento outro para a Densidade de Campo Magnético no entreferro dos mesmos.

Quando um CAL ideal opera em vazio, a corrente induzida na lâmina linórica é praticamente nula, pois o escorregamento é tão pequeno, que pode ser desprezado. Em CALs reais, como foi ressaltado anteriormente, tal fato pode levar a resultados outros.

Portanto, usando como pressuposto que para  $s \rightarrow 0$ ,  $\bar{J}_R \rightarrow 0$ , para o laço fictício praticado na vista lateral do CAL de duplo indutor curto e linor laminar, visto na Figura 3.2, escreve-se:

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \sum_{k=1}^n \bar{J}_{sk} \quad (3.2)$$

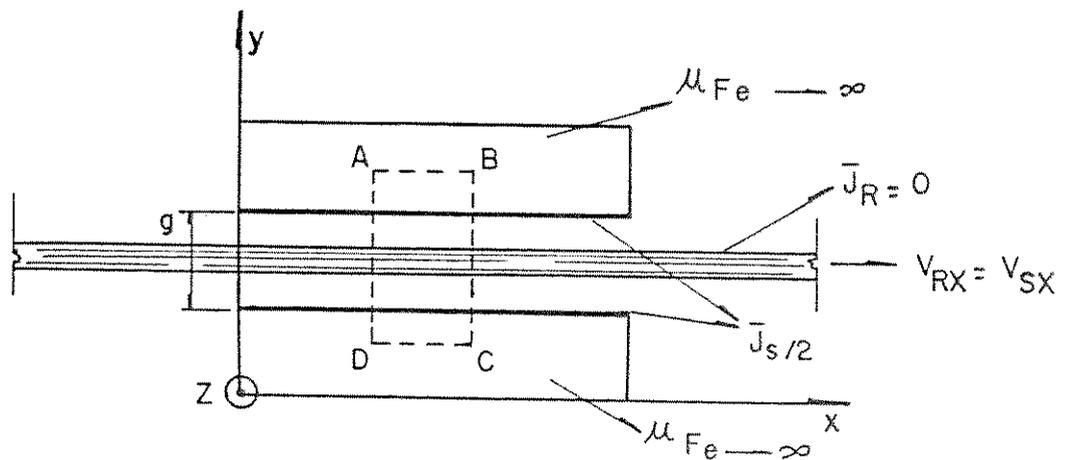


Figura 3.2: Vista Lateral de um CAL de Dupla Face

Para  $J_R \rightarrow 0$ ,  $V_{RX} \rightarrow V_{SX}$ . Operando-se a equação (3.2), obtém-se:

$$\frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \cdot dx = \left[ \frac{\mu_0}{g} \right] \cdot J_s(x,t) \cdot dx$$

$$b(x,t) = \left[ \frac{\mu_0}{g} J_M \right] \cdot \int_L \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) \cdot dx \quad (3.3)$$

de onde:

$$b(x,t) = \left[ \frac{\mu_0}{g} \cdot \frac{t_p}{\pi} \cdot J_M \right] \cdot \left[ -\text{sen}(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) \right] + C_1 \quad (3.4)$$

A constante de integração  $C_1$  é obtida a partir da análise das condições de contorno impostas ao indutor. Efetuando-se as necessárias operações, obtém-se:

$$b_0(x,t) = J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \pi} \right] \cdot \left[ -\text{sen}(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) \right] +$$

$$+ 2 \cdot J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \Pi^2 \cdot p} \right] \cdot \text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(w_s \cdot t - \Pi \cdot p/2) \quad (3.5)$$

que expressa o comportamento da Densidade de Campo Magnético no entreferro, para conversores dotados de quaisquer números de pólos, operando com  $V_{rx} \rightarrow V_{sx}$ . Nos CALs, a situação  $V_{rx} \rightarrow V_{sx}$  é diferente daquela encontrada em CARs, dado que, nos primeiros, dependendo da velocidade de seu campo de translação (Baixa ou Alta Velocidade), pode-se encontrar correntes induzidas no linor para  $V_{rx} = V_{sx}$ , isto é, o linor pode ser sede de correntes induzidas com o CAL em sincronismo (devido à presença do Efeito Longitudinal de Extremidade).

Operando-se a equação (3.5), obtém-se:

$$J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \Pi} \right] = B_M(s = 0) \quad (3.6)$$

e:

$$-\text{sen}(w_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p) = \cos(w_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \Pi/2) \quad (3.7)$$

que é um particular caso da equação (3.2), isto é:

$$b(x,t) \rightarrow b_0(x,t), \quad \text{quando } s \rightarrow 0$$

Na equação (3.5), definindo-se:

$$2 \cdot J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \Pi^2 \cdot p} \right] = \Delta B_M \quad (3.8)$$

e a equação (3.5) ganha nova redação:

$$b_0(x,t) = B_M(s=0) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \pi/2) + \\ + \Delta B_M \cdot \sin(\pi \cdot p/2) \cdot \sin(\omega_s \cdot t - \pi \cdot p/2) \quad (3.9)$$

Para melhor analisar o comportamento da densidade de campo magnético no entreferro do conversor, pode-se fazer  $s = 0$  levando-se, por meio externo, o CAL ao sincronismo, onde  $V_{ax} = V_{sx}$  ou, como procedeu C.M.P. Cabrita [6], retirando-se a lâmina linórica. Análise apurada mostra que qualquer dos procedimentos acima propostos, encontra reparos.

Anteriormente foi suposto que  $J_R = 0$ . Isto é conseguido com a colocação do linor em sincronismo, por meio externo. Hipótese mantida, ratifica-se a equação (3.5) em sua nova redação.

A Densidade de Campo Magnético  $b_0(x,t)$  possui duas componentes. A primeira, expressa por  $\bar{b}_0(x,t)$ , representa uma onda de Densidade de Campo Magnético que se translada na direção do eixo das abcissas, tem amplitude  $B_M(s=0)$  e Velocidade Linear Síncrona, dada por:

$$V_{sx} = 2 \cdot t_p \cdot f \quad (2.3)$$

A segunda, expressa por  $b_0(x,t)$ , possui um termo multiplicador que é função do número de pólos do CAL. Se o número de polos for par, o multiplicador é nulo; se for ímpar, o multiplicador assume valor (+1 ou -1). Desta forma, para o conversor colocado em sincronismo,

pode se encontrar duas situações:

### 3.2.1.1. CONVERSORES COM NÚMERO PAR DE POLOS

Neste caso,  $b_0(x,t)$  translada-se na direção do eixo das abcissas com Velocidade Linear Síncrona e com amplitude máxima constante:

$$b_0(x,t) = E_M(s=0) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \pi/2) \quad (3.10)$$

p: par

com  $E_M(s=0)$ , dado por:

$$E_M(s=0) = J_M \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \pi} \right] \quad (3.11)$$

A Figura 3.3 mostra o comportamento da Densidade de Campo Magnético no entreferro, para um conversor em sincronismo e dotado de número par de pólos.

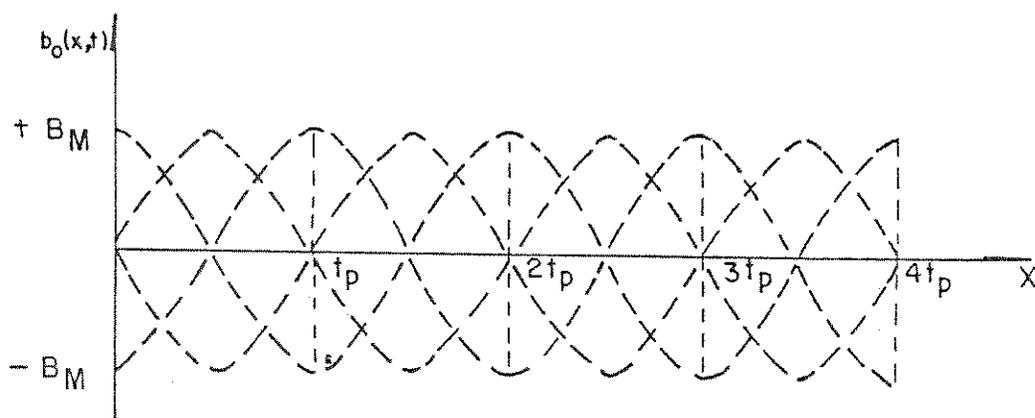


Figura 3.3: Comportamento de  $b_0(x,t)$  para o CAL colocado em sincronismo (Conversor de 4 Pólos)

## 3.2.1.2. CONVERSORES COM NÚMERO IMPAR DE POLOS

Neste caso,  $b_0(x,t)$  translada-se na direção do eixo das abcissas com Velocidade Linear Síncrona e amplitude modulada.

$$b_0(x,t) = J_M \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \Pi} \right] \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \Pi/2) +$$

$$+ 2 \cdot J_M \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \Pi^2 \cdot p} \right] \cdot \text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot p/2)$$

(3.12)

Na equação (3.12), a primeira parcela do segundo membro representa uma onda de Densidade de Campo Magnético que se translada na direção do eixo das abcissas. A segunda representa um elemento estacionário que pulsa na mesma frequência do sinal fundamental e que irá atuar sobre o valor final de  $b_0(x,t)$ , no tempo e no espaço, isto é, a amplitude de  $b_0(x,t)$  será modulada pela referida parcela e o resultado é mostrado na Figura 3.4.

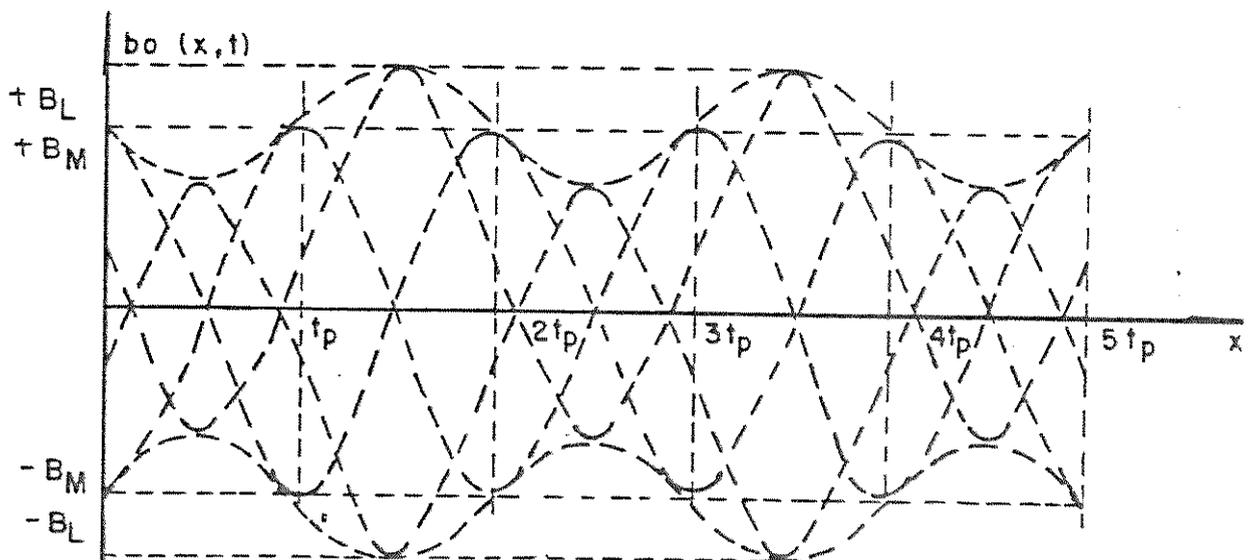


Figura 3.4: Comportamento de  $b(x,t)$  para o CAL colocado em sincronismo (conversor de 5 pólos).

### 3.2.1.3. CONSIDERAÇÕES

A equação (3.12) mostra o comportamento de  $b_0(x,t)$  para um número ímpar qualquer de pólos e permite calcular o mínimo valor de  $b_0(x,t)$ , o qual ocorre para um conversor de três pólos, mantidos os demais parâmetros constantes ( $g$  e  $t_p$ ).

### 3.2.2. CONVERSOR OPERANDO EM CARGA

No item 3.2.1 estudou-se o comportamento do CAL operando com escorregamento desprezível e submetido a uma Densidade Linear de Corrente  $J_s(x,t)$ , definida por:

$$J_s(x,t) = J_M \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) \quad (2.35)$$

Agora o CAL é submetido à carga e a Velocidade Linó-rica -  $V_{rx}$  - torna-se menor do que  $V_{sx}$ , caracterizando um escorregamento  $s$ . A equação (3.2) é agora aplicada ao laço ABCD praticado no conversor da Figura (3.5):

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \sum_{k=1}^n \bar{J}_{s_k} \quad (3.2)$$

Como, por hipótese, o campo magnético somente possui componente na direção do eixo  $y$ , desenvolvendo-se o Rotacional de  $\bar{H}$  e eliminando-se as componentes não presentes, obtém-se:

$$g \cdot \left[ \frac{\delta H_y}{\delta x} \bar{e}_z - \frac{\delta H_y}{\delta z} \bar{e}_x \right] = J_s(x,t) \bar{e}_z + J_R(x,t) \bar{e}_z$$

de onde:

$$\mathcal{E} \cdot \left[ \frac{\delta H_y}{\delta x} \right] = J_S(x,t) + J_R(x,t) \quad (3.13)$$

Por outro lado, sabe-se que:

$$b(x,t) = \mu_0 \cdot H_y \quad (3.14)$$

Levando-se a equação (3.14) à equação (3.13), obtém-se:

$$\frac{\mathcal{E}}{\mu_0} \cdot \left[ \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \right] = J_S(x,t) + J_R(x,t) \quad (3.15)$$

sendo  $b(x,t)$  a Densidade de Campo Magnético no entreferro,  $g$  a espessura do entreferro entre os dois indutores e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do meio, residência do linor.

O Rotacional de  $\bar{E}$  aplicado ao laço ABCD praticado no CAL da Figura (3.5), cumpridas as hipóteses anteriores, fornece:

$$\nabla \times \bar{E} = - \frac{d}{dt} \left[ \bar{b}(x,t) \right]$$

segundo a referência [4], ou ainda:

$$\begin{aligned} \frac{\delta E_z}{\delta y} \bar{e}_x - \frac{\delta E_z}{\delta x} \bar{e}_y &= - \frac{d}{dt} \left[ b(x,t) \cdot \bar{e}_y \right] \\ - \frac{\delta E_z}{\delta x} &= - \frac{\delta b(x,t)}{\delta t} - \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \cdot \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (3.16)$$

dado a densidade de campo ser uma função de duas variáveis. Na

equação (3.16), a variação de  $x$  em relação a  $t$  caracteriza a velocidade com que o linor se desloca em relação ao referencial vinculado aos indutores.

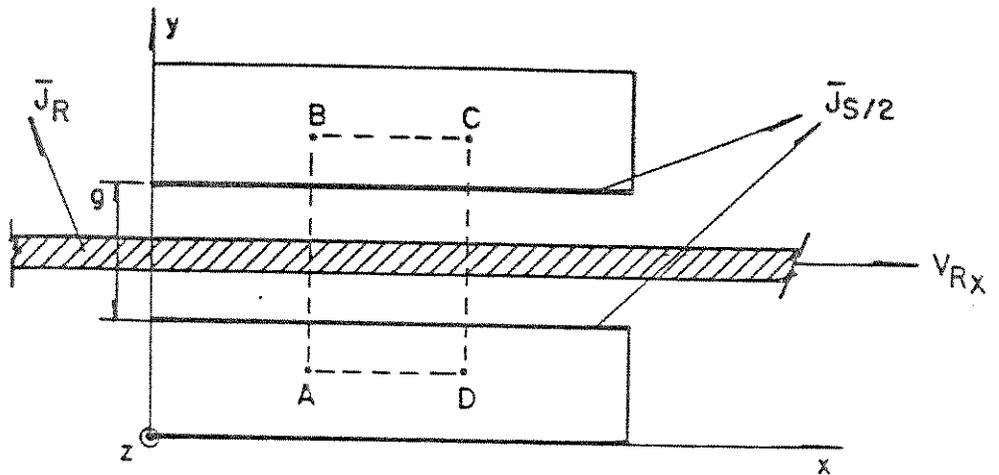


Figura 3.5: Conversor Assíncrono Linear - Vista Lateral

$$\frac{dx}{dt} = V_{Rx} \quad ; \quad E_z = \rho'_R \cdot J_R \quad e \quad \rho'_R = \frac{\rho_v}{h_R} \quad (3.17)$$

dados a lâmina linórica ser dotada, exclusivamente, de resistência ôhmica.

Isolado  $J_R$  na equação (3.15) e levado à equação (3.17), resulta:

$$\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} - J_s(x,t) = \frac{E_z}{\rho'_R} \quad (3.18)$$

Operando-se a equação (3.18), obtém-se:

$$E_z = \rho'_R \frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} - \rho'_R \cdot J_s(x,t) \quad (3.19)$$

Em (3.19), derivando-se  $E_z$  em relação a  $x$ , obtém-se:

$$\frac{\delta E_z}{\delta x} = \rho'_R \frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta^2 b(x,t)}{\delta x^2} - \rho'_R \frac{\delta J_s(x,t)}{\delta x} \quad (3.20)$$

Comparando-se as equações (3.16) e (3.20), obtém-se:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta b(x,t)}{\delta t} + \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \cdot V_{Rx} = \\ & = \rho'_R \frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta^2 b(x,t)}{\delta x^2} - \rho'_R \cdot \frac{\delta J_s(x,t)}{\delta x} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Remanejando-se os termos da equação (3.21), resulta:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta^2 b(x,t)}{\delta x^2} - \frac{V_{Rx}}{\rho'_R} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} - \frac{1}{\rho'_R} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta t} \right] = \\ & = \frac{\delta J_s(x,t)}{\delta x} \end{aligned} \quad (3.22)$$

O terceiro termo do primeiro membro da equação (3.22) pode ser expresso de forma diferente, objetivando dar à referida equação, uma forma matemática mais homogênea.

Sabendo-se que uma solução para a equação (3.22) é do tipo:

$$b(x,t) = B_m(s) \cdot \text{Re} \left[ e^{j(ws \cdot t + a(x) + b)} \right]$$

pode-se escrever:

$$\frac{\delta b(x,t)}{\delta t} = j \cdot ws \cdot B_m(s) \cdot \text{Re} \left[ e^{j(ws \cdot t + a(x) + b)} \right]$$

ou ainda:

$$\frac{\delta b(x,t)}{\delta t} = j \cdot w_s \cdot b(x,t) \quad (3.23)$$

que levada à equação (3.22):

$$\left[ \frac{\epsilon}{\mu_0} \cdot \frac{\delta^2 b(x,t)}{\delta x^2} - \frac{V_{RX}}{\rho'_R} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} + \right. \\ \left. - \frac{1}{\rho'_R} \cdot j \cdot w_s \cdot b(x,t) \right] = \frac{\delta J_s(x,t)}{\delta x} \quad (3.24)$$

A equação (3.24), no seu aspecto físico, caracteriza uma onda que se translada no espaço e no tempo. No seu aspecto matemático, é uma equação diferencial, não homogênea, de segunda ordem, a coeficientes constantes. Esta equação descreve o comportamento da Densidade de Campo Magnético  $b(x,t)$ , no entreferro do CAL de dupla face, em pontos do eixo das abcissas compreendidos no intervalo  $0 \leq x \leq p.t_p$  e fora dele.

A equação auxiliar de (3.24) é:

$$\left[ \frac{\epsilon}{\mu_0} \cdot D^2(y) - \frac{V_{RX}}{\rho'_R} \cdot D(y) - \frac{1}{\rho'_R} \cdot j \cdot w_s \cdot (y) \right] = 0 \quad (3.25)$$

e a solução da mesma, é do tipo:

$$Y = Y_H + Y_P$$

onde:

$Y_H$ : solução geral da equação homogênea

$Y_P$ : solução particular da equação (3.24)

### 3.2.3. CONVERSOR DE INDUTOR MUITO LONGO OPERANDO EM CARGA

No ítem anterior, explicitou-se que o estudo se realiza sobre um CAL que opera a corrente constante e que a Densidade Linear de Corrente indutórica é convencionada e expressa, por:

$$J_s(x,t) = J_M \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p) \quad (2.35)$$

e:

$$\frac{\delta J_s(x,t)}{\delta x} = J_M \cdot \frac{\Pi}{t_p} \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p)$$

Adotando-se como uma possível solução para a equação (3.25), a equação:

$$b_s(x,t) = E_M(s) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \delta s) \quad (3.26)$$

e fazendo-se:

$$\alpha = (\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \delta s) \quad (3.27)$$

escreve-se:

$$\begin{aligned} \frac{E}{\mu_0} \left[ - E_M \frac{\Pi^2}{t_p^2} \cdot \cos(\alpha) \right] - \frac{V_{RX}}{\rho_R} \left[ + E_M \frac{\Pi}{t_p} \cdot \text{sen}(\alpha) \right] + \\ - \frac{1}{\rho_R} \left[ - E_M \cdot \omega_s \cdot \text{sen}(\alpha) \right] = \frac{J_M \cdot \Pi}{t_p} \text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p) \end{aligned} \quad (3.28)$$

ou ainda:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{g \cdot \Pi}{\mu_0 \cdot t_p} \cdot E_M \cdot \cos(\alpha) - \frac{V_{RX}}{\rho'_R} \cdot E_M \cdot \sin(\alpha) + \\
 & + \frac{V_{SX}}{\rho'_R} \cdot E_M \cdot \sin(\alpha) = J_M \cdot \sin(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p) \quad (3.29)
 \end{aligned}$$

sendo que:

$$\frac{\omega_s \cdot t_p}{\Pi} = 2 \cdot t_p \cdot f = V_{SX}$$

e:

$$\alpha = (\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \delta s) = (\beta + \delta s) \quad (3.30)$$

Operando a equação (3.29) e aplicando-se nesta a equação (3.30), obtém-se:

$$\begin{aligned}
 -E_M \cdot \frac{g \cdot \Pi}{\mu_0 \cdot t_p} \cdot \cos(\beta + \delta s) + \frac{(V_{SX} - V_{RX})}{\rho'_R} \cdot E_M(s) \cdot \sin(\beta + \delta s) = \\
 = J_M \cdot \sin(\beta) \quad (3.31)
 \end{aligned}$$

Definindo-se:

$$A = \frac{g \cdot \Pi}{\mu_0 \cdot t_p} \cdot E_M(s) \quad (3.32a)$$

$$D = \frac{(V_{SX} - V_{RX})}{\rho'_R} \cdot E_M(s) \quad (3.32b)$$

escreve-se:

$$\begin{aligned}
 - A (\cos \beta \cdot \cos \delta s - \sin \beta \cdot \sin \delta s) + D (\sin \beta \cdot \cos \delta s + \\
 + \sin \delta s \cdot \cos \beta) = J_M \sin (\beta)
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

Comparando-se os membros da equação (3.33), obtém-se:

$$A (\sin \beta \cdot \sin \delta s) + D (\sin \beta \cdot \cos \delta s) = J_M \cdot \sin (\beta)$$

ou ainda:

$$A \cdot \sin \delta s + D \cdot \cos \delta s = J_M \tag{3.34}$$

$$- A \cdot (\cos \beta \cdot \cos \delta s) + D \cdot (\cos \beta \cdot \sin \delta s) = 0$$

de onde:

$$A \cdot \cos \delta s = D \cdot \sin \delta s \tag{3.35}$$

e:

$$\operatorname{tg} \delta s = A/D \tag{3.36}$$

$$\operatorname{tg} \delta s = + \frac{g \cdot \rho'_R \cdot \Pi}{s \cdot V_{sx} \cdot \mu_0 \cdot t_p} \tag{3.37}$$

equação que permite calcular o ângulo de defasagem entre os fasores Densidade de Campo Magnético e Densidade Linear de Corrente indutórica. Ressaltar que os Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda, não estão sendo considerados, ainda.

A equação auxiliar (3.34), permite:

$$A \cdot \text{sen } \delta s + D \cdot \text{cos } \delta s = J_M$$

$$A \cdot \left[ \frac{A}{D} \right] \text{cos } \delta s + D \cdot \text{cos } \delta s = J_M$$

ou:

$$(A^2 + D^2) \cdot \text{cos } \delta s = D \cdot J_M \quad (3.38)$$

Operando-se a equação auxiliar (3.36), obtém-se:

$$\text{cos}^2 \delta s = D^2 / (A^2 + D^2) \quad (3.39)$$

Substituindo-se (3.39) em (3.38):

$$(A^2 + D^2)^2 \cdot \text{cos}^2 \delta s = D^2 \cdot J_M^2$$

onde:

$$(A^2 + D^2) = J_M^2 \quad (3.40)$$

Substituindo-se (3.32) em (3.40), obtém-se:

$$\left[ \left( \frac{g \cdot \Pi}{\mu_o \cdot \tau_p} \right)^2 + \left( \frac{(V_{SX} - V_{RX})}{\rho'_R} \right)^2 \right] \cdot B_M^2(s) = J_M^2$$

Sendo:

$$s = \frac{V_{SX} - V_{RX}}{V_{SX}} \quad (2.4)$$

Resulta:

$$B_M(s) = \frac{J_M}{\left[ \left( \frac{E \cdot \Pi}{\mu_0 \cdot t_p} \right)^2 + \left( \frac{s \cdot V_{SX}}{\rho_R} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (3.41)$$

equação que permite determinar a Densidade de Campo Magnético no entreferro de CALs de dupla face. O termo ( $J_M$ ) mostra a superposição de efeitos dos indutores. Os enrolamentos dos indutores devem ser ligados em série e de forma tal que as forças magnetomotrizes indutóricas se adicionem. A hipótese de que os indutores são muito longos e o linor é contínuo, deve ser mantida, para que o Efeito Longitudinal de Extremidade possa ser negligenciado. Pode-se computar as presenças do Efeitos Transversal de Borda, das ranhuras, da dispersão de fluxo e Pelicular introduzindo os fatores  $K_s$ ,  $K_c$ ,  $K_L$  e  $K_{SK}$ , respectivamente.

#### 3.2.4. COMPORTAMENTO FASORIAL DA DENSIDADE LINEAR DE CORRENTE E DA DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO

As equações (2.35), (3.37) e (3.41) mostram que, examinados como fasores, a Densidade de Campo Magnético está - adiantada de um ângulo  $\delta s$  em relação à Densidade Linear de Corrente (tomada como referência). Mostram, também, que, mantida a Densidade Linear de Corrente em valor eficaz constante, a Densidade de Campo Magnético cresce quando o escorregamento decresce, o mesmo ocorrendo com o ângulo  $\delta s$  e este é máximo para  $s \rightarrow 0$ . Sob

estas condições, escreve-se:

$$\operatorname{tg} \delta s \rightarrow \infty \quad \text{e} \quad \delta s \rightarrow \pi/2$$

Demonstrou-se que, quando  $s \rightarrow 0$ , a Densidade de Campo Magnético tende para:

$$\begin{aligned} b_0(x,t) = & J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_P}{\varepsilon \cdot \pi} \right] \cdot \left[ -\operatorname{sen}(w_s \cdot t - \pi \cdot x/t_P) \right] + \\ & + 2 \cdot J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_P}{\varepsilon \cdot \pi^2 \cdot p} \right] \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \cdot p}{2}\right) \cdot \operatorname{sen}(w_s \cdot t - \pi \cdot p/2) \end{aligned} \quad (3.5)$$

O segundo termo do segundo membro da equação (3.5), somente se faz presente para CALs com número ímpar de pólos. Assim, atendo-se ao primeiro termo do segundo membro da referida equação, obtém-se:

$$B_M(s=0) = J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_P}{\varepsilon \cdot \pi} \right] \quad (3.6)$$

que é o valor alcançado por (3.41), para  $s \rightarrow 0$ . Por outro lado:

$$\left[ -\operatorname{sen}(w_s \cdot t - \pi \cdot x/t_P) \right] = \operatorname{cos}(w_s t - \pi \cdot x/t_P + \pi/2) \quad (3.7)$$

que atende à condição:  $s \rightarrow 0 \quad \operatorname{tg} \delta s \rightarrow \infty \quad \delta s \rightarrow \pi/2$  com o fasor  $\bar{J}_s$  estacionado sobre a referência.

Quando o conversor tem indutor ou indutores muito longos e linear contínuo, a condição  $p \gg 2$  faz com que o segundo termo do segundo membro da equação (3.5), assumam valores muito

pequenos, pois que:

$$\Delta B_M = 2 J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{\epsilon \cdot \pi^2 \cdot p} \right] \quad (3.8)$$

Assim, CALs que apresentem pequeno passo polar e elevado número de pólos, apresentam pequena modulação no valor temporal da densidade de campo, ou melhor, para elevados números ímpares de pólos, a modulação  $\Delta B_M$  tende a valores desprezíveis e a Densidade de Campo Magnético no entreferro, pode ser expressa, por:

$$b_s(x,t) = B_M(s) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \delta_s) \quad (3.26)$$

Levando-se  $b_s(x,t)$  e  $J_s(x,t)$ , na forma de fasores, a um diagrama fasorial, obtém-se o comportamento mostrado na Figura 3.6:

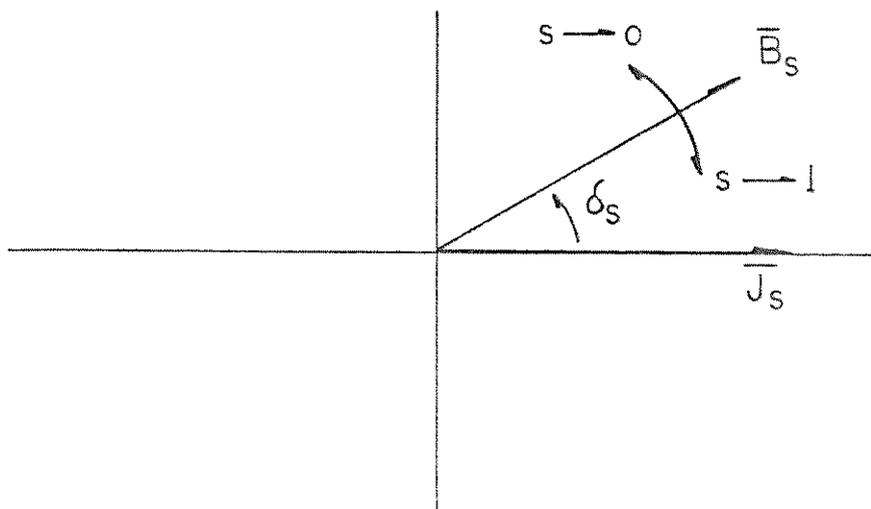


Figura 3.6: Disposição dos Fasores  $\bar{B}_s$  e  $\bar{J}_s$

A equação (3.26), mesmo sendo um particular caso da equação (3.24), é empregada por muitos pesquisadores, para análise da Densidade de Campo Magnético no entreferro. C.M.P. Cabrita [6] trabalhou com conversores de 8 pólos e desconsiderou o Efeito Longitudinal de Extremidade; para compensar a presença do Efeito Transversal de Borda, adotou o Fator Corretor  $K_s$ , proposto por Russell - Noreworthy [17].

### 3.3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO NA COROA DO INDUTOR DOS CALs OPERANDO EM VAZIO

#### 3.3.1: INTRODUÇÃO

No item 3.2.1 estudou-se o comportamento dos CALs operando em sincronismo e, portanto, com escorregamento nulo e Densidade Linear de Corrente mantida em valor eficaz constante. Sob esta hipótese fundamental, demonstrou-se que:

$$b_o(x,t) = B_m(s=0) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \pi/2) + \Delta B_m \cdot \text{sen}(\pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t - \pi \cdot p/2) \quad (3.9)$$

Denomina-se COROA DO INDUTOR, à região compreendida pela parte superior às ranhuras do mesmo. A Figura (3.7) mostra a coroa do indutor e sua respectiva altura  $h_c$ . A dimensão  $C$  corresponde à profundidade ativa da mesma. A Densidade de Campo Magnético que deixa uma região polar e atravessa o entreferro, com o conversor em sincronismo ( $s=0$ ), é expressa por (3.9).

A Densidade de Campo Magnético na coroa do indutor, para um CAL com qualquer número de pólos, é expressa por [5]:

$$bc_{\circ}(x,t) = \frac{1}{hc} \int_L b_{\circ}(x,t) \cdot dx \quad (3.42)$$

Levando-se à equação (3.42) a equação (3.9), escreve-se:

$$bc_{\circ}(x,t) = \frac{B_M(s=0)}{hc} \int_L \cos(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \Pi/2) dx + \frac{\Delta B_M}{hc} \cdot \text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot p/2) \cdot \int_L dx \quad (3.43)$$

Resolvendo-se as integrais, obtém-se:

$$bc_{\circ}(x,t) = B_M(s=0) \cdot \frac{t_p}{\Pi \cdot hc} \cdot \left[ -\text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \Pi/2) \right] + \frac{\Delta B_M}{hc} \cdot \text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot p/2) \cdot x + C_2 \quad (3.44)$$

O termo  $\Delta B_M$  pode ser trabalhado e levado à equação (3.44), resultando:

$$bc_{\circ}(x,t) = -\frac{J_M}{hc} \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p^2}{\epsilon \cdot \Pi^2} \right] \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p + \Pi/2) + 2 J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p^2}{\epsilon \cdot \Pi^2} \right] \cdot \left[ \frac{x}{p \cdot t_p} \right] \cdot \text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t - \Pi \cdot p/2) + C_2 \quad (3.45)$$

Adotadas as condições de contorno:

$$bc_o(x=0, t) = 0 \quad (3.46)$$

$$bc_o(x = p \cdot t_p, t) = 0 \quad (3.47)$$

e aplicadas à equação (3.45), resulta:

$$bc_o(x,t) = 2 \frac{J_M}{hc} \cdot \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p^2}{g \cdot \Pi^2} \right] \cdot \left[ \left( \frac{x}{p \cdot t_p} \right) \cdot \text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \right. \\ \left. \cdot \text{sen}(w_s \cdot t - \Pi \cdot p/2) - \frac{1}{2} \cdot \cos \left[ w_s \cdot t - (\Pi \cdot x)/(t_p) \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cdot \cos(w_s \cdot t) \right] \quad (3.48)$$

A equação (3.48) é expressão geral para a Densidade de Campo Magnético na coroa do indutor, sendo consistente para qualquer número de pólos (par ou impar). Para CALs dotados de número par de pólos, a equação (3.48) ganha por expressão:

$$bc_o(x,t) = 2 \cdot \frac{J_M}{hc} \cdot \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p^2}{g \cdot \Pi^2} \right] \left[ \frac{1}{2} \cos(w_s \cdot t) + \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \cos \left[ w_s \cdot t - ((\Pi \cdot x)/(t_p)) \right] \right] \quad (3.49)$$

Na equação (3.48), o termo  $\text{sen}(\Pi \cdot p/2)$ , dado  $p$  ser um número inteiro, somente atua no sentido de zerar o primeiro termo do segundo membro ou mudar o seu sinal.

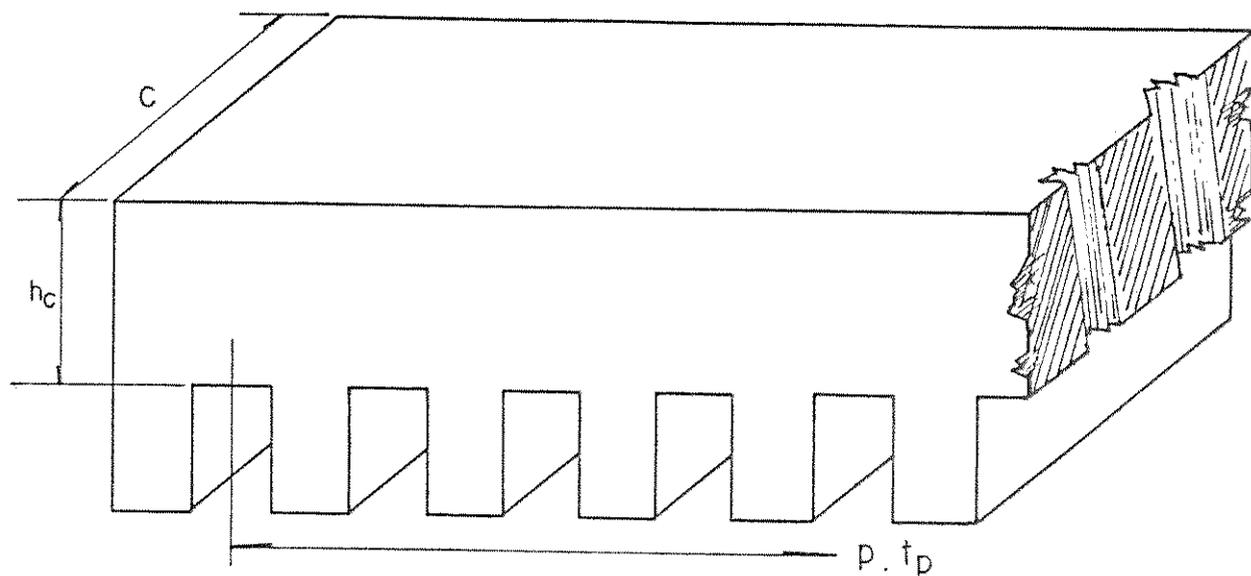


Figura 3.7: Bloco Indutor

### 3.3.2. ALTURA DA COROA DO INDUTOR NOS CALs COM NÚMERO PAR DE PÓLOS

A equação (3.48), particularizada para conversores com número par de pólos, ganha a expressão mostrada em (3.49). Observa-se nesta que, para  $x = 0$ ,  $bc_o(x=0,t) = 0$  e para  $x = p.t_p$ , resulta  $bc_o(x=p.t_p,t) = 0$ , isto é, a densidade de campo na coroa do indutor, passa por valor nulo a cada par de pólos, tendo um comportamento em  $x$ , como mostra a Figura (3.8). Na referida Figura, observa-se que a Densidade de Campo Magnético passa por máximo em valores ímpares de  $t_p$ . Portanto, atribuindo-se a  $x$ , por exemplo, o valor  $t_p$ :

$$bc_o(x = t_p, t) = 2 \frac{J_M}{hc} \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p^2}{\epsilon \cdot \Pi^2} \right]$$

$$(1/2) \cdot \left[ \cos(w_s \cdot t) - \cos(w_s \cdot t - (\Pi)) \right]$$

$$bc_o(x = t_p, t) = 2 \frac{J_M}{hc} \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p^2}{g \cdot \Pi^2} \right] \cdot \cos(w_e \cdot t) \quad (3.50)$$

de onde:

$$B_{CM}(s=0) = 2 \frac{J_M}{hc} \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p^2}{g \cdot \Pi^2} \right] \quad (3.51)$$

Relacionando a equação (3.51) com a equação (3.11), obtém-se:

$$B_{CM}(s=0) = \left[ \frac{2 \cdot t_p}{hc \cdot \Pi} \right] \cdot B_M(s=0) \quad (3.52)$$

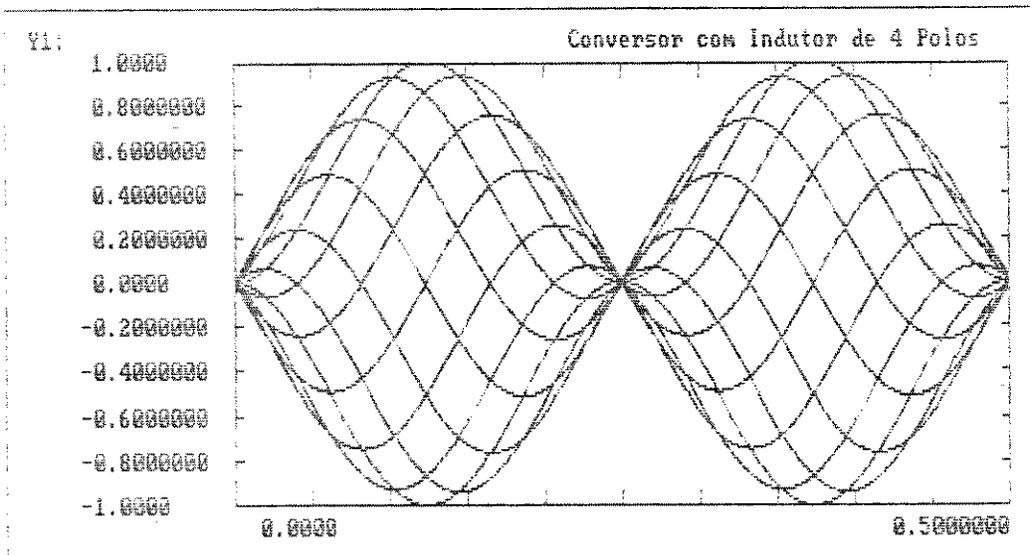


Figura 3.8: Comportamento da Densidade de Campo Magnético na Coroa de um Indutor com 4 Pólos

A altura da coroa do indutor, para CALs com número par de pólos, é calculada por:

$$hc = \left[ \frac{2 \cdot t_p}{\Pi} \right] \cdot \frac{B_M(s=0)}{B_{CM}(s=0)} \quad (3.53)$$

A equação (3.49) e a Figura 3.8 indicam que o indutor de um CAL com número par de pólos pode ter um especial desenho, dado que, a cada dois passos polares, a Densidade de Campo Magnético, na coroa do indutor, é nula. Tudo se passa como se o CAL fosse provido de indutores bipolares, colocados em série como mostra a Figura 3.9.

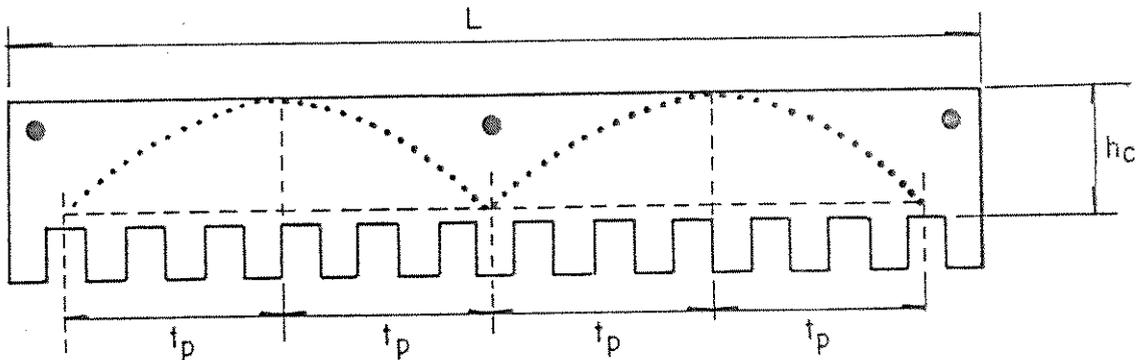


Figura 3.9: Comportamento da Densidade de Campo Magnético no Indutor de um CAL de 4 pólos.

### 3.3.3. ALTURA DA COROA DO INDUTOR NOS CONVERSORES COM NÚMERO ÍMPAR DE PÓLOS

A equação (3.48) permite a determinação da Densidade de Campo Magnético na coroa do indutor de CALs para qualquer número de pólos. Adotando-se para a referida equação:

$$A_s = 2 \frac{J_M}{hc} \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p^2}{t_g \cdot \Pi^2} \right] \quad (3.54)$$

Escreve-se:

$$b_{c_0}(x, t) = A_s \left[ (x/p \cdot t_p) \cdot \text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(w_s \cdot t - (\Pi \cdot p)/2) + \right.$$

$$- \frac{1}{2} \cos\left(\omega_s \cdot t - (\pi \cdot x)/(t_p)\right) + \frac{1}{2} \cos(\omega_s \cdot t) \quad ] \quad (3.48)$$

A equação (3.48) atende a conversores com número par ou ímpar de pólos e leva a um comportamento como o mostrado na Figura (3.10), para um CAL de 3 pólos.

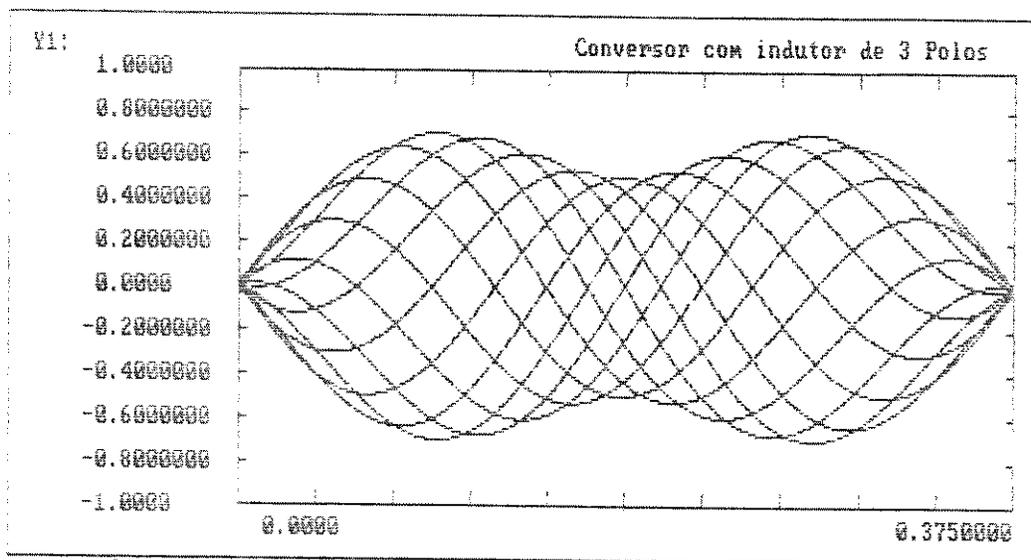


Figura 3.10: Comportamento da Densidade de Campo para um CAL de 3 pólos.

A máxima amplitude da onda de fluxo magnético na coroa do indutor é calculada, por:

$$A_s = 2 \frac{J_M}{hc} \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p^2}{g \cdot \Pi^2} \right] \quad (3.55)$$

#### 3.3.4. CONCLUSÕES

As Figuras 3.8 e 3.10 permitem ao pesquisador observar o comportamento da Densidade de Campo Magnético nas coroas de indutores de 4 e de 3 pólos, respectivamente. Quando o conversor tem número par de pólos, tudo se passa como se o mesmo fosse for-

mado por secções de 2 pólos, cada e a amplitude na coroa é calculada segundo a equação (3.55). Quando o número de pólos é impar, a amplitude máxima do sinal de campo magnético depende do número de pólos. À medida que o número impar de pólos vai crescendo, a amplitude aproxima-se do valor  $A_s$ . As Figuras 3.11(a), 3.11(b) e 3.11(c) mostram comportamento de conversores de 9, 29 e 30 pólos, respectivamente.

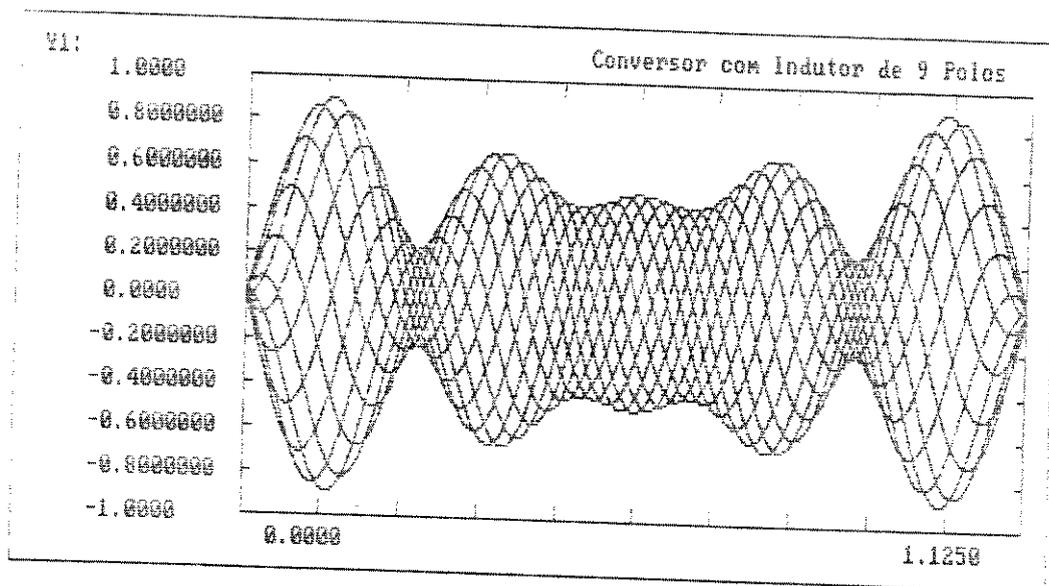


Figura 3.11(a): Comportamento da Densidade de Campo Magnético na Coroa de um Conversor de 9 Pólos

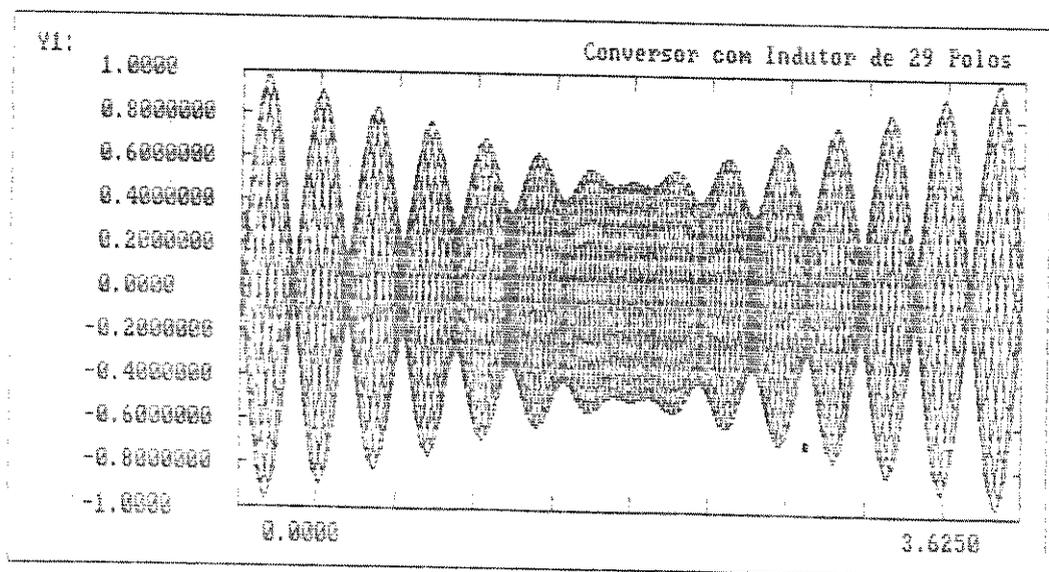


Figura 3.11(b): Comportamento da Densidade de Campo Magnético na Coroa de um Conversor de 29 Pólos

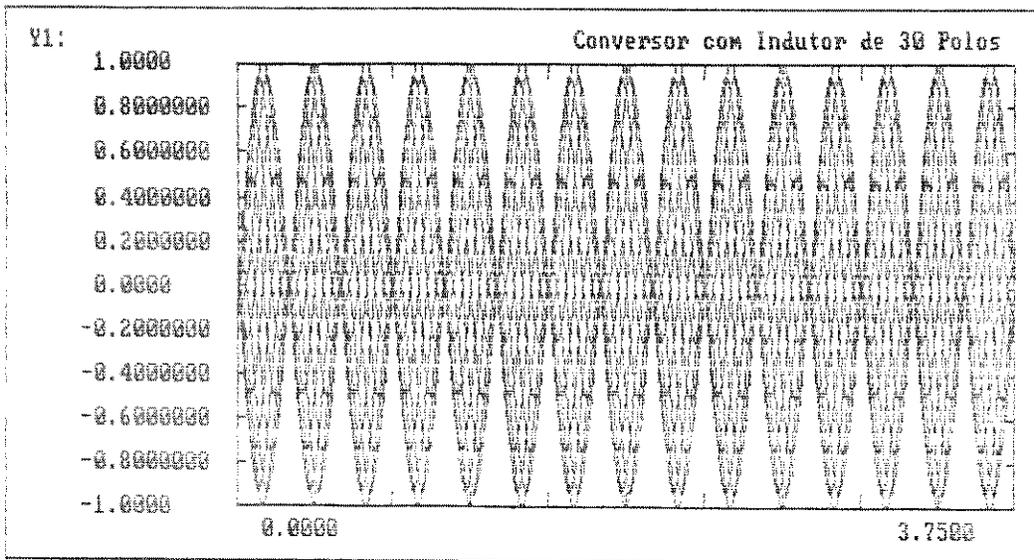


Figura 3.11(c): Comportamento da Densidade de Campo Magnético na Coroa de um Conversor de 30 Pólos

### 3.4. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS FORÇAS ELETROMOTRIZES INDUZIDAS EM INDUTORES MUITO LONGOS E LINARES CONTÍNUOS

#### 3.4.1. FORÇAS ELETROMOTRIZES INDUZIDAS NOS CONDUTORES INDUTORICOS

##### 3.4.1.1. INTRODUÇÃO

Quando o indutor de um CAL é extenso e o linor é contínuo, o Efeito Longitudinal de Extremidade, que também se faz presente, não tem penetração suficiente para abranger todo o entreferro e, nestas condições, pode-se, sob hipótese, dizer que os condutores colocados a meio caminho entre 0 e  $(p.t_p)$ , estão isentos do mencionado efeito. Sob esta hipótese, pode-se escrever:

i) O conversor assíncrono linear pode ser analisado,

guardada a hipótese acima, como um conversor assíncrono rotativo - em ambos são induzidas 'forças eletromotrizes mocionais', e;

- ii) As forças eletromotrizes devidas aos harmônicos espaciais, presentes na onda de força magnemotriz criada pelas bobinas distribuídas em ranhuras, não são consideradas.

Alimentando-se convenientemente o indutor de um CAL, estabelece-se no entreferro do mesmo uma onda fundamental de Densidade de Campo Magnético, que se translada com velocidade  $V_{sx}$  em relação a um referencial estacionado no indutor. Dado a existência de velocidade relativa entre a referida onda de fluxo, os condutores dos indutores e os condutores fictícios distribuídos uniformemente sobre a superfície do linor, existirão forças eletromotrizes induzidas nos condutores fictícios deste e nos condutores reais daqueles. A expressão destas forças eletromotrizes mocionais, pode ser estabelecida a partir da Lei de Faraday.

Dado não estar presente o Efeito Longitudinal de Extremidade, pode-se afirmar que a onda de densidade de fluxo que corta um condutor, esteja ele no linor ou no indutor, tem por expressão:

$$b_s(x,t) = B_m(s) \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \delta s) \quad (3.26)$$

As forças eletromotrizes induzidas nos condutores do indutor são de características mocionais e expressas por:

$$e_1 = bs(x,t) \cdot C \cdot V_{sx} \quad (3.56)$$

onde C é a largura mecânica da peça indutórica.

Quando o campo se movimenta por um espaço de entreferro correspondente a  $2 \cdot t_p$ , a força eletromotriz induzida em um condutor ativo, em seu valor eficaz, vale [19] :

$$E = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} e^2 dt}$$

$$E = C \cdot V_{sx} \cdot \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} bs^2(x,t) dt} \quad (3.57)$$

Com:

$$E = \bar{B}_s \cdot C \cdot V_{sx} \quad (3.58)$$

onde  $\bar{B}_s$  é valor eficaz da Densidade de Campo, expresso por:

$$\bar{B}_s = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} bs^2(x,t) dt} \quad (3.59)$$

Por outro lado, demonstrou-se, que:

$$V_{sx} = 2 \cdot t_p \cdot f \quad (2.3)$$

Define-se 'fator de forma de uma função periódica' como a relação estabelecida entre os valores eficaz e médio da

função, definida em um período completo da mesma:

$$K_F = \bar{B}_S / B_{AV} \quad (3.60)$$

onde  $B_{AV}$  é a densidade média de campo, estabelecida ao longo de um passo polar. Sendo  $\phi_p$ , o fluxo magnético que deixa uma região polar, definido por:

$$\phi_p = B_{AV} \cdot t_p \cdot C \quad (3.61)$$

e:

$$E = K_F \cdot B_{AV} \cdot C \cdot (2 \cdot t_p \cdot f)$$

$$E = 2 \cdot K_F \cdot \phi_p \cdot f \quad (3.62)$$

Para uma onda de fluxo senoidal, o fator de forma de onda, tem por valor:

$$K_F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11 \quad (3.63)$$

O valor eficaz da força eletromotriz induzida em uma bobina de  $N$  espiras, que ocupe duas ranhuras espaçadas de um passo polar, será:

$$E_B = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi_p \quad (3.64)$$

$$\phi_p = B_{AV} \cdot C \cdot t_p \quad (3.65)$$

ou ainda:

$$\Phi_p = \frac{2}{\pi} \cdot B_m(s) \cdot C \cdot t_p \quad (3.66)$$

equação que caracteriza o comportamento do fluxo polar em um CAL, função do escorregamento. Análise à equação (3.41), mostra a dependência existente entre  $B_m$  e o escorregamento  $s$ .

#### 3.4.1.2. DENSIDADE MÉDIA DE CAMPO MAGNÉTICO

Se o campo magnético que deixa o indutor e atravessa o entreferro tem densidade de campo senoidal, com comportamento como mostra a Figura 3.12, para um passo polar, escreve-se:

$$\Phi_p = \int_0^{t_p} B_m(s) \cdot C \cdot \text{sen}\left[\pi \cdot x/t_p\right] \cdot dx \quad (3.67)$$

Operando a integração no intervalo especificado, encontra-se:

$$\Phi_p = \left[ \frac{2}{\pi} B_m(s) \right] \cdot C \cdot t_p \quad (3.68)$$

Fazendo-se:

$$B_{av} = \left[ \frac{2}{\pi} \cdot B_m(s) \right] \quad (3.69)$$

Conclui-se:

$$\Phi_p = B_{av} \cdot C \cdot t_p \quad (3.70)$$

para indutores longos e lineares contínuos.

Associando as equações (3.64) e (3.66), escreve-se:

$$E_B = 2\sqrt{Z} \cdot f \cdot N \cdot B_M(s) \cdot t_p \cdot C \quad (3.71)$$

onde  $N$  é o número de condutores em uma bobina indutória.

Sendo  $K_{we}$  o fator de enrolamento indutórico, a força eletromotriz induzida nos condutores que formam uma fase do enrolamento, vale:

$$E_F = 2\sqrt{Z} \cdot f \cdot N_r \cdot B_M(s) \cdot t_p \cdot C \cdot K_{we} \quad (3.72)$$

onde  $N_r$  é o número de espiras conectadas em série, em uma fase do enrolamento. Como cada espira tem dois condutores ativos, resulta:

$$E_F = \sqrt{Z} \cdot f \cdot N_F \cdot B_M(s) \cdot t_p \cdot C \cdot K_{we} \quad (3.73)$$

que expressa a força eletromotriz induzida em uma fase de um enrolamento que tenha  $N_F$  condutores ativos por fase e por indutor.

A equação (3.73) está em perfeita consonância com a teoria dos conversores rotativos síncronos e assíncronos. Nestes, não existe o Efeito Longitudinal de Extremidade. A referência [6], experimentando modelos dotados de indutores com 8 pólos e Velocidade Linear Síncrona inferior a 6m/s, não levou em conta o referido efeito, porém tal comportamento não é recomendável - leva a erros grosseiros, quando a Velocidade Linear Síncrona é elevada.

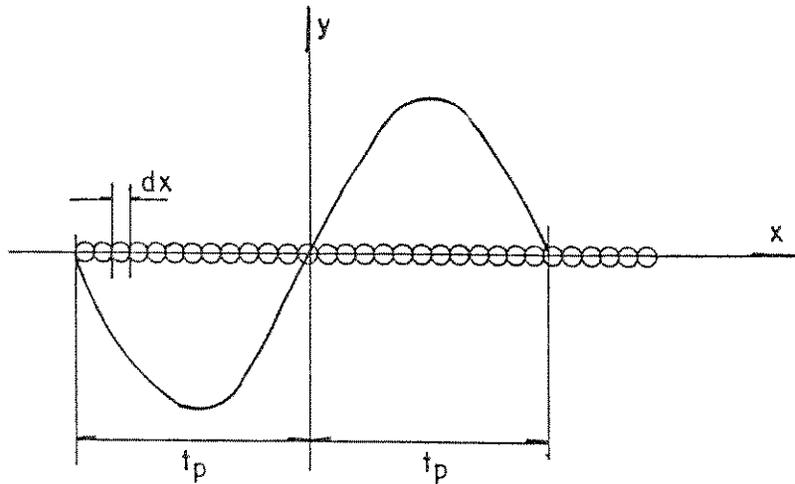


Figura 3.12: Distribuição da Densidade de Campo Magnético no entreferro de um Conversor de Indutor muito longo

#### 3.4.1.3. CONSIDERAÇÕES

Devido à configuração do indutor, o seu comportamento, quando comparado com o comportamento de um CAR convencional, é diferente:

- i) As forças eletromotrizes induzidas nos condutores do indutor, sofrem a influência dos Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda, devido a presença de  $\rho'_R$  na expressão de  $B_M(s)$ , e;
- ii) Quando um CAR convencional é colocado a operar a uma velocidade angular  $\omega_r = \omega_s$ , isto é, por meio externo o conversor é colocado em sincronismo, as forças eletromotrizes induzidas no rotor, pela fundamental da onda de Densidade de Campo Magné-

tico, são nulas, restando sinal de frequência elevada, devido à presença de harmônicos de alta ordem, presentes na referida onda. Nos CALs, o linor, em velocidade linear síncrona, é sede de forças eletromotrizes induzidas devidas às ondas de Efeito Longitudinal de Extremidade e devido à presença de harmônicos de alta ordem na onda de densidade de fluxo presente. Yamamura [4] afirma que conversores assíncronos lineares de Baixa Velocidade, mostram força propulsora estando o linor em sincronismo, isto é, os CALs de Baixa Velocidade, podem operar, por moto próprio, em sincronismo.

### 3.4.2. FORÇAS ELETROMOTRIZES INDUZIDAS NO LINOR [2]

#### 3.4.2.1. INTRODUÇÃO

No CAL mostrado na Figura 3.1, uma placa condutora, não magnética, de condutibilidade elétrica  $\sigma_R$ , espessura  $h_R$  e largura  $C'$ , translada-se com velocidade  $V_{Rx}$ , imersa em um Campo Magnético de Translação de Velocidade Linear Síncrona  $V_{Sx}$  e de densidade  $b(x,t)$ , dada por:

$$b_s(x,t) = B_m(s) \cos(\omega_s t - \pi x/t_p + \delta_s) \quad (2.9)$$

A partir do conceito de força eletromotriz induzida em condutores em movimento no interior de campos magnéticos, encontra-se a expressão das referidas fems e, a partir destas, as

correntes induzidas no linor.

Um laço elementar, de comprimento  $2x$  e largura  $2 \cdot x$ , é praticado no corpo da lâmina linórica, a qual forma o membro móvel do conversor. A resistência ôhmica do laço pode ser estimada partindo-se do pressuposto que a largura do referido é desprezível, em relação ao comprimento:

$$R = \frac{1}{\sigma_R} \cdot \frac{2 \cdot C}{h_R \cdot dx} \quad (3.74)$$

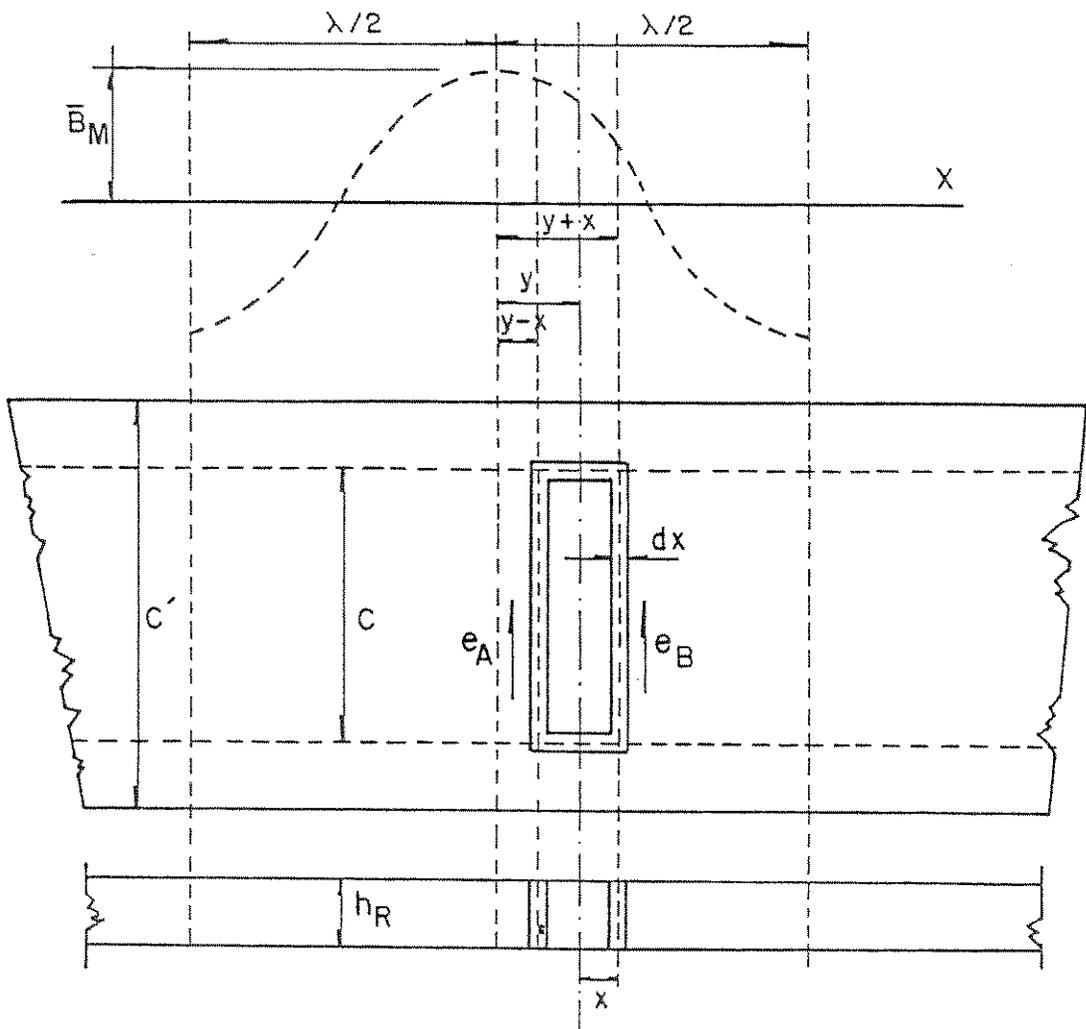


Figura 3.13: Lâmina Linórica de um CAL dotado de indutores muito longos e linor contínuo

A indutância do referido laço, é expressa por [21] :

$$L = \frac{\mu_0 \cdot C}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot x}{h_R} \right) + 1,5 \right] \quad (3.75)$$

em Henry.

Dado à presença do Campo Magnético de Translação, forças eletromotrizes mocionais são induzidas nos lados C do laço sob pesquisa. Uma inspeção na lâmina linórica mostrada na Figura 3.13, fornece:

$$e_R = e_A - e_B \quad (3.76)$$

$$e_R = B_M(s) \cdot C \cdot (V_{rel}) \cdot \left[ \cos \left( \frac{\pi}{t_p} (y - x) \right) + \right. \\ \left. - \cos \left( \frac{\pi}{t_p} (y + x) \right) \right] \quad (3.77)$$

onde  $V_{rel}$  representa a velocidade relativa do campo magnético em relação à lâmina linórica. Como o conversor é assíncrono, a velocidade da lâmina é inferior a  $V_{sx}$ . A partir da definição de escorregamento linear, escreve-se:

$$V_{rel} = V_{sx} - V_{rx} = s \cdot V_{sx} \quad (3.78)$$

$$y = (V_{sx} - V_{rx}) \cdot t = s \cdot V_{sx} \cdot t$$

$$\frac{\pi}{t_p} y = \frac{\pi}{t_p} \cdot s \cdot V_{sx} \cdot t$$

Como:

$$V_{sx} = 2 \cdot t_p \cdot f$$

Resulta:

$$\frac{\pi}{t_p} y = s \cdot w_s \cdot t \quad (3.79)$$

Levando-se a equação (3.79) à equação (3.77), encontra-se:

$$e_R = E_M(s) \cdot C \cdot s \cdot V_{sx} \cdot \left[ \cos(s \cdot w_s \cdot t - \pi \cdot x / t_p) + \right. \\ \left. - \cos(s \cdot w_s \cdot t + \pi \cdot x / t_p) \right] \quad (3.80)$$

Desenvolvendo as funções trigonométricas:

$$A_s = E_M(s) \cdot C \cdot s \cdot V_{sx} \quad (3.81)$$

e

$$e_R = A_s \left[ \cos(s \cdot w_s \cdot t) \cdot \cos(\pi \cdot x / t_p) + \operatorname{sen}(s \cdot w_s \cdot t) \cdot \right. \\ \left. \operatorname{sen}(\pi \cdot x / t_p) - \cos(s \cdot w_s \cdot t) \cdot \cos(\pi \cdot x / t_p) + \right. \\ \left. + \operatorname{sen}(s \cdot w_s \cdot t) \cdot \operatorname{sen}(\pi \cdot x / t_p) \right]$$

ou ainda:

$$e_R = \left[ 2 E_M(s) \cdot C \cdot s \cdot V_{sx} \cdot \operatorname{sen}(s \cdot w_s \cdot t) \cdot \operatorname{sen}(\pi \cdot x / t_p) \right] \quad (3.82)$$

que expressa a força eletromotriz induzida na espira fictícia praticada sobre a lâmina linórica.

A corrente induzida, circulante na referida espira, é expressa por:

$$e_R = R.i + L \frac{di}{dt} \quad (3.83)$$

que caracteriza uma equação diferencial de primeira ordem, a coeficientes constantes e tem solução do tipo:

$$i(t) = i_{\text{particular}} + i_{\text{complementar}}$$

$$i(t) = \frac{E_M(x)}{Z} \cdot \text{sen}(s.w_s.t - \phi) + K \cdot e^{-t/\tau} \quad (3.84)$$

onde  $Z$  é o módulo da impedância da espira e  $\tau$  é a constante de tempo do circuito formado.

$$Z = \sqrt{R^2 + (s.w_s.L)^2} \quad (3.85)$$

$$\phi = \text{ARCO tg} \left[ \frac{s.w_s.L}{R} \right]$$

A corrente permanente que circula pela espira fictícia, vale:

$$i_R = \frac{2 E_M(s) \cdot C \cdot (s.V_{sx})}{Z} \cdot \text{sen}(\pi.x/t_p) \cdot \text{sen}(s.w_s.t - \phi) \quad (3.86)$$

equação que caracteriza, de forma geral, a corrente permanente induzida na lâmina linórica que se translada a uma velocidade  $V_{Rx}$ , imersa em um Campo Magnético de Translação de Velocidade Linear

Síncrona  $V_{sx}$  e de Densidade de Campo Magnético  $bs(x,t)$ .

### 3.4.2.2. FORÇA ATUANTE NA LAMINA LINÓRICA

A determinação da força propulsora atuante na lâmina linórica, envolve o cálculo da potência convertida na mesma e na espira fictícia ali praticada:

$$\Delta P = R \cdot i_R^2 \left[ \frac{1 - s}{s} \right] \quad (3.87)$$

$$\Delta P = R \cdot \left[ \frac{4 E_m^2 (s) \cdot C^2 \cdot (s \cdot V_{sx})^2}{Z^2} \right] \cdot \text{sen}^2(\pi \cdot x / t_p) \cdot \text{sen}^2(s \cdot \omega_s \cdot t - \phi) \cdot \left[ \frac{1 - s}{s} \right] \quad (3.88)$$

e:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 = R^2 \left[ 1 + X_L^2 / R^2 \right]$$

com:

$$X_L = s \cdot \omega_s \cdot L \quad \text{e} \quad R = \frac{1}{\sigma_R} \cdot \left[ \frac{2 \cdot C}{\Delta x \cdot h_R} \right] \quad (3.89)$$

Associando-se as equações (3.88) e (3.89), encontra-se:

$$\Delta P = \left[ \frac{\sigma_R \cdot h_R \cdot \Delta x}{2 \cdot C} \right] \cdot \left[ \frac{4B_m^2(s) \cdot C^2 \cdot s \cdot V_s x^2}{1 + \text{tg}^2 \phi} \right] \cdot \text{sen}^2(\Pi \cdot x / t_p) \cdot \text{sen}^2(s \cdot \omega_e \cdot t - \phi) \cdot (1 - s) \quad (3.90)$$

A partir da definição de 'diferencial de uma função', escreve-se:

$$dP = (\sigma_R \cdot h_R) \cdot \left[ \frac{B_m^2(s) \cdot C \cdot s \cdot (1 - s) \cdot V_s x^2}{1 + \text{tg}^2 \phi} \right] \cdot \text{sen}^2(\Pi \cdot x / t_p) \cdot \left[ 1 - \cos(2 \cdot s \cdot \omega_e \cdot t - 2\phi) \right] dx \quad (3.91)$$

O valor médio da potência convertida na referida espira, é caracterizado pelo termo atemporal da equação (3.91):

$$\overline{dP} = (\sigma_R \cdot h_R) \cdot \left[ \frac{B_m^2(s) \cdot C \cdot s \cdot (1 - s) \cdot V_s x^2}{(1 + \text{tg}^2 \phi)} \right] \cdot \text{sen}^2(\Pi \cdot x / t_p) \cdot dx \quad (3.92)$$

Sobre um passo polar, a potência convertida na lâmina, tem por expressão:

$$\overline{P} = (\sigma_R \cdot h_R) \cdot B_m^2(s) \cdot C \cdot s \cdot (1 - s) \cdot V_s x^2 \cdot \int_0^{t_p} \text{sen}^2(k \cdot x) dx \quad (3.93)$$

onde:

$k = \Pi / t_p$  : Constante de Propagação da Onda de Densidade

e:

$$\bar{P} = \left[ \frac{\sigma_R \cdot hR}{2} \right] \cdot B_M^2(s) \cdot C \cdot s \cdot (1 - s) \cdot V_{sx}^2 \cdot t_p \quad (3.94)$$

que expressa a potência convertida na lâmina linórica para um comprimento de lâmina correspondente a um passo polar .

A força propulsora que atua na lâmina linórica, por passo polar, é expressa por:

$$\bar{f}_x = \frac{\bar{P}}{V_{sx} \cdot (1 - s)} \quad (3.95)$$

Levando-se a equação (3.95) à equação (3.94), resulta:

$$\bar{f}_x = \left[ \frac{(\sigma_R \cdot hR)}{2} \right] \cdot B_M^2(s) \cdot C \cdot s \cdot V_{sx} \cdot t_p$$

ou ainda:

$$\bar{f}_x = \left[ \sigma_R \cdot hR \right] \cdot B_M^2(s) \cdot C \cdot s \cdot t_p^2 \cdot f \quad (3.96)$$

equação que caracteriza a força propulsora atuante na lâmina linórica, por passo polar do enrolamento indutórico. Os parâmetros expressos em (3.96), correspondem aos apresentados na Figura - (3.13), para um indutor de p passos polares. A força propulsora final ou resultante, é função do número de passos polares que o indutor apresenta -  $f_{xr}$ .

Ressaltar que os CALs possuem descontinuidades e

estas atuam modificando o comportamento da Densidade de Campo Magnético  $b_s(x,t)$  e da condutibilidade elétrica  $\sigma_R$  da lâmina linórica. Em consequência, altera-se o comportamento da força propulsora final.

### 3.5. CONSIDERAÇÕES

Neste Capítulo, analisou-se o CAL de forma idealizada. Muitas das equações aqui obtidas serão empregadas diretamente na técnica de projeto proposta neste trabalho; outras servem para aclarar a teoria dos CALs, fornecendo subsídios para a compreensão dos fenômenos presentes nesta família de conversores. Aparentemente alongou-se demais em certas passagens e demonstrações, porém, o objetivo fundamental deste trabalho, como um todo, é ser didático, sem ferir o objetivo proposto. Por esta razão, muitos itens, que poderiam somente mostrar resultados, foram mantidos conforme, mostrando passagens e hipóteses intermediárias.

Por outro lado, sabendo-se que:

$$\rho'_R = \frac{\rho_V}{hr} = \frac{1}{\sigma_R \cdot hr}$$

resulta:

$$\bar{ix} = \frac{1}{\rho'_R} \cdot B_m^2(s) \cdot C \cdot s \cdot f \cdot t_p^2 \quad (3.97)$$

equação que expressa a força propulsora teórica, por passo polar do indutor. Introduzindo-se na referida equação, o número de pólos, obtém-se expressão para a força teórica que atua em CALs ou

em CARs. Os Efeitos Transversal de Borda e Pelicular podem ser introduzidos no estudo, se  $\rho_R'$  for substituído por  $\rho_R''$ .

$$f_{xt} = \frac{1}{\rho_R'} \cdot B_m^2(s) \cdot C \cdot s \cdot f \cdot p \cdot t_p^2 \quad (3.98)$$

Se o conversor for assíncrono e rotativo, pode-se escrever:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{p} \quad (3.99)$$

$$f_{xt} = \frac{1}{\rho_R'} \cdot B_m^2(s) \cdot C \cdot s \cdot f \cdot \pi \cdot D \cdot t_p$$

ou ainda:

$$T = \frac{2}{\rho_R'} \left[ \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C \right] \cdot B_m^2(s) \cdot s \cdot f \cdot t_p \quad (3.100)$$

que expressa o conjugado de um CAR em função do volume do rotor e da Densidade de Campo Magnético. Desenvolvendo-se a equação (3.100), alcança-se tradicional equação de projeto dos CARs.

## CAPÍTULO 4

### EFEITOS DE EXTREMIDADES

#### 4.1. INTRODUÇÃO

Todo conversor assíncrono, de modelagem linear ou cilíndrica, cujo indutor tem comprimento finito, apresenta um conjunto de fenômenos a que se convencionou chamar de EFEITOS DE EXTREMIDADES - sendo este o custo da falta de continuidade física e magnética dos referidos - fenômenos estes que não se fazem presentes nos CARs convencionais. Nestas descontinuidades reside uma série de inconvenientes presentes nos CALs, nos conversores de arco e nos de rotor em caneca (Cup).

Os Efeitos de Extremidades são analisados de forma variada por diversos pesquisadores, porém, não de forma conclusiva, em face da complexidade dos mesmos. As soluções encontradas para o equacionamento do comportamento do campo magnético no entreferro, nos corpos indutores e o comportamento da força propulsora que atua no conversor, trazem consigo um conjunto de hipóteses simplificadoras, que tornam o equacionamento possível.

A literatura consultada mostra que cada pesquisador adotou o ferramental que lhe pareceu mais adequado para a sua

particular forma de análise.

Os Efeitos de Extremidades compreendem um conjunto de fenômenos que influenciam, de forma direta, nos parâmetros ligados ao conversor, implicando em alterações nas correntes induzidas na lâmina linórica e na distribuição da Densidade de Campo Magnético no entreferro, com consequências diretas na intensidade da força propulsora, no fator de potência, no rendimento e no equilíbrio das correntes e ou das tensões terminais.

O termo 'Efeitos de Extremidades' globaliza um conjunto de fenômenos estudados sob diferentes denominações:

- Efeito Longitudinal Dinâmico de Extremidade
- Efeito Longitudinal Estático de Extremidade
- Efeito Transversal de Borda

O Efeito Longitudinal Dinâmico de Extremidade está ligado aos problemas oriundos da movimentação do linor em relação ao indutor, residência do referencial. O linor viaja a uma velocidade  $V_{rx}$ , em relação ao referido referencial indutório e o Campo Magnético de Translação viaja a uma velocidade  $V_{sx}$ , em relação ao mesmo referencial.

Traçando-se sobre o linor de um conversor de indutor curto, quatro laços fictícios, dispostos como mostra a Figura 4.1, no particular instante  $t_1$ , ter-se-á:

- a) Os laços  $L_1$  e  $L_4$  estão bastante distantes das

extremidades do indutor, de forma que, sem erro, pode-se admitir que os mesmos não concatenam fluxo, no aludido instante. Não concatenando fluxo, não estão sujeitos a variações deste, não estão sujeitos a forças eletromotrizes induzidas e, tampouco, a correntes elétricas induzidas, e;

- b) Os laços  $L_2$  e  $L_3$  concatenam fluxo magnético variante no tempo e no espaço, estando, portanto, sujeitos a forças eletromotrizes induzidas. Como o fluxo magnético viaja com velocidade relativa, diferente de zero, em relação aos referidos laços, forças eletromotrizes mocionais estarão presentes nos mesmos. Estando o indutor, estático em relação ao referencial e estando o Campo Magnético de Translação viajando da esquerda para a direita, na referida Figura, assim como o linor, os laços  $L_2$  e  $L_3$  tem comportamentos elétrico e magnético diferentes. A extremidade esquerda do indutor, será a extremidade de entrada para o linor e a extremidade direita daquele, será a extremidade de saída deste. Desta forma, os pontos situados na metade esquerda do laço  $L_2$ , estão fora da região ativa do indutor, enquanto que os da metade direita, estão imersos no fluxo magnético gerado por aquele. No laço  $L_3$ , situação inversa se apresenta.

A reação imposta pelo linor, na região do laço  $L_2$ , é

de opor-se à variação do fluxo e as forças eletromotrizes aí induzidas farão circular correntes que atuarão no sentido de impedir o crescimento do fluxo concatenado por  $L_2$ . No laço  $L_3$ , as correntes induzidas atuarão no sentido de impedir o decrescimento do mencionado fluxo, o que já evidencia comportamento não semelhante para as distintas extremidades do indutor.

O fato de haver circulação de corrente no laço  $L_3$ , após 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 espraiamento do indutor, no sentido longitudinal, dar origem a uma componente de força que atua no sentido inverso ao da força propulsora do conversor, isto é, dar origem a uma componente de força frenante. Segundo E. R. Laithwaite [5], o efeito frenante é tão mais pronunciado quanto maiores forem as velocidade  $V_{sx}$  e  $V_{Rx}$ .

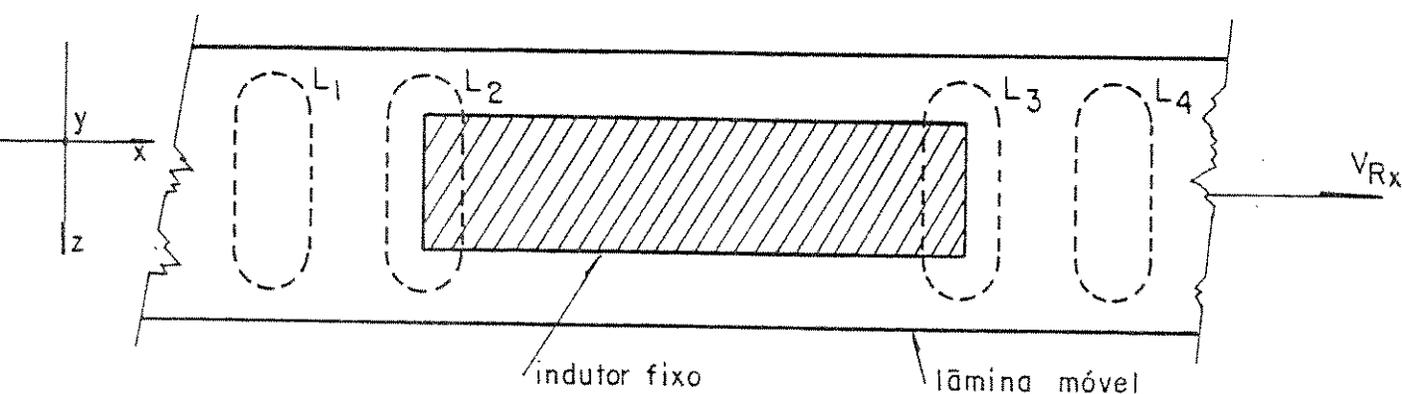


Figura 4.1: Lâmina Linórica - Laços Fictícios

O Efeito Longitudinal Estático de Extremidade está vinculado às diferenças de comportamento do circuito magnético

oferecido às várias bobinas que compõe as fases do enrolamento indutórico. O fato do circuito magnético apresentar relutância magnética diferente para cada bobina do indutor, é fonte de variação da impedância de bobina para bobina, o que não se faz presente nos CARs convencionais. Relutâncias magnéticas diferentes conduzem a indutâncias e reatâncias indutivas diferentes para cada fase do enrolamento. Na operação 'corrente constante', o fenômeno conduz a diferentes tensões para cada uma das fases do indutor. Se for escolhido o critério de tensão aplicada constante, as correntes das fases serão diferentes e o fluxo magnético, presente no entreferro, que já é sujeito a muitos outros fenômenos, também ficará sujeito à não uniformidade das correntes presentes nas fases indutóricas. A onda de fluxo magnético no entreferro, para a operação a corrente constante, tem o comportamento mostrado na Figura 4.2. É importante ressaltar que a onda de fluxo magnético apresenta uma pronunciada 'cauda magnética', presente na extremidade de saída do linor, a uma distância relativamente grande da extremidade do indutor.

O Efeito Longitudinal Estático de Extremidade se faz presente com o linor parado ou em movimento, porém, se agrava quando este é colocado a movimentar-se. A maior ou menor intensidade do mencionado efeito, está ligada ao tipo de enrolamento depositado no indutor, à modelagem das extremidades indutóricas e à espessura do entreferro. Entreferros grandes e indutores estendidos além da primeira e da última ranhuras, reduzem a descontinuidade do circuito magnético, amoldam as relutâncias magnéticas e geram indutâncias próprias de valores muito próximos, para as fases do enrolamento indutórico.

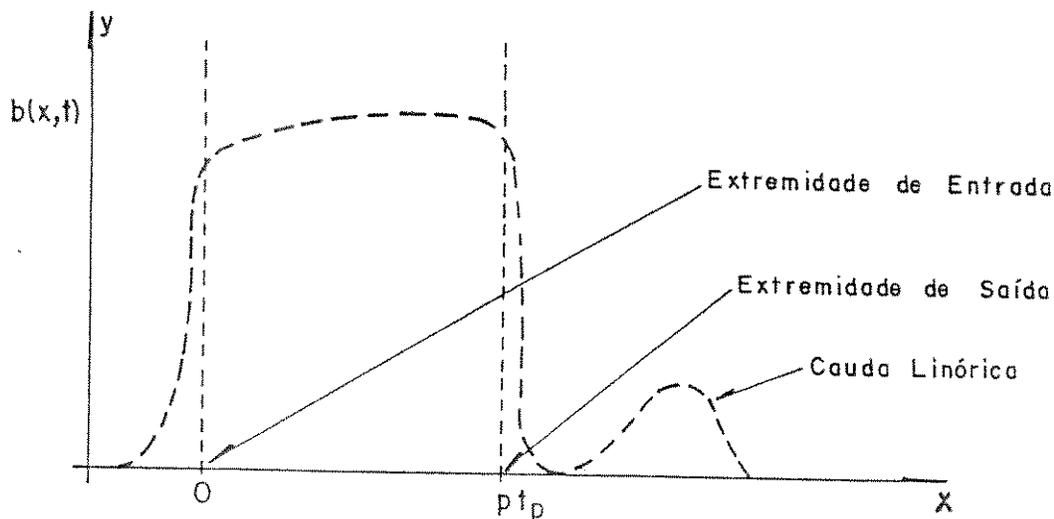


Figura 4.2: Comportamento da Densidade de Campo Magnético no Entreferro e fora dele

Outro fato importante relacionado ao Efeito Longitudinal Estático de Extremidade, liga-se ao entreferro, que nos CALs, é descontínuo nas extremidades, o que afeta a distribuição das linhas de campo magnético e a distribuição da Densidade de Campo Magnético no entreferro e na coroa do indutor.

O Efeito Transversal de Borda está ligado ao espraio do fluxo magnético no entreferro e ao fato das linhas de correntes induzidas no linor, fecharem trajetórias sob o corpo indutório. O fenômeno é atenuado com o aumento relativo da largura do linor em relação à largura do indutor. Tem-se como hipótese fundamental, que a espessura do linor é constante em ambas as direções. A largura  $C$  do indutor é sempre menor que a largura  $C'$  do linor - ver Figura 4.3.

Como as correntes induzidas fecham trajetórias elíp-

tas e, ao longo de toda a trajetória, estas estão submetidas a campo magnético, observa-se que as forças resultantes da interação do campo magnético indutórico, com as correntes linóricas, podem ser decompostas em uma componente na direção preferencial  $x$  e em componentes nas direções  $y$  e  $z$ . A componente presente na preferencial direção  $x$ , adicionar-se-ão inúmeras outras, que produzirão a força propulsora dos CALs. As componentes de força que atuam na direção  $z$ , são origem de instabilidade lateral para o linor, quando em movimento, bastando, para tanto, que os indutores e o referido não guardem entre si perfeita simetria lateral. O Efeito Transversal de Borda é tanto mais pronunciado quanto mais próximas forem as dimensões  $C$  e  $C'$ . Assim, sempre que possível, o linor deve ser mais largo que o indutor (ou indutores)[9].

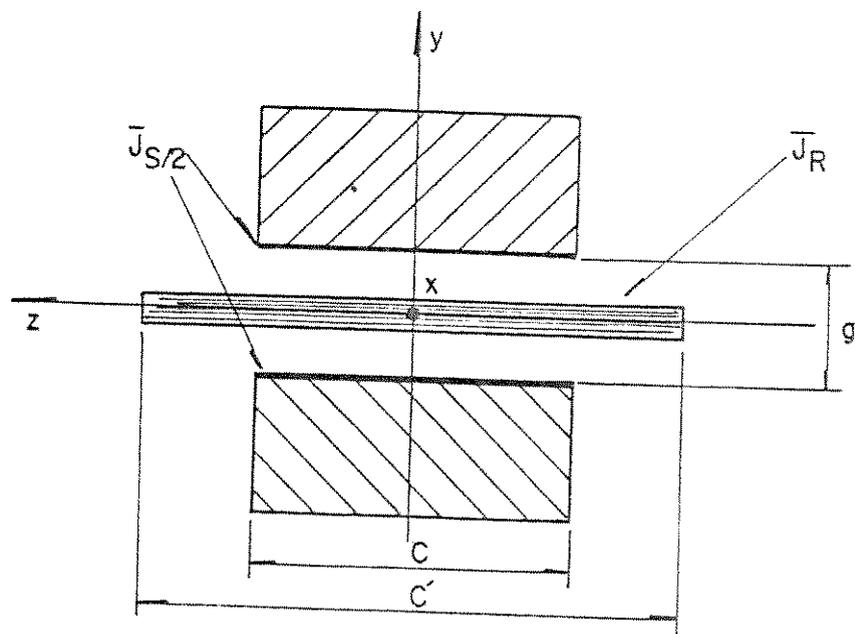


Figura 4.3: Corte Transversal de um CAL de Dupla Face

Segundo C.M.P.Cabrita [6], a distribuição anormal de correntes no linor faz com que a resistividade aparente do mesmo seja não uniforme, exigindo a aplicação de um Fator de Correção para o Efeito Transversal de Borda. Para compensar o aumento de

comprimento das linhas de correntes linóricas, a resistividade volumétrica do mesmo deve ser multiplicada por  $1/K_s$ , onde  $K_s$ , menor do que a unidade, é derivado das pesquisas de Russell e Norsworthy [17], denominado Fator de Correção da Resistividade Linórica e analisado no item 2.6.2, do Capítulo 2.

Como consequência da circulação de correntes induzidas no linor, distorções são produzidas na distribuição do campo magnético no entreferro, seja na preferencial direção x, seja na direção transversal z e estas distorções serão causa de redução do desempenho dos CALs (redução na força propulsora, no rendimento e no fator de potência)

#### 4.2. COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO EM PRESENÇA DO EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

O CAL com modelagem duplo estator curto e linor laminar contínuo é o que melhor desempenho apresenta, principalmente em aplicações onde exija-se velocidade baixa ou intermédia.

Neste modelo, estampado na Figura 4.4, será mantida a hipótese segundo a qual o material de que é feito o linor possui a mesma permeabilidade magnética que o ar. Estando o sistema referencial solidário ao indutor, o linor translada-se na direção do eixo x, com velocidade  $V_{rx}$ . Assume-se que as correntes indutórias e linóricas fluem na direção z, em relação ao sistema referencial referido. A Densidade de Campo Magnético no entreferro é função de x e de t e está orientada na direção y.

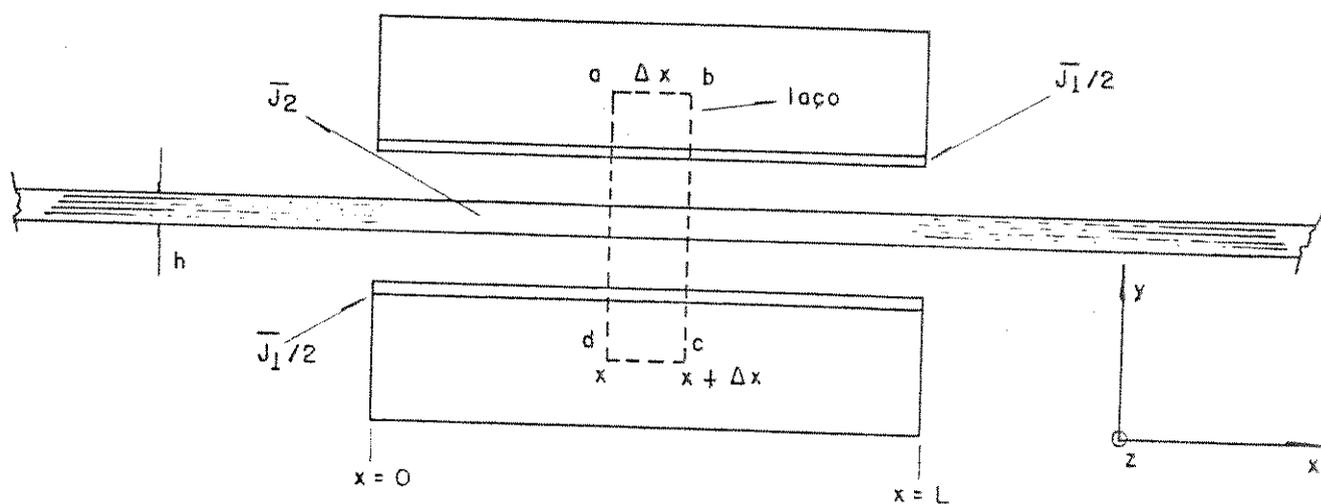


Figura 4.4: Vista Lateral do Conversor Assíncrono Linear

A Lei Circular de Ampère aplicada a campos magnéticos quase-estáticos, permite:

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \sum_{k=1}^n \bar{J}_{s_k} \quad (4.1)$$

Respeitadas as hipóteses levantadas no Capítulo 3, uma análise unidimensional que coloque sob exame o laço fictício abcd, praticado no corte do CAL mostrado na Figura 4.4, fornece:

$$\frac{E}{\mu_0} \cdot \left[ \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \right] = J_s(x,t) + J_r(x,t) \quad (3.15)$$

No Capítulo 3, desenvolveu-se a equação (3.25):

$$\frac{E}{\mu_0} \cdot D^2(y) - \frac{V_{rx}}{\rho_R} \cdot D(y) - \frac{1}{\rho_R} j \omega_s(y) = 0 \quad (3.25)$$

Apresentada como uma equação de 2º grau, homogênea, a coeficientes constantes, e que tem como raízes:

$$y_1 = \frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{2 \cdot E \cdot \rho'_R} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{E \cdot \rho'_R}\right)^2 + 4 \cdot j \cdot \omega_0 \left(\frac{\mu_0}{E \cdot \rho'_R}\right)} \quad (4.2)$$

$$y_2 = \frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{2 \cdot E \cdot \rho'_R} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{E \cdot \rho'_R}\right)^2 + 4 \cdot j \cdot \omega_0 \left(\frac{\mu_0}{E \cdot \rho'_R}\right)}$$

Adotando-se:

$$\sqrt{\left(\frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{E \cdot \rho'_R}\right)^2 + 4 \cdot j \cdot \omega_0 \left(\frac{\mu_0}{E \cdot \rho'_R}\right)} = M + j N$$

e substituindo-se no conjunto de raízes (4.2), obtém-se:

$$y_1 = \frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{2 \cdot E \cdot \rho'_R} - \frac{1}{2} \left[ M + j N \right] \quad (4.3)$$

$$y_2 = \frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{2 \cdot E \cdot \rho'_R} + \frac{1}{2} \left[ M + j N \right]$$

Operando-se as equações (4.3):

$$y_1 = \frac{\mu_0 \cdot V_{RX} - \rho'_R \cdot E \cdot M}{2 \cdot E \cdot \rho'_R} - j \frac{N}{2} = - \frac{1}{a_1} - j b_1 \quad (4.4)$$

$$y_2 = \frac{\mu_0 \cdot V_{RX} + \rho'_R \cdot E \cdot M}{2 \cdot E \cdot \rho'_R} + j \frac{N}{2} = + \frac{1}{a_2} + j b_2 \quad (4.5)$$

Como as raízes são características da equação de uma onda, no caso, uma onda de Densidade de Campo Magnético, pode-se

ainda melhor adequar as respostas encontradas, definindo-se:

$a_1$  = coeficiente de penetração da Onda de Extremidade de Entrada

$a_2$  = coeficiente de penetração da Onda de Extremidade de Saída.

$b_1$  = constante de propagação da Onda de Extremidade

$$a_1 = \frac{2 \cdot \rho'_R \cdot g}{\rho'_R \cdot g \cdot M - \mu_0 \cdot V_{RX}} \quad (4.6)$$

$$a_2 = \frac{2 \cdot \rho'_R \cdot g}{\rho'_R \cdot g \cdot M + \mu_0 \cdot V_{RX}} \quad (4.7)$$

$$b_1 = \frac{N}{2} = \frac{\Pi}{t_{pe}} \quad (4.8)$$

Inserindo-se as raízes na solução da equação (3.25), resulta:

$$b(x,t) = b_s(x,t) + \operatorname{Re} \left[ B_1 \cdot e^{-x/a_1} \cdot e^{j(\omega t - \Pi x/t_{pe} + \delta_1)} \right] + \\ + \operatorname{Re} \left[ B_2 \cdot e^{+x/a_2} \cdot e^{j(\omega t + \Pi x/t_{pe} + \delta_2)} \right] \quad (4.9)$$

A equação (4.9) expressa o comportamento da Densidade de Campo Magnético para valores no intervalo  $0 \leq x \leq p \cdot t_p$  e fora dele. O primeiro termo do segundo membro da equação (4.9) caracteriza a onda normal de Densidade de Campo Magnético no entreferro, a qual viaja em Velocidade Linear Síncrona -  $V_{sx}$ . Os expoentes  $a_1$ ,  $a_2$  e  $t_{pe}$  são elementos positivos. O segundo termo do segundo membro da referida equação caracteriza uma onda que, com decaimento, caminha no mesmo sentido que a onda anteriormente descrita e deno-

mina-se Onda de Extremidade de Entrada. O terceiro termo do segundo membro é uma onda que, nascendo na extremidade de saída do indutor, caminha, com decaimento, no sentido contrário às outras duas e denomina-se Onda de Extremidade de Saída - Figura 4.5.

As velocidades de propagação das Ondas de Extremidades de Entrada e de Saída são iguais e dadas por [4]:

$$V_{EX} = 2 \cdot t_{pe} \cdot f \quad (4.10)$$

As ondas auxiliares explicitadas na equação (4.9), decrescem à medida que caminham e suas respectivas distâncias de penetração são dadas por  $a_1$  e  $a_2$ . As amplitudes  $B_1$  e  $B_2$  das ondas auxiliares são determinadas a partir de duas condições de contorno levando-se em conta, hipóteses anteriormente propostas.

A primeira condição de contorno, é:

$$\int_0^{p \cdot t_p} b(x, t) dx = 0 \quad (4.11)$$

onde  $(p \cdot t_p)$  é o comprimento ideal do indutor, na direção  $x$ .

A segunda condição de contorno é mais complexa e deve ser analisada com maior profundidade. Sabe-se, que [4]:

$$\frac{\delta E_z}{\delta x} = \frac{\delta b(x, t)}{\delta t} + V_{RX} \frac{\delta b(x, t)}{\delta x}$$

e:

$$E_z = \rho'_R \cdot J_R$$

de onde:

$$\frac{\delta E_z}{\delta x} = \rho'_R \cdot \frac{\delta J_R}{\delta x}$$

ou ainda:

$$\rho'_R \cdot \frac{\delta J_R}{\delta x} = \frac{\delta b(x,t)}{\delta t} + V_{RX} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \quad (4.12)$$

Afirma S. Yamamura [8] que, exatamente no fronte da extremidade de entrada, o fluxo magnético cresce rapidamente. Afirma também, que a força eletromotriz variacional, neste ato, é muito menor do que a força eletromotriz mocional:

$$\left[ \frac{\delta b(x,t)}{\delta t} \right] \ll \left[ V_{RX} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \right] \quad (4.13)$$

exceção feita a CALs que operam em velocidades muito baixas. A partir da condição expressa em (4.13), de forma aproximada, escreve-se:

$$\rho'_R \cdot \frac{\delta J_R}{\delta x} \cong V_{RX} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \quad (4.14)$$

ou ainda:

$$\rho'_R \cdot \frac{\delta J_R}{\delta x} \Delta x \cong V_{RX} \cdot \frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \Delta x$$

A partir da definição de diferencial de uma função:

$$\rho'_R \cdot d(J_R) \cong V_{RX} \cdot d[b(x,t)]_{(x=0)} \quad (4.15)$$

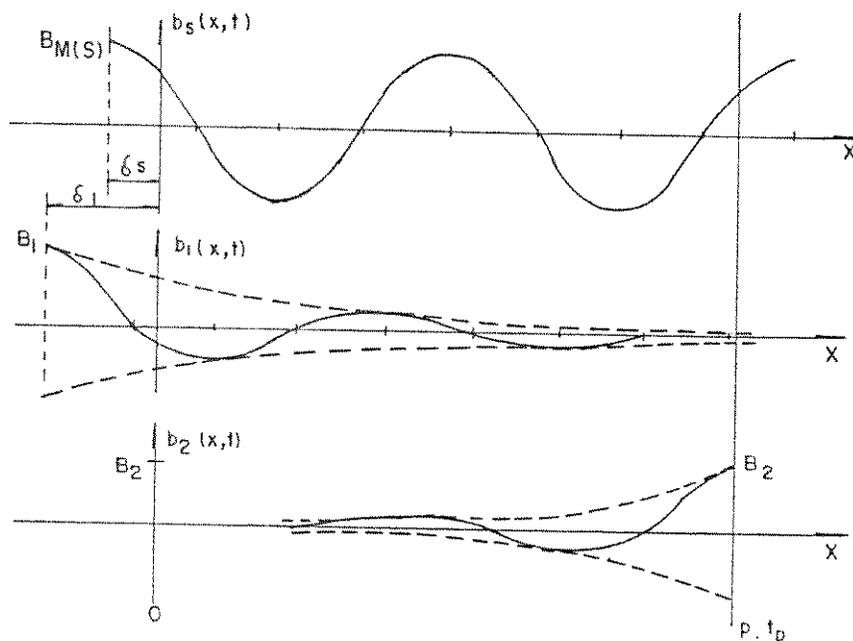


Figura 4.5: Ondas de Densidades de Campos Magnéticos

Se for estabelecido, como condição de contorno, que para  $x = 0^-$  implica em  $J_R(x,t) = 0$ :

$$\rho_R' \cdot \int d(J_R) - V_{RX} \cdot \int d[b(x,t)] \cong 0$$

e:

$$\rho_R' \cdot J_R(x,t) - V_{RX} \cdot b(x,t) + C_4 \cong 0$$

Se forem válidas as hipóteses, que para  $x = 0^-$ ,  $J_R(x,t) = 0$  e  $b(x,t) = 0$ , resulta:

$$\rho_R' \cdot J_R(x,t)_{(x=0^-)} \cong V_{RX} \cdot b(x,t)_{(x=0^-)}$$

(4.16)

$$b(x,t)_{(x=0^-)} \cong \frac{\rho_R'}{V_{RX}} \cdot J_R(x,t)_{(x=0^-)}$$

equações que permitem analisar o comportamento da Densidade de

Campo Magnético na extremidade de entrada da lâmina linórica. Nas vizinhanças da extremidade de entrada, a Densidade de Campo Magnético resultante é relativamente pequena.

A Figura (4.2) mostra o comportamento da Densidade de Campo Magnético ao longo do eixo  $x$ , dentro e fora do entreferro.

#### 4.3. COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO EM PRESENÇA DO EFEITO TRANSVERSAL DE BORDA

O estudo do Efeito Transversal de Borda exige uma análise bidimensional. Se o estudo se desenvolver levando-se em consideração as correntes indutóricas e as linóricas, algumas hipóteses, segundo H. Bolton [11], deverão ser examinadas, para a obtenção das equações de campo, que circundam a análise:

- i) O fluxo magnético, em qualquer região do entreferro, deixa a superfície indutórica e atravessa a lâmina linórica, de forma normal. Esta consideração não é satisfeita quando os dentes das peças indutóricas apresentam grande dispersão de fluxo. Se isto ocorrer, considerações em separado se farão necessárias;
- ii) A permeabilidade magnética das regiões externas ao entreferro e ao corpo magnético do indutor deve ser tomada como igual à permeabilidade magnética do vácuo. Esta hipótese deve, necessariamente, ser efetuada para que o tratamento matemá-

tico seja implementado e implica, também, que as dispersões de fluxo magnético no indutor e nas extremidades da lâmina línórica, não sejam levadas em conta. Caracteriza-se em perigosa simplificação, que somente deve ser executada em presença da elevada relutância magnética do entreferro, elemento quase sempre presente nos CALs;

iii) Toda função empregada no tratamento eletromagnético variará senoidalmente em relação às variáveis tempo ( $t$ ) e espaço ( $x$ ) - direção de deslocamento da lâmina línórica. Para atender à análise presente, o enrolamento indutórico será substituído por uma distribuição de corrente laminar com comportamento senoidal, obedecendo à equação (2.35). Com esta providência, os efeitos indesejáveis das ranhuras e extremidades indutóricas, podem ser negligenciados;

iv) A relutância total apresentada por uma trajetória magnética será creditada, unicamente, ao entreferro. Esta hipótese, comumente aceita para conversores com entreferro de elevada espessura, necessita de cuidadosa análise quando o fluxo magnético atravessar regiões onde existam correntes circulares. O fluxo magnético penetrará no bloco indutor, de forma perpendicular e passará através dos blocos indutores seguindo direções que formam ângulos retos à normal ao plano de

laminação das lâminas dos referidos. As correntes parasitas resultantes, as quais fluem por planos perpendiculares à laminação, forçarão o fluxo magnético a fluir por caminhos próximos à superfície lateral das mesmas e criarão relutância magnética aparente, de valor maior do que a originalmente calculada. Para o caso prático de chapas magnéticas dotadas de resistividade finita, torna-se impossível uma solução analítica. Deve o pesquisador optar entre uma resistividade de valor nulo e uma resistividade de valor tendente para o infinito, para o material de que são feitos os pacotes magnéticos indutóricos. A primeira opção implicará em correntes parasitas de valores tendentes ao infinito e completo amortecimento do fluxo magnético. A segunda opção conduzirá à completa ausência de amortecimento. Medidas de densidade de campo magnético conduzidas por H. Bolton [11] e C.M.P. Cabrita [6], mostraram que a segunda hipótese é a mais condizente com a realidade e será aquela adotada na presente análise.

A Figura (4.6) mostra um CAL cortado transversal e longitudinalmente, dotado de dois indutores curtos dispostos face a face e de uma lâmina linórica de material não magnético e resistividade volumétrica  $\rho_v$ . O entreferro tem espessura  $g$  e o linor tem largura  $C'$ , maior do que a largura  $C$  do indutor. A largura da aba do linor será representada por  $d$ :

$$d = (C' - C)/2 \quad (4.17)$$

O sistema referencial passará para a lâmina linórica e os indutores transladarão com velocidade relativa  $V_{rx}$ , na direção do eixo das abcissas.

O fluxo magnético considerado, atravessa a lâmina linórica de forma normal e tem por expressão:

$$b(x,z,t) = B(z) \cdot A(x,t)$$

$$b(x,z,t) = B(z) \cdot \cos(s \cdot w_s \cdot t - \pi \cdot x / t_p + \delta s) \quad (4.18)$$

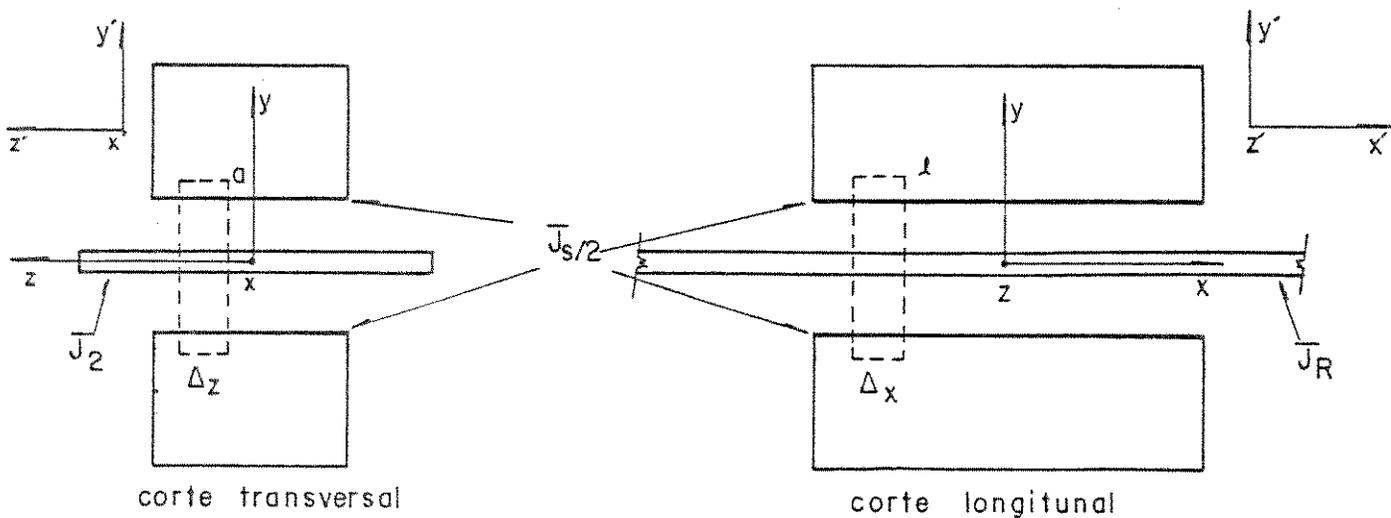


Figura 4.6: Cortes Transversal e Longitudinal praticados no CAL

Aplicando-se ao laço fictício praticado no corte -

transversal o Rotacional à intensidade de campo  $\bar{H}$ , escreve-se:

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \sum_{k=1}^n \bar{J}_{s_k} \quad (4.19)$$

O contorno a praticado no corte transversal do conversor, não se concatena com a Densidade Linear de Corrente  $J_s$  por esta ter, somente, componente na direção  $z$ . Desenvolvendo-se o Rotacional de  $\bar{H}$ , encontra-se:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\delta H_z}{\delta y} - \frac{\delta H_y}{\delta z} \right] \bar{e}_x + \left[ \frac{\delta H_x}{\delta z} - \frac{\delta H_z}{\delta x} \right] \bar{e}_y + \\ & + \left[ \frac{\delta H_y}{\delta x} - \frac{\delta H_x}{\delta y} \right] \bar{e}_z = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left[ J_R \bar{e}_x \right] \end{aligned} \quad (4.20)$$

ou ainda:

$$\left[ \frac{\delta H_z}{\delta y} - \frac{\delta H_y}{\delta z} \right] = \frac{1}{\epsilon} \cdot J_R \quad (4.21)$$

Foi tomado como hipótese que o campo magnético flui de forma perpendicular à lâmina linórica e, assim, a intensidade de campo  $\bar{H}$  apresenta componente somente na direção  $y$ :

$$- \frac{\delta H_y}{\delta z} = \frac{1}{\epsilon} \cdot J_R \quad (4.22)$$

Como o contorno  $a$  inclui somente o entreferro e as regiões condutoras elétricas,  $J_s$  e  $J_R$  (não magnéticas), pode-se escrever:

$$\mu_0 = \frac{b}{H_y} \quad (4.23)$$

$$-\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta b}{\delta z} = J_R \quad (4.24)$$

Por outro lado, a Lei de Faraday para o Eletromagnetismo, permite escrever:

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\delta b}{\delta t} \bar{e}_y \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\delta E_z}{\delta y} - \frac{\delta E_y}{\delta z} \right] \bar{e}_x + \left[ \frac{\delta E_x}{\delta z} - \frac{\delta E_z}{\delta x} \right] \bar{e}_y + \\ & + \left[ \frac{\delta E_y}{\delta x} - \frac{\delta E_x}{\delta y} \right] \bar{e}_z = -\frac{\delta b}{\delta t} \bar{e}_y \end{aligned} \quad (4.26)$$

A equação (4.25) explicita que a Densidade de Campo Magnético, que se está pesquisando, está dirigida, tão somente, na direção  $y$ , isto é, pesquisa-se a componente de campo que atravessa, de forma normal, a lâmina linórica. A esta componente denominar-se-á  $b$ , unicamente. Inspeccionando-se a equação (4.26), obtém-se:

$$\left[ \frac{\delta E_x}{\delta z} - \frac{\delta E_z}{\delta x} \right] = -\frac{\delta b}{\delta t} \quad (4.27)$$

equação de primacial importância para o presente estudo, porque permite avaliar o comportamento bidimensional da Densidade de Campo Magnético, a partir da análise do comportamento das correntes induzidas na lâmina linórica, segundo os eixos  $x$  e  $z$ , que pertencem ao plano paralelo à mesma.

A corrente que atravessa o contorno  $a$ , corrente esta representada por uma lâmina de corrente de densidade linear  $J_R$ , o

faz na direção do eixo  $x$ , de forma a permitir escrever:

$$E_x = \rho'_R \cdot J_R \quad (4.28)$$

onde  $\rho'_R$  é a resistividade superficial do material de que é feita a lâmina linórica e  $J_R$ , sua densidade linear de corrente.

Levando-se a equação (4.28) à equação (4.24), obtém-se:

$$-\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta b}{\delta z} = \frac{E_x}{\rho'_R} \quad (4.29)$$

de onde:

$$E_x = -\frac{g}{\mu_0} \cdot \rho'_R \cdot \frac{\delta b}{\delta z} \quad (4.30)$$

Aplicando-se ao laço fictício  $L$ , praticado no corte longitudinal do conversor, o Rotacional à Intensidade de Campo  $\bar{H}$ :

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \sum_{k=1}^n \bar{J}_{s_k} \quad (4.31)$$

onde  $J_{s_k}$  é a densidade superficial de corrente. Examinando-se o laço fictício  $L$ , escreve-se:

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \frac{1}{g} \left[ J_s + J_R \right] \bar{e}_z \quad (4.32)$$

$$\left( \frac{\delta H_z}{\delta y} - \frac{\delta H_y}{\delta z} \right) \bar{e}_x + \left( \frac{\delta H_x}{\delta z} - \frac{\delta H_z}{\delta x} \right) \bar{e}_y +$$

$$+ \left[ \frac{\delta H_y}{\delta x} - \frac{\delta H_x}{\delta y} \right] \bar{e}_z = \frac{1}{g} \left[ J_S + J_R \right] \bar{e}_z \quad (4.33)$$

onde:

$$\left[ \frac{\delta H_y}{\delta x} - \frac{\delta H_x}{\delta y} \right] = \frac{1}{g} \left[ J_S + J_R \right] \quad (4.34)$$

Como a pesquisa está voltada para a componente que atravessa, de forma normal, a lâmina linórica, resulta:

$$\frac{\delta H_y}{\delta x} = \frac{1}{g} \left[ J_S + J_R \right] \quad (4.35)$$

Como os laços fictícios traçados não enlaçam regiões ferromagnéticas, pode-se definir:

$$\mu_0 = b(x,t)/H_y$$

e:

$$\frac{\delta b}{\delta x} = \frac{\mu_0}{g} \left[ J_S + J_R \right] \quad (4.36)$$

Uma espira fictícia praticada sobre a lâmina linórica, move-se com velocidade  $V_{Rx}$  em relação a um ponto estacionado no indutor. Como o campo magnético que atravessa o linor, é variável no tempo, a espira fictícia fica submetida a forças eletromotrizes mocionais e variacionais. Assim, o Rotacional aplicado à Intensidade de Campo Elétrico  $E$ , fornece [4]:

$$\left[ \frac{\delta E_z}{\delta y} - \frac{\delta E_y}{\delta z} \right] \bar{e}_x + \left[ \frac{\delta E_x}{\delta z} - \frac{\delta E_z}{\delta x} \right] \bar{e}_y +$$

$$+ \left[ \frac{\delta E_y}{\delta x} - \frac{\delta E_x}{\delta y} \right] \bar{e}_z = - \left[ \frac{\delta b}{\delta t} + \frac{\delta b}{\delta x} \cdot V_{RX} \right] \bar{e}_y \quad (4.37)$$

Uma inspeção ao laço fictício praticado no corte longitudinal do conversor mostra que as forças eletromotrizes envolvidas atuam na direção do eixo z. Assim:

$$- \frac{\delta E_z}{\delta x} = - \left[ \frac{\delta b}{\delta t} + \frac{\delta b}{\delta x} \cdot V_{RX} \right] \quad (4.38)$$

Como o linor é um circuito elétrico fechado sobre si mesmo:

$$E_z = \rho'_R \cdot J_R \quad (4.39)$$

Da expressão (4.36), obtém-se:

$$J_R = \frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta b}{\delta x} - J_S$$

e:

$$\frac{E_z}{\rho'_R} = \frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta b}{\delta x} - J_S \quad (4.40)$$

Remanejando a equação (4.40):

$$E_z = \frac{\rho'_R \cdot g}{\mu_0} \cdot \frac{\delta b}{\delta x} - \rho'_R \cdot J_S \quad (4.41)$$

Derivando as equações (4.30) e (4.41) em relação a z e a x, respectivamente, resulta:

$$\frac{\delta E_x}{\delta z} = - \frac{E}{\mu_0} \cdot \rho'_R \cdot \frac{\delta^2 b}{\delta z^2} \quad (4.42)$$

$$\frac{\delta E_z}{\delta x} = \frac{\rho'_R \cdot E}{\mu_0} \cdot \frac{\delta^2 b}{\delta x^2} - \rho'_R \frac{\delta J_s}{\delta x} \quad (4.43)$$

Transportando as equações (4.42) e (4.43) para a equação (4.27), resulta:

$$\frac{\rho'_R \cdot E}{\mu_0} \left[ \frac{\delta^2 b}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 b}{\delta z^2} \right] - \rho'_R \frac{\delta J_s}{\delta x} = \frac{\delta b}{\delta t}$$

ou ainda:

$$\left[ \frac{\delta^2 b}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 b}{\delta z^2} \right] - \frac{\mu_0}{\rho'_R \cdot E} \cdot \frac{\delta b}{\delta t} = \frac{\mu_0}{E} \cdot \frac{\delta J_s}{\delta x} \quad (4.44)$$

Todas as quantidades adotadas, são assumidas como variando senoidalmente em  $x$  e em  $t$  e a Densidade de Campo Magnético, em seu valor instantâneo e em regime, é dada, por:

$$b(x, z, t) = B(z) \cdot \cos(s \cdot \omega_s \cdot t - \Pi \cdot x / t_p + \delta s) \quad (4.19)$$

sendo  $B(z)$  uma função da variável  $z$ , somente.

A função Densidade Linear de Corrente  $-J_s(x, t)-$ , foi definida no Capítulo 2. Estando a referência na lâmina linórica, escreve-se:

$$J_s(x, t) = J_M \cos(s \cdot \omega_s \cdot t - \Pi \cdot x / t_p) \quad (4.45)$$

Transportando-se as equações (4.18) e (4.45) para a equação (4.44), obtém-se:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta^2 b}{\delta z^2} + (\Pi/t_p)^2 \cdot \text{Re} \left[ B(z) \cdot e^{j(s \cdot w_s \cdot t - \pi x/t_p + \delta s)} \right] + \\ & - \frac{\mu_0}{\rho_R' \cdot \epsilon} \cdot j \cdot w_s \cdot s \cdot \text{Re} \left[ B(z) \cdot e^{j(s w_s t - \pi x/t_p + \delta s)} \right] = \\ & = - \frac{\mu_0}{\epsilon} \cdot j \cdot (\Pi/t_p) \cdot \text{Re} \left[ J_M \cdot e^{j(s \cdot w_s \cdot t - \pi x/t_p)} \right] \end{aligned} \quad (4.46)$$

ou ainda:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta^2 b(x,z,t)}{\delta z^2} + (\Pi/t_p)^2 \cdot b(x,z,t) - \frac{\mu_0 \cdot s}{\rho_R' \cdot \epsilon} \cdot j \cdot w_s \cdot b(x,z,t) = \\ & - \frac{\mu_0}{\epsilon} \cdot j \cdot (\Pi/t_p) \cdot J_s(x,t) \end{aligned} \quad (4.47)$$

Definindo-se:

$$k = \Pi/t_p \quad (4.48)$$

escreve-se:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta^2 b(x,z,t)}{\delta z^2} + \left[ k^2 - \frac{\mu_0 \cdot s}{\rho_R' \cdot \epsilon} \cdot j \cdot w_s \right] b(x,z,t) = \\ & = - \frac{\mu_0}{\epsilon} \cdot j \cdot k \cdot J_s(x,t) \end{aligned} \quad (4.49)$$

que caracteriza uma equação de segunda ordem, não homogênea. Segundo H. Bolton [11], a solução da equação (4.49) admite para  $B(z)$ , a expressão:

$$B(z) = -j \frac{\mu_0}{g \cdot k} \cdot J_m \cdot \eta^2 \left[ 1 + \frac{(1 - \eta^2)}{\eta^2} \cdot \lambda \cdot \frac{\cosh(\beta \cdot z)}{\cosh(\beta \cdot a)} \right] \quad (4.50)$$

com:

$$\lambda = \left[ 1 + 1/\eta \cdot \operatorname{tgh}(\beta \cdot a) \cdot \operatorname{tgh}(k \cdot d) \right]^{-1} \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned} \beta^2 &= k^2 + j \cdot \left[ \frac{w_s \cdot \mu_0 \cdot s}{\rho_R \cdot g} \right] = \\ &= k^2 \left[ 1 + j \cdot s \cdot G_L \right] \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$G_L = \frac{\mu_0 \cdot w_s \cdot t_p^2}{\rho_R \cdot \Pi^2 \cdot g} \quad (4.53)$$

que caracteriza o Fator de Qualidade, segundo Laithwaite [13].

$$\eta^2 = 1 / (1 + j \cdot s \cdot G_L) \quad (4.54)$$

onde C e a são parâmetros vinculados à largura frontal do indutor e da lâmina linórica, como mostra a Figura 4.7.

Da Figura 4.7:

$$a = C/2 \quad e \quad d = \frac{C' - C}{2}$$

No estudo e busca de um modelo de fácil compreensão

para os CALs, pode-se, como uma alternativa, empregar-se um circuito elétrico equivalente diferenciado do circuito elétrico do conversor rotativo e onde os Efeitos de Extremidades são considerados. A reatância de magnetização e a resistência equivalente  $R'_2/s$  são afetadas pelo Efeito Transversal de Borda [11].

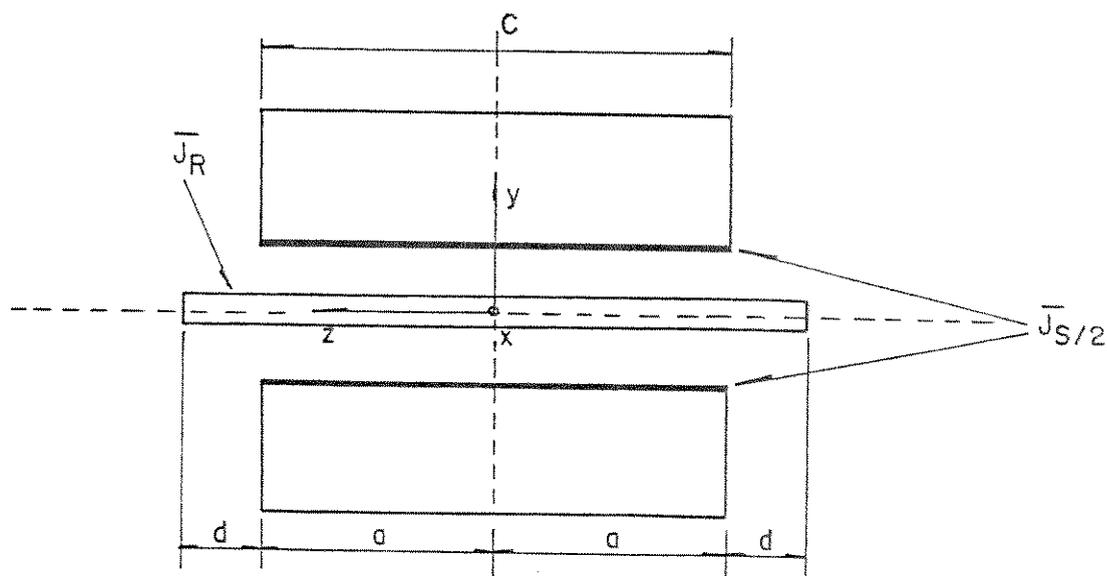


Figura 4.7: Vista Frontal de um Conversor Assíncrono Linear

A referência [10] propõe um Circuito Elétrico Equivalente dotado de um ramo adicional, introduzido para compensar o Efeito Longitudinal de Extremidade.

#### 4.4. CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES DE BAIXA E DE ALTA VELOCIDADES

##### 4.4.1. INTRODUÇÃO

Com relação à velocidade linórica, os CALs são classificados, por muitos autores, em dois grupos: Conversores de

Baixa e de Alta Velocidades. Para implementar a divisão, Yamamura [4] empregou a equação (4.55).

$$NR = \left[ \left[ \mu_0 \cdot V_{RX}^2 \right] \cdot \left[ 4 \cdot w_s \cdot \rho_R \cdot g \right]^{-1} \right] \quad (4.55)$$

Se NR for menor do que a unidade, o conversor é dado como de Baixa Velocidade; se NR for muito maior do que a unidade, o referido é classificado como de Alta Velocidade. Não existe, porém, um lugar estabelecido para conversores cujo número NR seja igual ou pouco maior do que a unidade. A preocupação dos autores com relação à classificação está em buscar diferenciar o comportamento e as características dos conversores, em presença do Efeito Longitudinal de Extremidade.

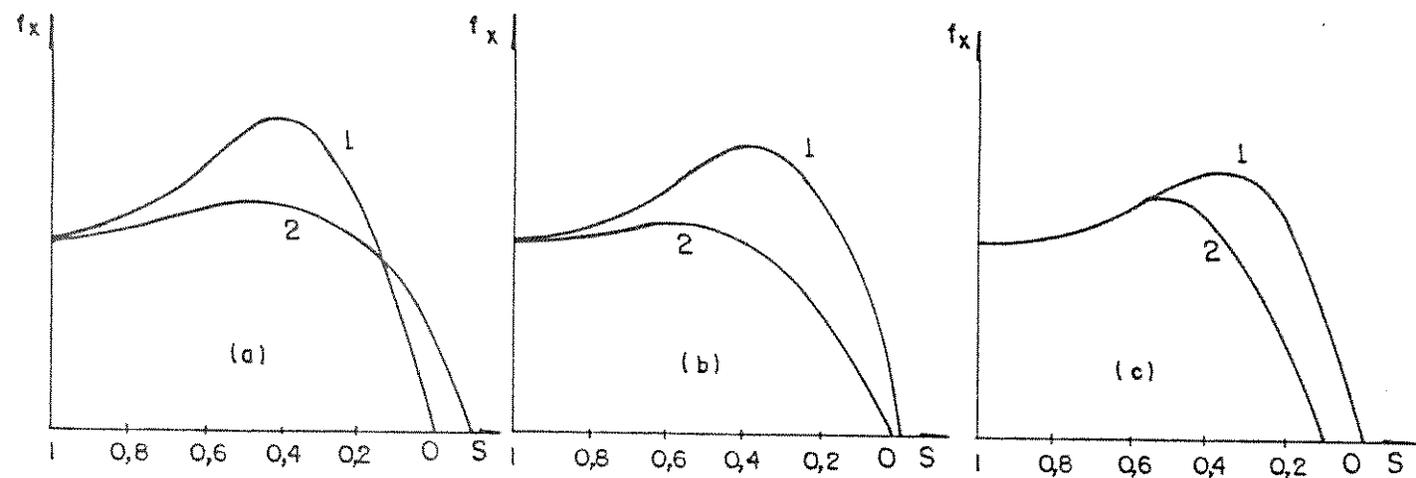
Em conversores de Alta Velocidade, a penetração da Onda de Efeito de Extremidade de Entrada é muito maior do que em conversores de Baixa Velocidade, o que influencia o desempenho dos mesmos. Providências diferentes devem ser tomadas quando do desenvolvimento de um projeto. A partir da equação (4.55), pode-se observar que a resistividade superficial  $\rho_R$  e a espessura equivalente do entreferro  $g$ , são elementos essenciais no comportamento da função NR. Pode-se, também, constatar que os elementos acima mencionados atuam diretamente nas funções  $a_1$  e  $a_2$ , que caracterizam profundidade de penetração das Ondas de Efeito Longitudinal de Extremidade, como mostram as equações (4.6) e (4.7). A espessura  $g$  do entreferro e a resistividade superficial  $\rho_R$  do linor afetam o comprimento de penetração da Onda de Efeito de Extremidade de Entrada [4].

É importante ressaltar que em CALs de Baixa Velocidade, a Onda de Efeito de Extremidade atenua rapidamente e sua influência, no desempenho dos mesmos, é comparativamente menor. Contrariamente, nos CALs de Alta Velocidade, a Onda de Efeito de Extremidade atenua mais lentamente e sua influência no desempenho dos referidos, é maior.

#### 4.4.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS

A Figura 4.8 mostra comportamentos de CALs de Baixa e Alta velocidades. A curva característica Força Propulsora versus Escorregamento, mostrada em 4.8(a), é típica de CALs de Baixa Velocidade. Nestes, o Efeito de Extremidades reduz a força propulsora na região de elevados escorregamentos e eleva a mesma, na região de baixos escorregamentos. Além disto, força propulsora positiva é encontrada quando o linor está trafegando com velocidade igual a de sincronismo. A curva mostrada em 4.8(c), é típica de conversores de Alta Velocidade. Nestes, na região de altos escorregamentos, o Efeito de Extremidades pouco afeta a força propulsora, enquanto que, na região de baixos escorregamentos, o referido efeito tem considerável influência sobre a mesma.

A Figura 4.8(b) mostra uma curva característica típica, onde o Efeito de Extremidades afeta a força propulsora sobre toda a região de operação do conversor, operando como motor.



- 1 - não levando em conta os efeitos de extremidades  
 2 - considerando os efeitos de extremidades

- a - conversores de baixa velocidade  
 b - conversores de velocidade intermédia  
 c - conversores de alta velocidade

Figura 4.8: Curvas Características -  $f_x = f_x(s)$

Pode-se observar nas curvas características apresentadas que, para escorregamento igual à unidade, existe concordância entre as curvas (1) e (2). Isto foi observado e confirmado pela referência [23], em experiências realizadas. Esta concordância muito ajuda ao pesquisador, pois permite a análise dos parâmetros teóricos e práticos quando do projeto e testes dos conversores.

Outras curvas características, tais como Fator de

Potência x Escorregamento e Rendimento x Escorregamento são importantes para a análise dos CALs e serão tratadas em outro capítulo deste trabalho.

#### 4.4.3. A INFLUÊNCIA DO ENTREFERRO NO COMPORTAMENTO DOS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

Parece ser indutivo que o desempenho pobre de um CAL é devido, em grande parte, à elevada espessura do seu entreferro. Na verdade, o entreferro de um CAL pode ser de 40 a 50 vezes maior do que o entreferro de um CAR. Um grande entreferro aumenta a corrente de excitação e influe, de forma negativa, no valor do fator de potência e no do rendimento. Na atualidade, muitos autores tem analisado esse problema e efetuado propostas para elevar o produto Rendimento x Fator de Potência dos CALs. Um dos caminhos propostos, passa pela busca de um 'fator de qualidade ótimo', analisado por Boldea e Nasar no trabalho "Optimum Goodness Criterion For Linear Induction Motor Design" [16].

Contrariando, em parte, a acersiva acima, o baixo fator de potência e o baixo rendimento estão fundamentalmente ligados aos Efeitos de Extremidades. Em CALs onde os referidos efeitos são minimizados por meio de enrolamentos compensadores, mantidas as espessuras dos entreferros em valores elevados, - Yamamura obteve fatores de potência semelhantes aos dos conversores rotativos.

#### 4.4.5. CONSIDERAÇÕES

O método de classificar os CALs, quanto a velocidade, a partir da equação (4.55), proposto por Yamamura, apesar de altamente científico, é muito trabalhoso. Boldea e Nasar, na obra "Linear Motion Electromagnetic Systems" [9], explicitam que os CALs de Baixa Velocidade tem características muito diferentes dos de Alta Velocidade. Por esta razão, eles devem ser analisados em separado. Por Baixa Velocidade designam os CALs que operam com Velocidade Linear Síncrona inferior a 10 m/s. Em bem projetados CALs de Baixa Velocidade, os Efeitos de Extremidades podem ser negligenciados [9] ( experiências desenvolvidas com CAL dotado de Velocidade Linear Síncrona igual a 15 m/s, mostraram que os referidos efeitos são muito atuantes).

#### 4.5. CONCLUSÕES

Este Capítulo tratou de trazer para o corpo do trabalho, uma visão eletromagnética dos fenômenos, ressaltando sempre que os Efeitos de Extremidades atuam de forma marcante sobre o desempenho dos CALs. É motivo de preocupação para o projetista destes conversores a influência destes e de outros fenômenos que, por operarem com indutores fechados, os CARs convencionais não apresentam. Pesquisadores renomados, como Laithwaite e Yamamura, estudaram os fenômenos que cercam aqueles conversores e ofereceram ferramentas notáveis para o estudo dos mesmos. Cabe ao pesquisador compreender toda a gama de fenômenos envolvidos, analisar sua maior ou menor importância e priorizar aqueles que podem conduzir ao desenvolvimento do CAL desejado. Deve analisar todos e voltar-se para os fenômenos que, para um determinado projeto, tem maior comprometimento.

## CAPÍTULO 5

UM CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA OS  
CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

## 5.1. INTRODUÇÃO

Este Capítulo tem por objetivo estabelecer as considerações e hipóteses necessárias para o desenvolvimento de um Circuito Elétrico Equivalente que possa simular a operação de CALs, levando-se em consideração as particularidades desta família de conversores. Considera-se, ao longo de todo o estudo, que o conversor está parado ou está operando em regime, que os transitórios de partida já foram superados e que as cargas aplicadas ao eixo mecânico do mesmo não estão sujeitas a variações bruscas. Para obter-se um conjunto de forças que leve a parte móvel do conversor a transladar-se, é necessário fazer fluir pelo enrolamento do indutor correntes elétricas alternadas senoidais e, para o presente estudo, defasadas entre si de  $120^\circ$ . As forças eletromotrizes induzidas na lâmina linórica farão circular por esta, correntes elétricas induzidas que produzirão um campo magnético que, reagindo com o Campo Magnético de Translação, gerarão forças propulsoras que movimentarão a parte móvel do conversor.

À medida que estas forças atuam, a velocidade de translação do membro móvel -  $V_{rx}$  - aumenta, reduzindo a intensida-

de da velocidade relativa da lâmina linórica em relação ao referido campo magnético. Conseqüentemente, as forças eletromotrizes induzidas no linor e as correspondentes correntes elétricas, diminuem de intensidade e de frequência. O processo de aceleração do linor continua até que o mesmo alcance velocidade tal que as correntes induzidas, em interação com o Campo Magnético de Transação, produzam forças propulsoras que se equilibram com as forças mecânicas resistentes, ficando este a transladar-se com velocidade  $V_{Rx}$ , constante.

À semelhança dos conversores assíncronos rotativos, os CALs possuem um comportamento  $f_x \times V_{Rx}$ , que pode ser observado na Figura 5.1.

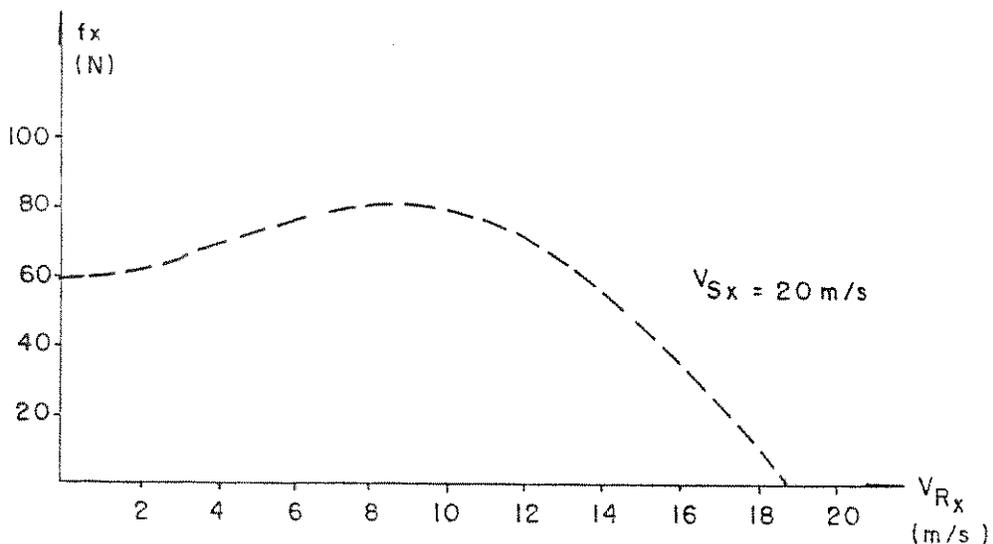


Figura 5.1: Comportamento da Força Propulsora em Relação à Velocidade de Translação do Linor

Dado o Princípio da Reversibilidade aplicado aos conversores, a operação como motor denota escorregamento positivo e definido no intervalo:

$$0 \leq s \leq 1$$

## 5.2. CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA OS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

### 5.2.1. ASPECTOS GERAIS

O Circuito Elétrico Equivalente de um conversor assíncrono rotativo pode ser empregado para simular a operação dos CALs, desde que sejam resguardadas as presenças dos Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda. Um preciso conhecimento das grandezas relativas dos parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente frequentemente auxilia no estudo do conversor, dado que alguns desses parâmetros, em casos específicos, podem ser desprezados, como, por exemplo, a reatância de dispersão da lâmina linórica. Na maioria dos CALs que operam com linor laminar, o fluxo de dispersão na referida lâmina é tão pequeno que a reatância de dispersão correspondente pode ser desprezada, quando comparada com a do indutor. Se as perdas nos núcleos de ferro dos indutores puderem ser desprezadas, grande simplificação poderá ser introduzida no equacionamento do modelo, porém esta possibilidade não será adotada neste trabalho.

A existência de um Circuito Elétrico Equivalente que possa auxiliar na compreensão da operação dos CALs, mesmo com relativas restrições e certas limitações, é sempre desejável, podendo caracterizar-se em precioso auxiliar para o traçado e obtenção de curvas características para a força propulsora, para o

rendimento, para o fator de potência, entre outras. Como o conversor em estudo é um ente polifásico, o circuito equivalente a ser empregado é calcado sobre o modelo 'por fase', independente de como estejam conectadas as portas elétricas do indutor.

A Figura 5.2 estampa o Circuito Elétrico Equivalente que, como afirma a referência [9], simula a operação dos CALs, desprezados os Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda.

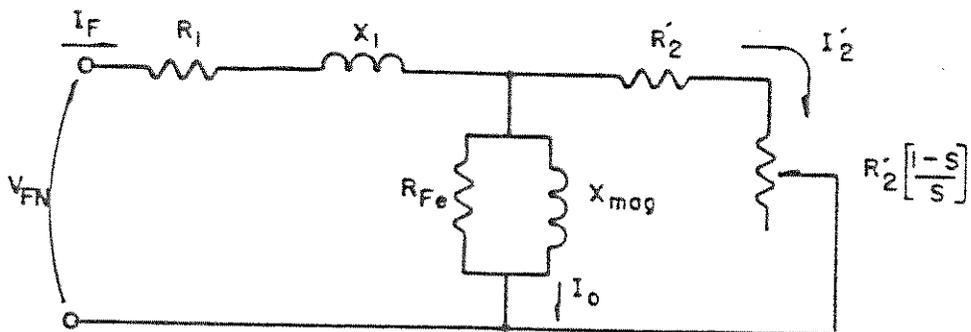


Figura 5.2: Circuito Elétrico Equivalente de um CAL, desconsiderando os Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda.

Do circuito da Figura 5.2, escreve-se:

$$R'_2 + R'_2 \cdot \left[ \frac{1-s}{s} \right] = R'_2 / s \quad (5.1)$$

O segundo elemento do primeiro membro da equação (5.1) representa a resistência de um resistor fictício, que é

proporcional à potência ativa desenvolvida pelo conversor, referida ao modelo 'por fase'.

$$P = R'_{2} \cdot \left[ \frac{1 - s}{s} \right] \cdot (I'_{2})^2 \quad (5.2)$$

Como o conversor em análise é trifásico, a potência elétrica convertida para a forma mecânica, é expressa por:

$$P_E = 3 \cdot R'_{2} \cdot \left[ \frac{1 - s}{s} \right] \cdot (I'_{2})^2 \quad (5.3)$$

Da mecânica, escreve-se:

$$P_E = f_{XT} \cdot V_{RX} = f_{XT} \cdot V_{SX} \cdot (1 - s) \quad (5.4)$$

Associando-se (5.3) e (5.4), resulta:

$$f_{XT} = \frac{3}{V_{SX}} \cdot \left[ \frac{R'_{2}}{s} \right] \cdot (I'_{2})^2 \quad (5.5)$$

equação que permite o cálculo da Força Propulsora Teórica que atua em um CAL de três portas elétricas de entrada, desconsiderando os Efeitos de Extremidades. Num CAR, o Circuito Elétrico Equivalente mostrado na Figura (5.2) consegue simular a força propulsora e o conjugado eletromagnético, porque estes conversores, quando dotados de rotores convencionais, não apresentam variação nos parâmetros do referido circuito, numa ampla faixa de escorregamento. Nos CALs, diversos parâmetros estão fortemente associados ao escorregamento e, desta forma, sofrem variações dentro da faixa normal de operação. Muitos pesquisadores estudaram o comportamento dos parâmetros de circuitos elétricos e alguns como Bolton, Russell, -

Norsworthy e Gieras propuzeram Fatores Corretores para compensação dos Efeitos de Extremidades.

### 5.2.2. FATORES CORRETORES DE BOLTON

No Capítulo 4, item 4.3, estudou-se o comportamento da Densidade de Campo Magnético no entreferro, em presença do Efeito Transversal de Borda. As equações de campo são importantes para a determinação do comportamento do conversor, em presença dos Efeitos de Extremidades.

Como será empregado um Circuito Elétrico Equivalente apropriado para simular o comportamento dos CALs, alguns dos parâmetros básicos do referido circuito sofrerão a influência dos mencionados efeitos. A reatância de magnetização do Circuito Elétrico Equivalente do CAL deve ser multiplicada por um fator -  $K_s$  - menor ou, no máximo, igual à unidade e calculado segundo [11]:

$$K_s = K_x \left[ \frac{1 + s^2 G_L^2 K_R^2 / K_x^2}{(1 + s^2 \cdot G_L^2)} \right] \quad (5.6)$$

A resistência equivalente  $R'/s$  (referida ao circuito do indutor), deve ser multiplicada por um fator específico -  $K_R$  - maior do que a unidade:

$$K_R = \frac{K_x^2}{K_R} \left[ \frac{1 + s^2 G_L^2 \cdot K_R^2 / K_x^2}{(1 + s^2 \cdot G_L^2)} \right] \quad (5.7)$$

Os fatores intermediários  $K_x$  e  $K_R$ , são calculados a partir de:

$$K_R = 1 - R_e \left[ (1 - j.s.G_L) \cdot \frac{\lambda}{a.\beta} \cdot \operatorname{tgh}(a.\beta) \right] \quad (5.8)$$

$$K_x = 1 + R_e \left[ (s.G_L + j) s.G_L \cdot \frac{\lambda}{a.\beta} \cdot \operatorname{tgh}(a.\beta) \right] \quad (5.9)$$

sendo  $\lambda$  e  $\beta$  calculados segundo as equações (4.51) e (4.52), respectivamente. O elemento  $a$  é a semi-largura do indutor:

$$a = C/2 \quad (5.10)$$

O fator  $K_s$ , multiplicador da reatância de magnetização, calculado pela referência [23] para um conversor de dupla face magnética e mono face elétrica, teve o comportamento mostrado na Figura 5.3(a). O fator  $K_r$ , multiplicador da resistência equivalente de secundário, é maior, (no mínimo igual) à unidade e varia com o escorregamento. Para o conversor retro referido, tem o comportamento mostrado na Figura 5.3(b). Portanto, os parâmetros  $\bar{X}_{mag}$  e  $\bar{R}'_2$ , ganham nova expressão:

$$\bar{X}_{mag}(s) = X_{mag} \cdot K_s \quad (5.11)$$

$$\bar{R}'_2(s) = R'_2 \cdot K_r \quad (5.12)$$

Os fatores  $K_s$  e  $K_r$  serão referidos, ao longo deste trabalho, como Fatores Corretores de Bolton e corrigem a influência do Efeito Transversal de Borda, sobre o desempenho do conversor.

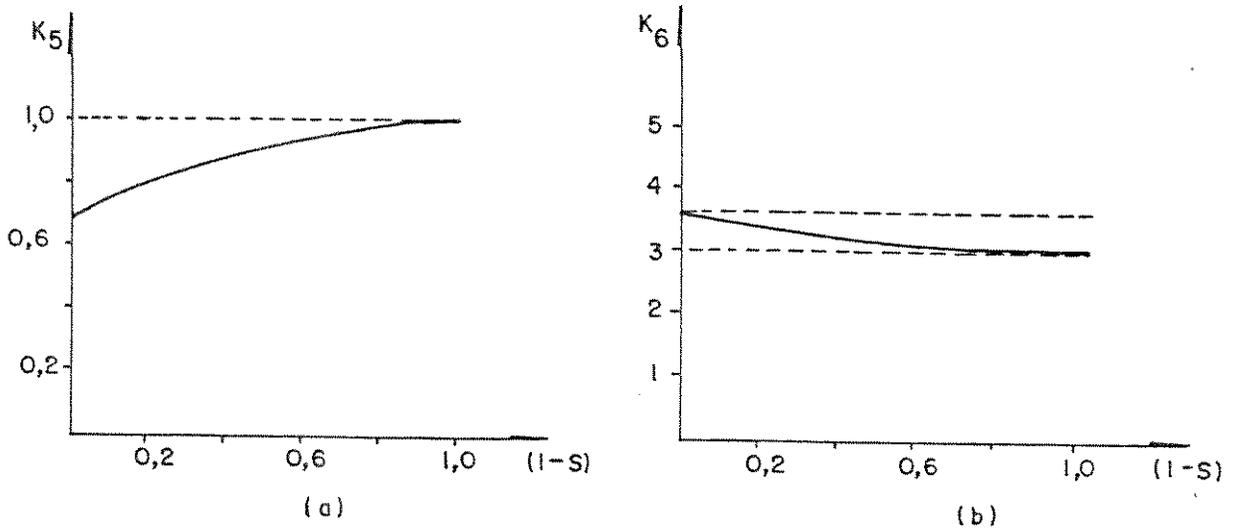


Figura 5.3: Comportamento dos Fatores Corretores  $K_5$  e  $K_6$

Bolton [11], explicita:

O fator  $K_6$  "não foi impresso no artigo porque foi encontrado, para uma larga gama de parâmetros, ser ele, numericamente, muito próximo do fator equivalente  $1/K_5$ , derivado na referência" [17] e a avaliação de  $K_5$ , é feita a partir de:

$$K_5 = 1 - \left[ \frac{\operatorname{tgh}(e_x)}{e_x (1 + \operatorname{tgh}(e_x) \cdot \operatorname{tgh}(e_y))} \right] \quad (2.17)$$

com:

$$e_x = \frac{C \cdot \Pi}{2 \cdot t_p} \quad e \quad e_y = \frac{\Pi \cdot d}{t_p}$$

Na Figura 5.4 apresenta-se os Fatores Corretores  $K_5$  e

$1/K_s$ , calculados com os parâmetros do conversor ensaiado para este trabalho, usando-se  $g = 10$  mm.

### 5.2.3. FATOR CORRETOR DE RUSSELL E NORSWORTHY

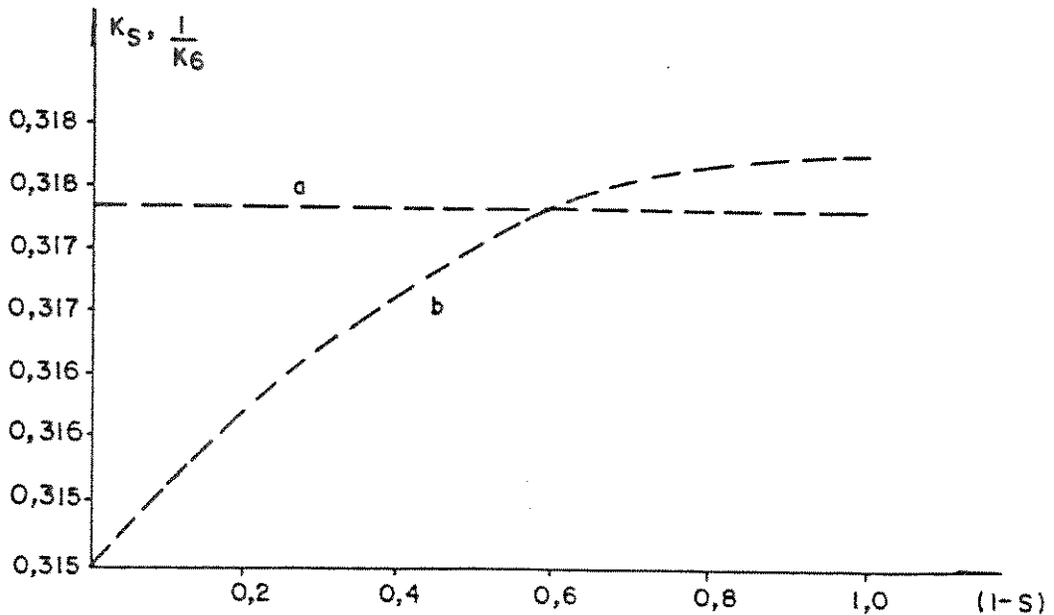
No Capítulo 2, apresentou-se o Fator Corretor de Russell - Norsworthy, de forma rápida, como um corretor da resistividade  $\rho_R$  da lâmina linórica. Os referidos pesquisadores, trabalhando com conversores assíncronos rotativos, investigaram o comportamento destes fatores (operando com rotores cilíndricos laminares e rotores de barras, dotados de aneis de curto circuito) e concluíram que a não existência dos aneis de curto circuito (aneis de resistência desprezível) nos rotores laminares trazia problemas para o desempenho dos conversores. Desta forma, estava caracterizada a presença do que, posteriormente, se denominou Efeito Transversal de Borda. O referido efeito não está presente somente nos CALs de lâmina móvel e sim em todos os conversores que operam com rotores laminares ou seja, dotados de lâminas linóricas ou rotóricas. Os pesquisadores nominados desenvolveram diversas equações para a compensação da presença do mencionado efeito e propuseram a utilização de um Fator Corretor para a compensação do mesmo -  $K_s$ .

Como Russell trabalhou com CARs de indutor contínuo, não observou ou analisou qualquer fator que pudesse interferir, na reatância de magnetização. Para o conversor estudado na referência [23], o Fator Corretor de Russell, resultou em:

$$K_s = 0,3176$$

Para o Fator Corretor de Bolton -  $K_s$  -, encontrou-se o comportamento mostrado na Figura (5.4). Observar que:

$$K_s \cong \frac{1}{K_s} \quad (5.13)$$



curva a: Comportamento do Fator Corretor  $K_s$

curva b: Comportamento do Fator Corretor  $K_s$

Figura 5.4: Comportamento dos Fatores Corretores de Russell e de Bolton

#### 5.2.4. A PRESENÇA DO EFEITO TRANSVERSAL DE BORDA NOS CALs

Desde que o linor seja laminar e de espessura constante, o Efeito Transversal de Borda se faz presente. Os Fatores Corretores de Bolton -  $K_s$  - e de Russell-Norsworthy -  $K_s$  -, atuam diretamente na resistência equivalente -  $R'z$  - elevando o seu valor. Desenvolvendo-se a expressão de  $R'z$ , constata-se que se pode, de maneira imprópria, dizer que o Efeito Transversal de

Borda afeta a resistividade volumétrica do material de que é feito o linor:

$$\rho'_v = \frac{\rho_v}{K_s} \quad (5.14)$$

ou:

$$\rho'_v = \rho_v \cdot K_s \quad (5.15)$$

Desta forma, traz-se para dentro do Circuito Elétrico Equivalente dos CALs, a presença do Efeito Transversal de Borda. A resistência  $R'z$  do referido circuito, mostrada na Figura 5.2, é alterada, para:

$$\bar{R}'z = R'z \cdot K_s \quad (5.16)$$

ou:

$$\bar{R}'z = R'z / K_s \quad (5.17)$$

O pesquisador deverá analisar a ambos os fatores e decidir-se pelo que melhor comportamento apresente, para o seu específico projeto. Segundo Bolton [11], a reatância de magnetização também é afetada pela presença do Efeito Transversal de Borda e o autor demonstra expressão para a correção da referida:

$$\bar{X}_{mag} = X_{mag} \cdot K_s \quad (5.18)$$

Para o conversor testado pela referência [23], o Fator Corretor  $K_s$ , teve o comportamento mostrado na Figura (5.5).

Se o pesquisador optar pelos Fatores Corretores de Bolton ( $K_s$  e  $K_c$ ), a resistência equivalente  $\bar{R}'_2$  e a reatância de magnetização  $\bar{X}_{mag}$  serão funções do escorregamento e o Fator de Qualidade passa a ser uma função do escorregamento:

$$G = \frac{\bar{X}_{mag}(s)}{\bar{R}'_2(s)} = G(s) \quad (5.19)$$

No Capítulo 7 será demonstrada expressão para a determinação das perdas no ferro e poderá ser observado que estas são função de  $b_s(x,t)$  e que a amplitude da mencionada função, varia com o escorregamento, como mostra a equação (3.41).

Reesaltar que o Circuito Elétrico Equivalente mostrado na Figura 5.6, ainda não leva em conta o Efeito Longitudinal de Extremidade. A força propulsora teórica, desconsiderando os Efeitos de Extremidades, tem comportamento diferente daquela onde o Efeito Transversal de Borda é considerado.

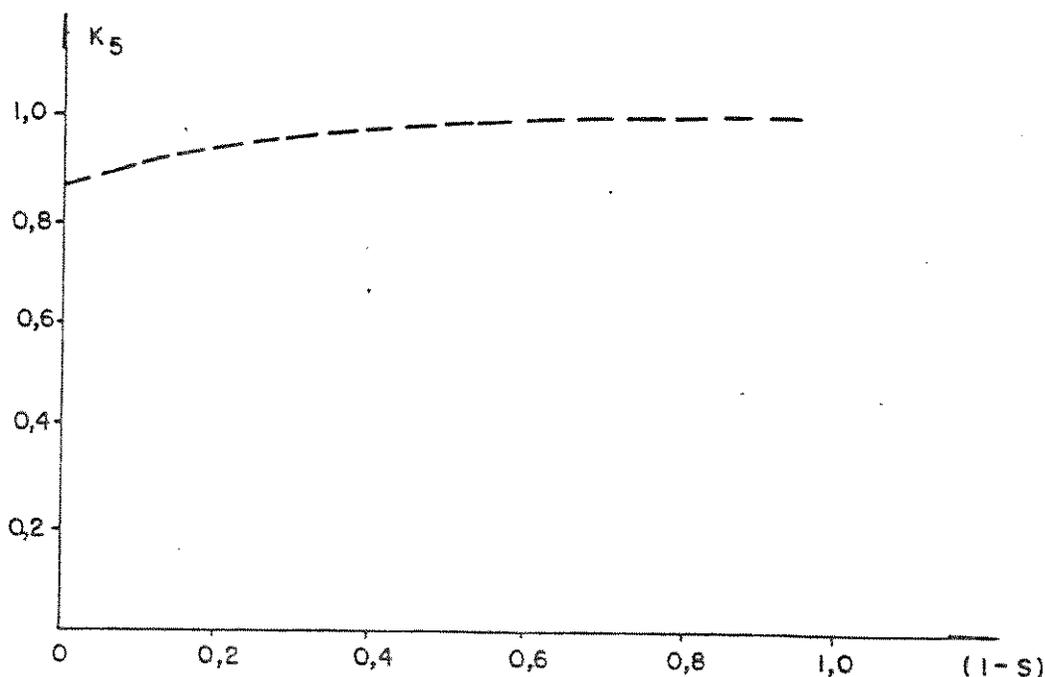


Figura 5.5: Comportamento do Fator Corretor de Bolton para a Reatância de Magnetização dos CALs

$$\bar{f}_{xt} = \frac{3}{V_{sx}} \cdot \left[ \frac{\bar{R}'_2}{s} \right] \cdot (\bar{I}'_2)^2 \quad (5.20)$$

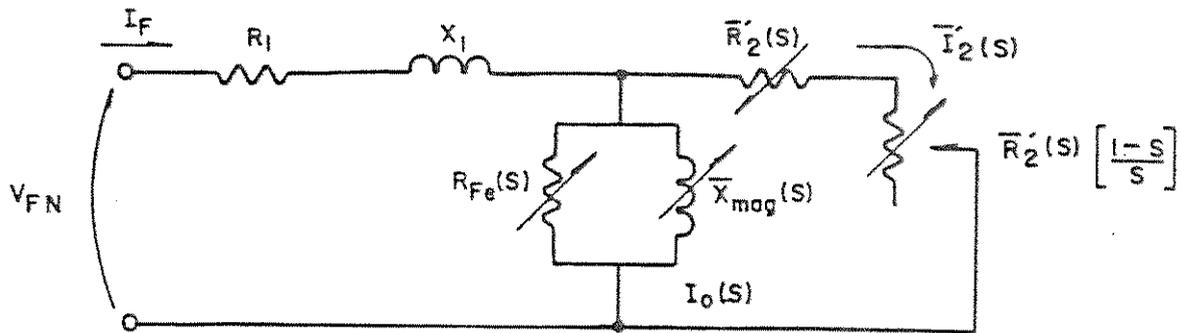


Figura 5.6: Circuito Elétrico Equivalente de um CAL, levando-se em conta o Efeito Transversal de Borda

### 5.2.5. A INFLUENCIA DO EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE NA INTENSIDADE DA FORÇA PROPULSORA DOS CALs

#### 5.2.5.1. FATOR DE EXTREMIDADE DE ENTRADA

No Capítulo 4, demonstrou-se que a Densidade de Campo Magnético no entreferro dos CALs, tem por expressão:

$$b(x,t) = b_s(x,t) + E_1 \cdot \left[ e^{-x/a_1} \cdot \cos(w_s \cdot t - \pi \cdot x/t_{pe} + \delta_1) \right] + E_2 \cdot \left[ e^{+x/a_2} \cdot \cos(w_s \cdot t + \pi \cdot x/t_{pe} + \delta_2) \right] \quad (4.9)$$

onde os segundo e terceiro termos do segundo membro da equação são

ondas geradas nas extremidades de entrada e de saída do linor, respectivamente.

A profundidade de penetração da Onda de Extremidade de Entrada,  $a_1$ , é muito maior que a de saída,  $a_2$  [4], [8] e [18]. Partindo desta constatação, a referência [10], usando como base o Circuito Elétrico Equivalente de um CAR convencional, desenvolve um circuito elétrico, relativamente simples, que admite o Efeito Longitudinal de Extremidade. Partindo-se da equação (4.9), determinam-se as tensões induzidas no enrolamento do indutor ou dos indutores devidas à presença dos dois primeiros termos do segundo membro da referida equação e, a partir deles, determina-se um fator, a que denominou-se Fator de Extremidade de Entrada -  $K_E$  - que influi, diretamente, no comportamento da força propulsora do conversor. Para a formulação da teoria, considera-se:

- i) Finito o comprimento do pacote de lâminas que formam o núcleo do indutor;
- ii) Abrupta a mudança da relutância magnética, em ambas as extremidades do indutor;
- iii) A conseqüente não uniformidade das correntes elétricas induzidas no linor, e;
- iv) A distribuição não homogênea do fluxo magnético no entreferro, ao longo do comprimento do indutor.

Pesquisas conduzidas no Japão, levam a concluir que as ondas de densidade de campo principal e de densidade de campo, correspondente à extremidade de entrada, estão defasadas entre si de um ângulo igual a:

$$\delta = \delta_1 - \delta_s \quad (5.21)$$

O comportamento de ambas as ondas, no particular instante  $t = 0$ , é mostrado à Figura 4.5 do Capítulo 4. A Figura 5.7 mostra as ondas principal e de extremidade de entrada para um instante genérico  $t$ , onde é ressaltado o ângulo  $\delta$ , referido na equação (5.21).

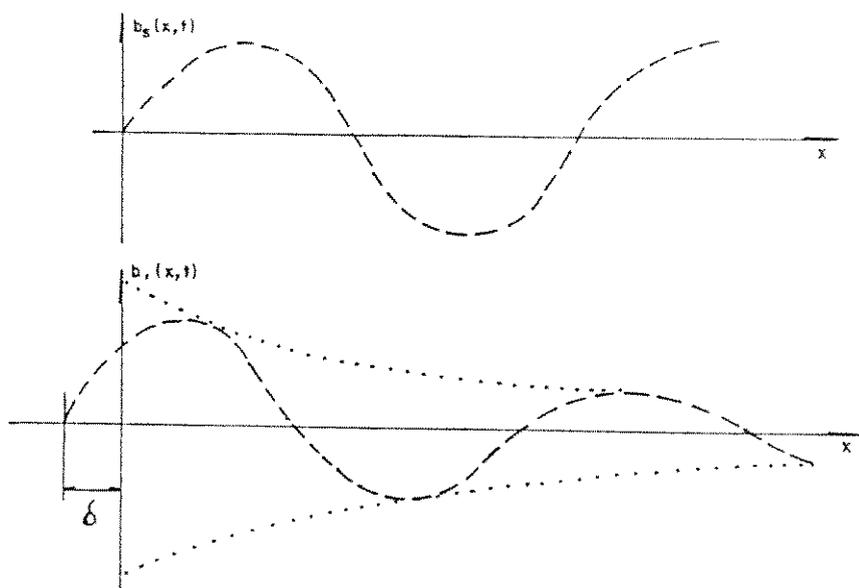


Figura 5.7: Comportamento das ondas de densidade de campo - onda principal e onda de extremidade de entrada, num instante  $t$ .

Ambas as ondas induzem forças eletromotrizes nos condutores do indutor. Para uma bobina genérica, escreve-se:

$$e = e_s + e_1 = E_{Ms} \text{ sen } (\omega_s \cdot t + \alpha) + E_{M1} \text{ sen } (\omega_s \cdot t + \beta) \quad (5.22)$$

sendo que  $e_s$  e  $E_{Ms}$ , relacionam-se a  $b_s(x,t)$  e  $e_1$  e  $E_{M1}$ , relacionam-se a  $b_1(x,t)$ . A referência [10], explicita:

$$K_E = \frac{E_{M1}}{E_{Ms}} \quad (5.23)$$

que caracteriza o Fator de Extremidade de Entrada.

A expressão da força eletromotriz induzida em uma bobina indutória genérica, partindo-se das equações (5.22) e (5.23), é:

$$e = E_{Ms} \text{ sen } (\omega_s \cdot t + \alpha) + K_E \cdot E_{Ms} \text{ sen } (\omega_s \cdot t + \beta) \quad (5.24)$$

#### 5.2.5.2. CONJUNTO DE HIPÓTESES PARA O ESTABELECIMENTO DO FATOR DE EXTREMIDADE DE ENTRADA

As hipóteses que seguem são empregadas com finalidade de delimitar as condições de contorno que cercam a definição do referido fator:

- i) O Efeito de Extremidade de Entrada é praticamente anulado a partir de uma profundidade de penetração  $x = p \cdot t_{pe}$ , isto é, ele induz tensões nas bobinas situadas no indutor, no intervalo:

$$0 \leq x \leq p \cdot t_{pe} \quad (5.25)$$

- ii) Todas as grandezas elétricas e magnéticas envolvidas no processo, variam senoidalmente no tempo;
- iii) No limite  $a_1 \rightarrow \infty$  e  $t_{pe} \rightarrow t_p$ , a Onda de Efeito de Extremidade de Entrada cancela a onda que trafega em Velocidade Linear Síncrona -  $V_{sx}$ , e:

$$B_1 = B_M(s) \quad (5.26)$$

- iv) O fluxo concatenado tem o mesmo valor para cada fase.

A Onda de Efeito de Extremidade é fortemente amortecida ao longo do eixo  $x$  e a hipótese (i), tem sustentação prática [10]. A condição  $t_{pe} > t_p$ , para conversores de Baixa Velocidade, implica em que a Onda de Efeito de Extremidade de Entrada caminha mais rapidamente do que a onda do campo principal, a qual caminha com Velocidade Linear Síncrona. Força propulsora é encontrada quando o conversor opera em velocidade síncrona, isto é,  $V_{rx} = V_{sx}$  [8]. Esta condição para a força propulsora tem sido confirmada por vários pesquisadores, embora sua intensidade, para escorregamento nulo, seja muito pequena. Esta parcela de força, positiva, é contrariada por forças resistentes, oriundas das perdas mecânicas e por forças negativas, oriundas dos harmônicos espaciais de elevada ordem, presentes no fluxo magnético do entreferro.

No projeto de CALs, o estudo das forças negativas, devidas ao Efeito Transversal de Borda, é muito mais importante do que considerações sobre a parcela de força propulsora devida à

condição  $t_{pe} > t_p$  (presente em conversores de Baixa Velocidade). Caberá ao projetista decidir sobre a ênfase a ser dada a esta parcela de força propulsora, podendo até ser desprezada [10].

#### 5.2.5.3. CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DESENVOLVIDO PARA COMPENSAR A INFLUENCIA DO EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

Os CALs podem ter o seu comportamento simulado a partir de um Circuito Elétrico Equivalente que leve em conta os Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda. A referência [23] demonstra que o Circuito Elétrico Equivalente, mostrado à Figura 5.6, não reúne condições de simular a operação de CALs, com propriedade. Para que se possa simular um CAL, a resistividade superficial da lâmina linórica deve ser corrigida por fator ou fatores específicos e o Efeito Longitudinal de Extremidade deve ser compensado. Isto pode ser conseguido a partir de um ramo auxiliar agregado ao Circuito Elétrico Equivalente mostrado na Figura 5.6. Este ramo tem os seus parâmetros variáveis, funções do escorregamento  $s$  do conversor.

Para o desenvolvimento de um Circuito Elétrico Equivalente, alguns aspectos complementares devem ser analisados:

- i) Na partida ou a linor bloqueado, praticamente só se faz presente o Efeito Transversal de Borda;
- ii) Quando se opera com escorregamentos normais, as forças propulsoras teórica e real são muito dis-

pares [10], [23].

O Circuito Elétrico Equivalente, mostrado à Figura 5.8, possui um ramo adicional colocado em paralelo com os ramos de excitação e de força e submetidos a uma tensão  $E \leq V'1$  onde  $V'1$  é a tensão aplicada sobre os referidos ramos, quando se opera com os circuitos convencionais - Figuras (5.2) e (5.6).

A impedância  $Z_E$  é calculada a partir de [10] :

$$\dot{Z}_E = \dot{Z}_{TOTAL} \left[ \frac{1 - K_E}{K_E} \right] \quad (5.27)$$

onde  $Z_{TOTAL}$  é a impedância associada:

$$\dot{Z}_{TOTAL} = \left[ \frac{\dot{Z}_o \cdot \dot{Z}'_{sec}}{\dot{Z}_o + \dot{Z}'_{sec}} \right] \quad (5.28)$$

$$\frac{1}{\dot{Z}_o} = \frac{1}{R_{FE}} + \frac{1}{j X_M} \quad (5.29)$$

$$\dot{Z}'_{sec} = \left[ \frac{\bar{R}'_2}{s} + j 0 \right] \quad (5.30)$$

A equação (5.27) mostra que a impedância adicional  $Z_E$ , desenvolvida para compensar o Efeito Longitudinal de Extremidade, tende para o infinito quando o Fator de Extremidade de Entrada tende para zero e isto ocorre na condição em que  $s$  tende para a unidade. A tensão  $E$ , aplicada sobre os ramos de excitação, adicional e de força, é calculada a partir de  $V'1$ , segundo equação proposta na referência [10] :

$$E = ( 1 - K_E ) \cdot V'_1 \quad (5.31)$$

onde  $V'_1$  é a tensão originalmente aplicada sobre os referidos ramos.

A força propulsora, calculada a partir do circuito elétrico equivalente mostrado à Figura 5.8, é expressa, por:

$$f_{xg} = \frac{3}{V_{sx}} \left[ \frac{\bar{R}'_2}{s} \right] \cdot (\bar{I}'_2)^2 \quad (5.32)$$

que fornece o valor da força propulsora corrigida, onde os Efeitos Longitudinal de Extremidade e Transversal de Borda, são levados em conta.

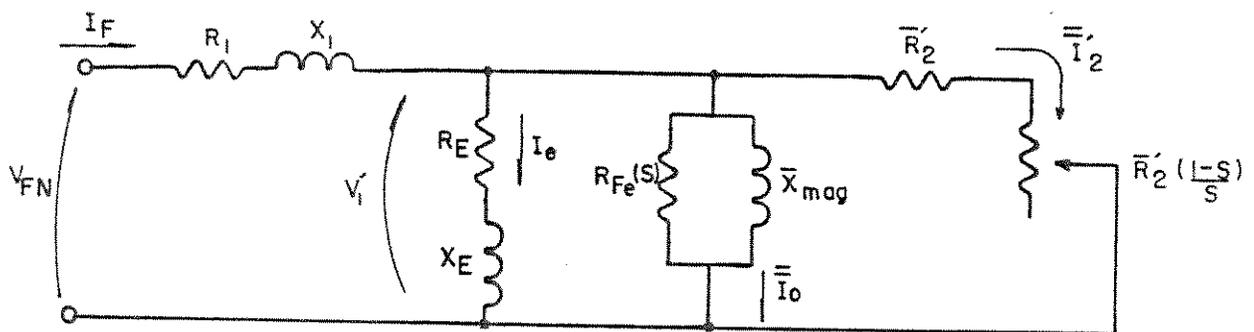
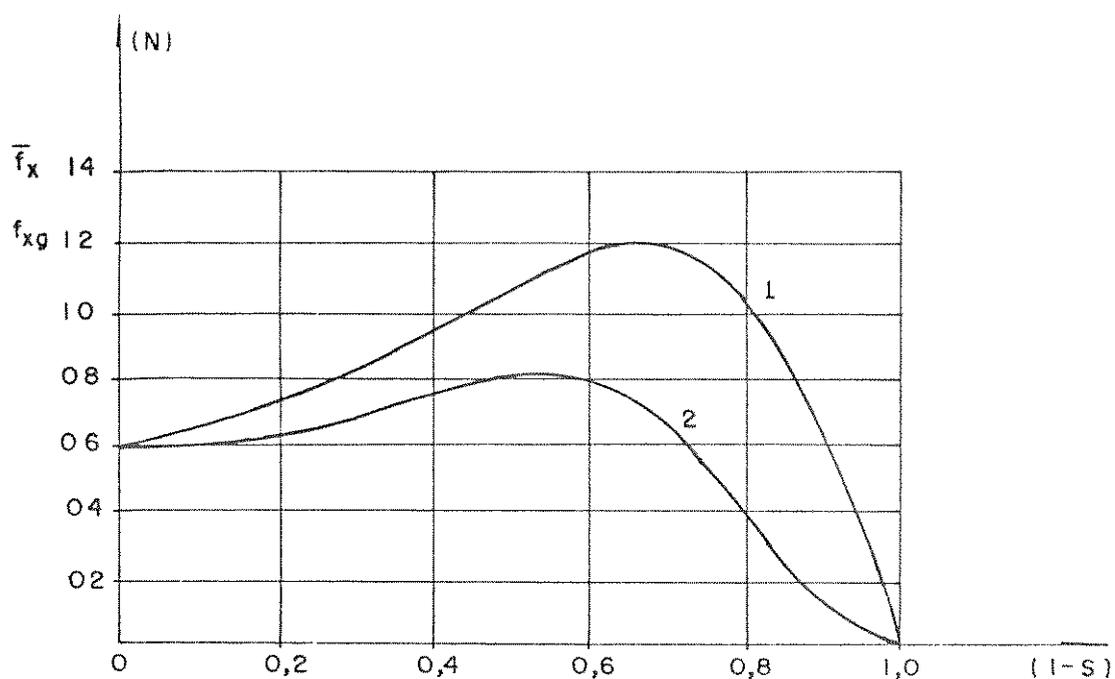


Figura 5.8: Circuito Elétrico que simula o comportamento de um CAL, considerando os Efeitos de Extremidades

A Figura (5.9) mostra forças calculadas segundo as equações (5.20) e (5.32).

Análise detalhada do Circuito Elétrico Equivalente da Figura (5.8) mostra que a compensação do Efeito Longitudinal de

Extremidade foi conseguida com a introdução de um ramo adicional, colocado em paralelo com os ramos de excitação e de força e com a redução da tensão aplicada sobre os referidos ramos. Com este artifício, a corrente  $\bar{I}'_2$  que circula pelo ramo de força, é atenuada, trazendo como consequência a atenuação da força propulsora final -  $f_{xg}$ .



curva 1: calculada segundo equação (5.20), desconsiderando-se  $K_E - \bar{f}_{xr}$

curva 2: calculada segundo a equação (5.32), considerando-se  $K_E - f_{xg}$

Figura 5.9: Comportamento das forças propulsoras  $\bar{f}_{xr}$  e  $f_{xg}$  - referência [23].

A potência convertida em calor pela lâmina linórica, a partir do modelo por fase, é expressa, por:

$$\bar{P}_L = 3 \cdot \bar{R}'_2 \cdot (\bar{I}'_2) \quad (5.33)$$

A primeira vista, pode parecer ao pesquisador que as perdas linóricas seriam menores, examinando o Circuito Elétrico Equivalente da Figura 5.8. Ocorre, porém, que a corrente  $I'2$  é fictícia; a corrente real refletida é  $\bar{I}'2$ , obtida com o circuito da Figura 5.6 ou similar.

#### 5.2.5.4. EQUACIONAMENTO DO FATOR DE EXTREMIDADE DE ENTRADA - $K_E$

A referência [10], usando os dois primeiros termos do segundo membro da equação (4.9), definiu um Fator de Extremidade de Entrada, expresso por:

$$K_E = \frac{E_{M1}}{E_{Ms}} \quad (5.23)$$

A força eletromotriz induzida pela onda fundamental -  $b_s(x,t)$  - que se translada pelo entreferro, foi equacionada no Capítulo 3 e é expressa, por:

$$E_F = \sqrt{2} \cdot f \cdot N_F \cdot B_M(s) \cdot t_p \cdot C \cdot K_{We} \quad (3.73)$$

em seu valor eficaz. O seu valor máximo, é expresso por:

$$E_{Ms} = 2 \cdot f \cdot N_F \cdot B_M(s) \cdot t_p \cdot C \cdot K_{We} \quad (5.34)$$

A referência [10] demonstra que:

$$E_{M1} = 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot \frac{N_F}{P} \cdot \frac{t_{pe}}{t_p} \cdot K_{W1} \cdot \left[ \frac{C \cdot B_1 \cdot Q}{\left(1/a_1\right)^2 + \left(\Pi/t_{pe}\right)^2} \right] \cdot f(\delta) \cdot \left[ \sinh\left[\frac{p \cdot t_{pe}}{2 \cdot a_1}\right] \cdot \left[\frac{p/2 \cdot \sinh\left[t_{pe}/a_1\right]}{\left[\sinh\left[t_{pe}/a_1\right]\right]^2}\right]^{-1} \right] \quad (5.35)$$

onde  $a_1$  é o coeficiente de penetração da Onda de Extremidade de Entrada.

$$K_{W1}(s) = \frac{\text{sen}\left[\frac{t_p \cdot \Pi}{t_{pe} \cdot 2 \cdot m}\right]}{q \cdot \text{sen}\left[\frac{t_p \cdot \Pi}{t_{pe} \cdot 2 \cdot m \cdot q}\right]} \cdot \text{sen}\left[\frac{t_p \cdot \Pi \cdot t_b}{t_{pe} \cdot 2 \cdot t_p}\right] \quad (5.36)$$

onde  $K_{W1}(s)$  é o Fator de Enrolamento para a Onda de Extremidade de Entrada,  $q$  é o número de ranhuras por pólo e por fase do indutor e  $t_b$  é o passo de bobina indutórica.

$$t_{pe} = \left[ \frac{2 \cdot \Pi}{D} \right] \quad (5.37)$$

$$B_1 = \frac{2 \cdot g_T \cdot \rho_R'''}{\rho_R'' \cdot F \cdot g_T - V_{RX} \cdot \mu_0} \quad (5.38)$$

onde  $D$  e  $F$  são funções auxiliares:

$$D = \frac{1}{2^{1/2}} \left[ \left[ \left( \frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{\rho_R'' \cdot g_T} \right)^4 + 16 \left( \frac{\mu_0 \cdot W_a}{\rho_R'' \cdot g_T} \right)^2 \right]^{1/2} + \left( \frac{\mu_0 \cdot V_{RX}}{\rho_R'' \cdot g_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.39)$$

$$F = \frac{1}{2^{1/2}} \cdot \left[ \left[ \left( \frac{\mu_o \cdot V_{RX}}{\rho_R'' \cdot g_T} \right)^4 + 16 \left( \frac{\mu_o \cdot W_a}{\rho_R'' \cdot g_T} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[ \frac{\mu_o \cdot V_{RX}}{\rho_R'' \cdot g_T} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (5.40)$$

Analisando-se as equações auxiliares (5.39) e (5.40), observa-se que os elementos que as compõe são conhecidos e já definidos e estudados em capítulos anteriores.

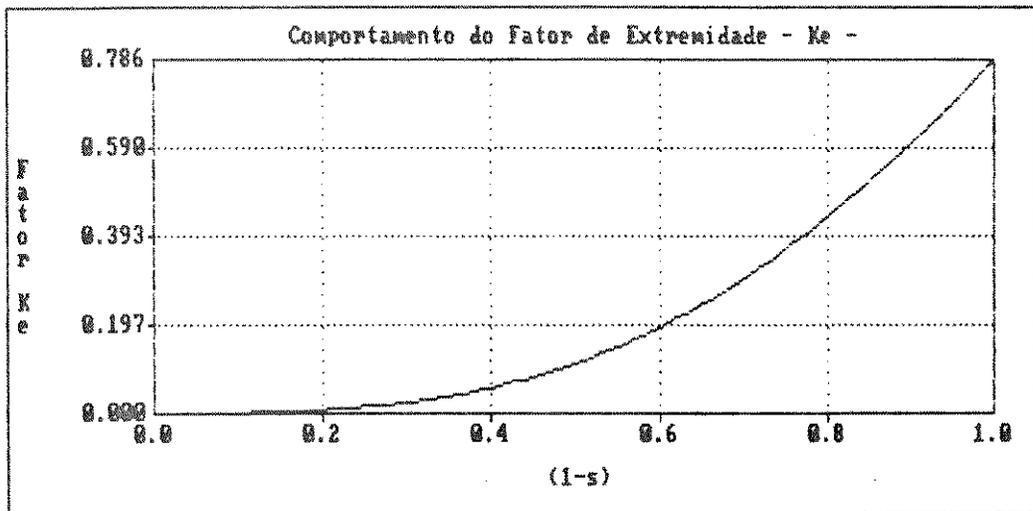


Figura 5.10: Comportamento do Fator de Extremidade de Entrada, para o Conversor da Referência [23]

Os fatores D e F são funções do escorregamento linótrico. Ainda, segundo a referência [10], a função  $f(\delta)$  tem por expressão:

$$f(\delta) = \left[ \frac{1}{a_1} \right] \cdot \text{sen}(\delta) + \left[ \frac{\pi}{t_{pe}} \right] \cdot \text{cos}(\delta) \quad (5.41)$$

O ângulo  $\delta$  está contido no intervalo  $\delta_o \leq \delta \leq \pi$ .

Para CALs que operam em velocidades superiores a 150m/s, o ângulo  $\delta$  será assumido como valendo  $\Pi$  radianos [10]. O ângulo  $\delta_0$  tem como expressão:

$$\delta = \delta_0 + K_{14} \cdot V_E \quad (5.42)$$

$$\delta_0 = 180^\circ - \arccos \left[ \frac{a_1}{t_{pe}} \right] \quad (5.43)$$

$$K_{14} = \frac{1}{150} \cdot \arccos \left[ \frac{a_1}{t_{pe}} \right] \quad (5.44)$$

sendo:

$$V_E = \frac{V_{RX} - V_0}{V_{SX} - V_0} \cdot V_{SX} \quad (5.45)$$

para  $V_{RX} > V_0$ , e:

$$V_E = 0 \quad (5.46)$$

para  $V_{RX} < V_0$ , onde  $V_0$  é estimada em função da Velocidade Linear Sincrona. Testes tem indicado que  $V_0 = 0,5 \cdot V_{SX}$ , para CALs de Alta Velocidade ( $V_{SX} \cong 150\text{m/s}$ ) é um valor bastante satisfatório [10].

$$Q = 2 \cdot e^{-\left[ (P \cdot t_{pe}) / (2 \cdot a_1) \right]} \quad (5.47)$$

### 5.3. CONSIDERAÇÕES

Ao longo deste Capítulo, procurou-se mostrar a complexidade que envolve a determinação de um Circuito Elétrico Equivalente que possa simular, de forma segura, o comportamento real

dos CALs. O pesquisador deve ter extremo cuidado ao escolher os Fatores Corretores que admitirá em seu estudo. Para o Efeito - Transversal de Borda, dois caminhos são oferecidos: Bolton e - Russell. Para o Efeito Longitudinal de Extremidade, oferece-se o método proposto na referência [10] - Fator de Extremidade de Entrada. Como se pode observar, a função  $f(\delta)$  é de difícil equacionamento e envolve o fator  $K_4$  e a velocidade  $V_0$ , que exigem do pesquisador o desenvolvimento de muitos protótipos, muitos testes, medições e simulações em computador, para segura definição.

Em face a esta incerteza, procurou-se um segundo modelo, um modelo alternativo, para corrigir os efeitos prejudiciais do Efeito Longitudinal de Extremidade, o que é feito no Capítulo 6.

## CAPÍTULO 6

UM OUTRO ENFOQUE PARA A CORREÇÃO DA PRESENÇA DO  
EFEITO LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE NO  
COMPORTAMENTO DOS CALs

## 6.1. INTRODUÇÃO

No Capítulo anterior, estudou-se formas de prever o comportamento dos CALs em presença dos Efeitos de Extremidades. Foi visto que a influência do Efeito Longitudinal de Extremidade é assimilada a partir de modelo proposto pela referência [10], atuando-se sobre um Circuito Elétrico Equivalente convencional. Porém, a determinação de  $E_k$  e de  $V_o$ , é feita de forma empírica.

A referência [22], partindo da equação (4.9), despreza o terceiro termo do segundo membro e, empregando equações fundamentais, deriva expressões para a força propulsora e para a força eletromotriz induzidas nos CALs.

Como a equação (4.9) é a base para toda a análise, fica implícito que o modelo matemático usado é unidimensional. Poucos pesquisadores fizeram uso de teorias bi e tridimensionais para estudarem o comportamento da Densidade de Campo Magnético no entreferro. Portanto, considerando-se o modelo unidimensional aplicado a um conversor assíncrono de dupla face e lâmina móvel

não magnética e definindo-se:

$$J_s(x,t) = J_M \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) \quad (2.35)$$

obtem-se:

$$b_s(x,t) = B_M(s) \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p + \delta_s) \quad (2.9)$$

$$b(x,t) = b_s(x,t) + B_A(s) \left[ e^{-x/\alpha_1} \cdot \cos(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_{pe} + \delta_1) \right] \quad (6.1)$$

A referência [22] demonstra, que:

$$B_A(s) = \frac{A_{11}}{\left[ 1 + \left[ \frac{1}{A_{21} \cdot V_{RX} \cdot \epsilon_1} \right] \cdot \text{sen } \delta_1 + \left[ \frac{\pi}{A_{21} \cdot V_{RX} \cdot t_{pe}} \right] \right]} \quad (6.2)$$

$$\text{tg } \delta_1 = \frac{\left[ A_{11} \left[ 1 + \frac{1}{A_{21} \cdot V_{RX} \cdot \epsilon_1} \right] - \left[ \frac{A_{31} \cdot \pi}{A_{21} \cdot V_{RX} \cdot t_{pe}} \right] \right]}{\left[ A_{31} \left[ 1 + \frac{1}{A_{21} \cdot V_{RX} \cdot \epsilon_1} \right] + \left[ \frac{A_{11} \cdot \pi}{A_{21} \cdot V_{RX} \cdot t_{pe}} \right] \right]} \quad (6.3)$$

As equações auxiliares derivadas, são:

$$A_{21} = \left[ \frac{\mu_0}{\rho'_R \cdot gT} \right] \quad (6.4)$$

$$A_{51} = A_{21} \left[ \frac{-V_{RX}^2 + \left[ V_{RX}^4 + 4(\omega_s/A_{21})^2 \right]^{1/2}}{2} \right]^{1/2} \quad (6.5)$$

$$A_{\delta 1} = \left[ \frac{2 \cdot w_s \cdot A_{21}}{A_{51}} \right] \quad (6.6)$$

$$A_{31} = - \left[ \frac{\rho_R \cdot J_M}{V_{RX}} \right] + A_{41} \quad (6.7)$$

$$A_{41} = E_M(s) \left[ \left[ \frac{(\pi \sin \delta s)}{(A_{21} \cdot t_p \cdot V_{RX})} \right] - \cos \delta s \right] \quad (6.8)$$

$$A_{41} = - E_M(s) \left[ \left[ \frac{(\pi \cos \delta s)}{(A_{21} \cdot t_p \cdot V_{RX})} \right] + \sin \delta s \right] \quad (6.9)$$

$$t_{pe} = \left[ \frac{(2 \cdot \pi)}{(A_{51})} \right] \quad (6.10)$$

$$\epsilon_1 = \left[ \frac{(2)}{(A_{\delta 1} - A_{21} \cdot V_{RX})} \right] \quad (6.11)$$

Examinando as equações (6.2) a (6.11), observa-se que a densidade máxima de campo -  $E_M(s)$  - da Onda de Extremidade de Entrada, está perfeitamente definida, assim como o ângulo  $\delta_1$ .

A força propulsora real de um conversor, seja ele linear ou rotativo, é expressa por:

$$f_{XH} = (C/2) \cdot \int_0^{p \cdot t_p} \text{Re} \left[ J_S(x,t) \cdot b^*(x,t) \right] dx \quad (6.12)$$

onde  $b^*(x,t)$ , é o conjugado de  $b(x,t)$ .

Resolvendo-se a integral (6.12), obtém-se:

$$f_{XH} = 1/2 \cdot \left[ E_M(s) \cdot J_M \cdot t_p \cdot C \cdot p \right] \cdot \cos \delta s +$$

$$+ A_{52} \cdot \left[ e^{-(p \cdot t_p / a_1)} \right] \cdot \text{sen} \left[ \left[ (\Pi \cdot p \cdot t_p) / (t_1) \right] + (\delta_1 + \delta_t) \right] \quad (6.13)$$

com:

$$A_{52} = \left[ \left[ J_M \cdot B_1(\varepsilon) \cdot C \right] \cdot \left[ \left[ (2 \cdot \Pi) / (t_1) \right] \cdot \left[ 1 + \left[ (t_1) / (\Pi \cdot a_1) \right]^2 \right] \right]^{-1} \right] \quad (6.14)$$

$$\frac{1}{t_1} = \frac{1}{t_p} - \frac{1}{t_{pe}} \quad (6.15)$$

$$t_E \delta_t = - \left[ (t_1) / (\Pi \cdot a_1) \right] \quad (6.16)$$

O primeiro termo do segundo membro da equação (6.13) representa a força propulsora teórica, a que se representará por  $f_{XT}$  e o segundo termo, a componente de força oriunda da Onda de Extremidade de Entrada, representada por  $f_{XE}$ :

$$f_{XH} = f_{XT} + f_{XE} \quad (6.17)$$

## 6.2. A FORÇA PROPULSORA E O EFEITO TRASVERSAL DE BORDA

De acordo com S. Yamamura [4], quando um estudo completo é feito no sentido de determinar-se a resistência efetiva da lâmina linórica, faz-se necessário levar em conta o Efeito Transversal de Borda. Este efeito pode ter grande influência na resistência efetiva do linor e no desempenho do conversor.

Estritamente falando, os Efeitos Transversal de Borda e Longitudinal de Extremidade afetam um ao outro e uma rigorosa solução poderia ser obtida a partir de uma análise tridimensional. Porém, uma boa aproximação pode ser conseguida tratando-se separadamente os fenômenos e superpondo os resultados. Seguindo esta orientação, o pesquisador pode introduzir, no equacionamento anterior, os Fatores Corretores de Bolton ou de Russell - Norsworthy, explanados no Capítulo 5 que deram ao conjunto, um encaminhamento realístico. Pelas razões observáveis, se faz necessário manter uma nomenclatura bem vária, para a força propulsora dos CALs.

#### 6.2.1. ANÁLISE DO TERMO $f_{xt}$ E SUAS DIVERSAS IMPLICAÇÕES

Da equação (6.13), obtém-se:

$$f_{xt} = 1/2. \left[ E_M(s) \cdot J_M \cdot t_p \cdot C \cdot p \right] \cdot \cos \delta_s \quad (6.18a)$$

No Capítulo 3, demonstrou-se:

$$\text{tg } \delta_s = + \left[ \frac{\rho_R'' \cdot \Pi \cdot g_T}{\mu_0 \cdot t_p \cdot s \cdot V_{sx}} \right] \quad (6.18b)$$

$$E_M(s) = \frac{J_M}{\left[ \left( \frac{g_T \cdot \Pi}{\mu_0 \cdot t_p} \right)^2 + \left( \frac{s \cdot V_{sx}}{\rho_R''} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (6.18c)$$

A partir da equação (6.18b), demonstra-se :

$$\text{tg } \delta_s = + \left[ (1)/(s \cdot G) \right] \quad (6.19)$$

e:

$$\cos \delta s = \left[ 1 + 1/(s.G)^2 \right]^{-1/2} \quad (6.20)$$

Operando-se a equação (6.18c), demonstra-se :

$$E_M(s) = \frac{\rho_R' \cdot J_M}{s \cdot V_{sx} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(s.G)^2} \right]^{1/2}} \quad (6.21)$$

Substituindo-se em (6.18a), as equações (6.20) e (6.21), obtém-se:

$$f_{xr} = 1/2 \left[ \frac{\rho_R' \cdot J_M^2 \cdot C \cdot p}{2 \cdot f \cdot s \cdot A_{\sigma z}} \right] \quad (6.22)$$

de onde :

$$A_{\sigma z} = \left[ 1 + 1/(s.G)^2 \right]$$

equações que expressam o comportamento da força propulsora, desconsiderando-se o Efeito Longitudinal de Extremidade. É interessante ressaltar que  $f_{xr}$  é a força que atua em um conversor assíncrono rotativo, dotado de estator contínuo e rotor laminar. Se o rotor for gaiola de esquilo, adota-se:  $\rho_R' = \rho_R'$  e  $G = G_L$ .

### 6.3. FORÇAS ELETROMOTRIZES INDUZIDAS NOS CONDUTORES DO INDUTOR, NO MODELO 'POR FASE'

A densidade de campo no entreferro e as forças eletromotrizes induzidas nos condutores indutóricos podem ser rela-

cionadas a partir do Potencial Vetorial  $\bar{A}$ :

$$\begin{aligned}\bar{B} &= \text{Rot} \cdot \bar{A} \\ \bar{E} &= - \delta \bar{A} / \delta t\end{aligned}\quad (6.23)$$

A função  $\bar{A}$  compreende somente componente no eixo z, de forma semelhante ao campo elétrico  $\bar{E}$  e à semelhança das fems indutóricas. Representando-se a Densidade de Campo Magnético por  $b_y$  e desenvolvendo-se o Rotacional à função potencial vetorial  $\bar{A}$ , escreve-se:

$$- (\delta A_z / \delta x) = b_y \quad (6.24)$$

de onde:

$$A_z = - \int b_y \cdot dx \quad (6.25)$$

Da equação (6.24), admitindo-se somente componente no eixo z para o campo elétrico presente nos condutores indutóricos, escreve-se:

$$e_z = - \delta A_z / \delta t \quad (6.26)$$

Desenvolvendo a equação (6.25) e levando-a à equação (6.26), obtém-se:

$$e_z(x, t) = - E_m(s) \cdot (t_p / \Pi) \cdot \omega_s \cdot \left[ e^{j(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x / t_p + \delta_s)} \right] +$$

$$+ j \cdot \left[ \frac{B_1 \cdot \omega_s}{(1/a_1) + j \cdot (\pi/t_{pe})} \right] \cdot \left[ e^{-x/a_1} \cdot e^{j(\omega_s \cdot t - \pi \cdot x/t_{pe} + \delta_1)} \right] \quad (6.27)$$

De forma semelhante à força propulsora, o campo elétrico referido pode ser decomposto em duas parcelas bem caracterizadas. A primeira é típica dos condutores que cortam campos magnéticos alternantes senoidais. A segunda parcela do campo elétrico é devida a Onda de Extremidade de Entrada - atenua-se à medida que os condutores se distanciam da extremidade de entrada - e tem amplitude de análise complexa.

As forças eletromotrizes induzidas nos condutores indutóricos podem ser determinadas a partir dos campos elétricos presentes no mesmos. Como os condutores estão distribuídos em fases e em ranhuras, deve-se levar em conta este fato.

De forma semelhante ao que foi feito no Capítulo 3, pode-se analisar, separadamente, as duas parcelas que compõe as forças eletromotrizes induzidas no indutor:

- Parcela devida a Onda de Campo Magnético de Translação  $b_s(x,t)$ , em seu valor eficaz:

$$E_s = \sqrt{2} \cdot f \cdot N_f \cdot B_M(s) \cdot t_p \cdot C \cdot K_{we} \quad (6.28)$$

$$(3.73)$$

- Parcela devida a Onda de Extremidade de Entrada  $b_e(x,t)$ , em valor eficaz, segundo referência [22]

$$E_d = \sqrt{2} \cdot \left[ C \cdot k_{we} \cdot N_F \cdot \Pi \cdot f \right] \cdot \left[ \frac{B_d}{\left[ (1/a_d)^2 + (\Pi/t_{pe})^2 \right]^{1/2}} \right] \cdot \left[ \frac{a_d}{p \cdot t_p} \right] \cdot \left[ 1 - e^{-(p \cdot t_p)/a_d} \right] \quad (6.29)$$

### 6.3.1. CONSIDERAÇÕES

A força eletromotriz devida a Onda de Extremidade de Entrada possui um termo multiplicador que atua sobre a magnitude da mesma. CALs classificados como de Alta Velocidade, tem Onda de Extremidade de Entrada que penetra profundamente no entreferro, praticamente atravessando todo o comprimento do indutor. CALs de Baixa Velocidade tem Onda de Extremidade de Entrada menos penetrante. Se o passo polar  $t_p$  for grande, assim como o número de pólos, o Efeito de Extremidade de Entrada fica pouco representativo e a força eletromotriz induzida nos condutores do indutor pode ser calculada a partir da equação (6.28) ou (3.73), que são idênticas.

### 6.4. FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA NOS CONDUTORES INDUTORICOS EM PRESENÇA DOS EFEITOS TRANSVERSAL DE BORDA E LONGITUDINAL DE EXTREMIDADE

A possibilidade levantada por Yamamura [4], da superposição de efeitos, torna o trabalho do pesquisador mais direto, isto é, pode adotar o Fator Corretor que melhor adaptar-se ao seu estudo - Russell ou Bolton - e aplicá-lo no cálculo da resistividade efetiva do material de que é feita a lâmina línórica. Isto

posto, calcula os parâmetros envolvidos na determinação da força propulsora e da força eletromotriz induzida. Como os efeitos tem naturezas diferentes, cabe ao pesquisador efetuar a determinação da intensidade de cada um e determinar a correção que for necessária, a cada caso. C.M.P. Cabrita, experimentou conversores de 8 pólos e passo polar igual a 54,75 mm e optou pela correção, unicamente, do Efeito Transversal de Borda, usando o Fator Corretor de Russell - Norsworthy. Simulações efetuadas tem mostrado que, para números de pólos maior do que oito e Velocidades Lineares Síncronas inferiores a 15 m/s, o Efeito Longitudinal de Extremidade é pouco significativo.

#### 6.5. CONCLUSÕES

Os Capítulos 5 e 6 tem por finalidade, analisar formas de correção do Efeito Longitudinal de Extremidade. Estudo mais acurado mostra que, embora ambos permitam ao pesquisador chegar a resultados finais, o equacionamento desenvolvido no Capítulo 6 exige um campo de hipóteses muito pequeno e leva à determinação de dois elementos fundamentais para o estudo do conversor (força propulsora e força eletromotriz induzida nos condutores indutóricos, por fase). Por outro lado, se completam, dado que o Fator de Extremidade de Entrada, proposto pela referência [10], exige a determinação da força eletromotriz induzida nos condutores indutóricos, o que é feito a partir de um campo de hipóteses complexo. A associação das equações desenvolvida no Capítulo 6 com o Circuito Elétrico Equivalente proposto pela referência [10], cria um ferramental completo para a segura determinação do comportamento de CALs operando em vasto campo de velocidades.

Uma possibilidade extremamente interessante é a do emprego das equações (6.2), (6.3) e auxiliares, para a determinação de  $B_1(s)$  e  $\delta_1(s)$  e a aplicação dos valores obtidos, em equações do Capítulo 5, para a determinação do Fator  $K_E$ .

A Figura 6.1 estabelece comparação entre as forças propulsoras calculadas segundo os métodos propostos nos Capítulos 5 e 6, para o mesmo conversor.

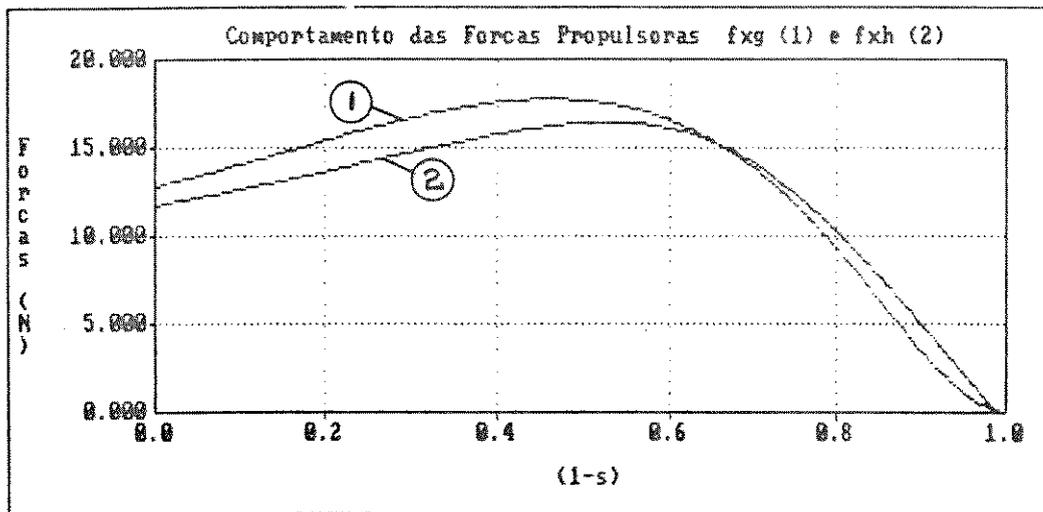


Figura 6.1: Comportamento da Força Propulsora de um Conversor, Calculada Segundo os Métodos Propostos nos Capítulos 5 e 6

## CAPÍTULO 7

### MÉTODO PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS E MECÂNICOS DOS CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES DE DUPLA FACE

#### 7.1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo, será desenvolvida uma metodologia de cálculo dos parâmetros elétricos e mecânicos componentes de CALs que operem com um ou dois estatores ativos e lâmina linórica construída em material diamagnético ou paramagnético. A maioria dos materiais é diamagnética ou paramagnética e pode ser considerada não magnética, para quase todas as aplicações. Se um material dia ou paramagnético for colocado num campo magnético, a Densidade de Campo Magnético no interior do mesmo é quase idêntica àquela do vácuo [24].

Para que as hipóteses a serem adotadas no desenvolvimento dos modelos matemáticos possam ser sustentadas, os estatores, passivos ou ativos, devem ser laminados e as lâminas, de material ferromagnético, devem ter espessura mínima e estarem isoladas entre si.

O desenvolvimento de uma técnica própria e apropriada de projeto está ligada a aspectos específicos, associados a parâ-

metros experimentais, que são obtidos a partir de testes praticados em famílias de protótipos. Quando se trata de uma nova filosofia, como será a filosofia a ser aplicada aos CALs, o projetista deve apoiar-se em bases teóricas sedimentadas e estabelecer elos com filosofias conhecidas e experimentadas. No presente trabalho, estabelecer-se-á forte elo com a filosofia adotada no projeto de CARs. Com a implementação e teste de diversos protótipos, será possível estabelecer um campo de informes que conduzirá a fatores e a intervalos de valores, que permitirão ao projetista desenvolver CALs para dirigidas aplicações. Portanto, o desenvolvimento de uma técnica de projeto passa, necessariamente, pela análise de uma série de elementos fundamentais, que formam o conjunto de hipóteses. Numa segunda etapa, desenvolvidas as equações necessárias, estabelece-se os passos para o cálculo.

Efetuada o cálculo dos parâmetros mecânicos e elétricos, entra-se na fase de simulação do conversor. Se o modelo matemático empregado for realmente confiável e os valores obtidos, satisfatórios, passa-se à construção do protótipo, que testado, servirá como elemento de partida para o estabelecimento de fatores, intervalos de valores e de uma "técnica de projeto".

Portanto, para o particular caso, o problema é bastante envolvente porque demanda a busca de elementos diretores de uma filosofia própria de projeto, que deve ser adequada a uma extensa gama de CALs.

## 7.2. FILOSOFIA DE PROJETO

É proposta deste trabalho, desenvolver uma técnica de projeto para CALs de Baixa e Média Velocidades a serem empregados no acionamento de misturadores, de transportadores, de ventiladores, de sistemas para irrigação de lavouras e, numa etapa posterior, de veículos ferroviários e metroviários auto propulsados.

Como a Velocidade Linear Síncrona dos CALs está ligada à frequência da fonte de alimentação, um conversor desenvolvido para, por exemplo, a frequência de 60 Hertz, poderá ser simulado e testado dentro de uma banda de frequências lindantes àquela.

As equações a serem empregadas no cálculo dos parâmetros mecânicos e elétricos serão derivadas de equações empregadas no cálculo de CARs e corrigidas a partir de fatores próprios dos CALs, fatores estes que levam em conta os Efeitos Pelicular, Longitudinal de Extremidade, Transversal de Borda, presença de ranhuras indutóricas e dispersão de fluxo magnético.

Hipóteses e fatores de correção, associados, permitirão a montagem de Circuito Elétrico Equivalente aplicável aos CALs. Correndo em paralelo, serão empregadas equações fundamentais, derivadas no Capítulo 6, dando condições para comparação de resultados, conferência e, se necessário, correção de valores obtidos, isto é, os resultados obtidos serão confrontados, a partir de duas técnicas de análise bem diferentes.

### 7.3. DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS PARA O PROJETO DE CALs

A partir dos elementos analisados nos Capítulos anteriores e das equações básicas desenvolvidas, associadas a equações empregadas no projeto de CARs, estabelecer-se-ão equações particulares para os parâmetros mecânicos e elétricos dos CALs.

Os CALs em projeto podem ter:

- a) Dois estatores ou indutores ativos, associados a um linor não magnético, de comprimento relativo aos indutores, muito grande, ou;
- b) Um estator ou indutor ativo, associado a um estator passivo e um linor não magnético, de comprimento relativo, muito grande.

Dado os circuitos magnéticos envolvidos serem magneticamente lineares, é permitida a aplicação da superposição de efeitos. Desta forma, a técnica de cálculo aqui proposta desenvolve-se em torno de um modelo formado por um estator ativo. Em seguida, se for desejável, associa-se em série dois estatores ativos, superpondo-se efeitos e determinando-se os parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente, associado.

Portanto, de início tudo se passa como se o conversor fosse modelado segundo o item b e a Figura 7.1.

Para que o conversor possa ser desenvolvido, o projetista deve receber:

- força propulsora real:  $f_x$
- escorregamento nominal:  $s\%$
- velocidade linear síncrona:  $V_{sx}$
- frequência nominal:  $f$
- corrente elétrica operacional:  $I_f$
- entreferro mecânico:  $g$
- espessura do linor:  $h_m$

O projetista deve ainda escolher:

- material de que é feito o linor
- número de indutores ativos
- temperatura operacional do linor
- classe de isolamento dos condutores indutóricos
- resistividade volumétrica do material de que é feito o linor
- resistividade volumétrica do material de que é feito o enrolamento do indutor
- temperatura operacional dos condutores do enrolamento indutórico
- densidade superficial de corrente nos condutores indutóricos
- fator de ocupação de uma ranhura

Com os dados fornecidos ao projetista e com as hipóteses primeiras, feitas por este, desenvolve-se expressões para os parâmetros elétricos e mecânicos do conversor.

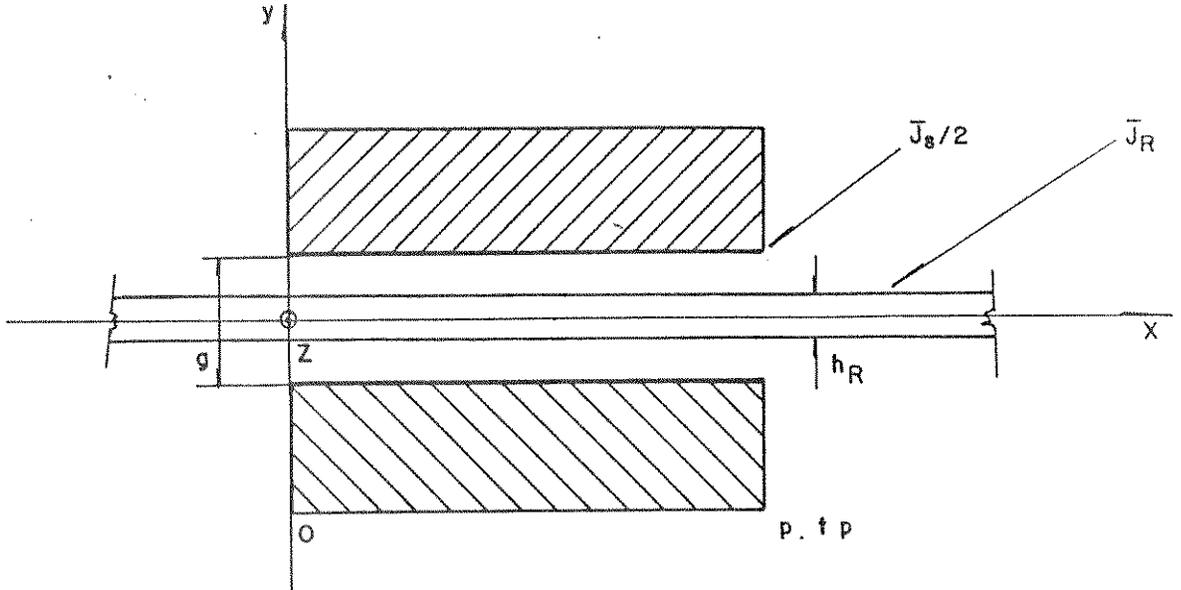


Figura 7.1: Conversor Assíncrono Linear dotado de um Estator ou Indutor Ativo

### 7.3.1. RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO INDUTÓRICO, POR FASE E POR INDUTOR

A resistência do enrolamento indutórico, por fase e por indutor, é equacionada a partir do princípio que cada indutor opera em separado, portando um enrolamento mfásico. Isto posto, considera-se, que:

- i) O CAL operará com um indutor ativo e um passivo, ambos construídos em chapas de aço-silício laminadas, sem orientação preferencial;
- ii) O CAL operará a corrente eficaz constante;

iii) As espiras do enrolamento indutórico serão conectadas em série, por fase.

Das considerações e hipóteses, escreve-se:

$$R_1 = \rho_s (os) \cdot l_F / S_{fio} \quad (7.1)$$

O comprimento de condutor indutórico, por fase, pode ser representado, por:

$$l_F = N_F \cdot l_{\text{médio}} \quad (7.2)$$

onde  $l_{\text{médio}}$  é o comprimento médio de um condutor ativo, levando-se em consideração o comprimento da 'testa de bobina'.

$$l_{\text{médio}} = (C + l_{cb}) \quad (7.3)$$

onde  $l_{cb}$  é o comprimento médio da 'testa de bobina'. Se o indutor for enrolado com condutores circulares,  $l_{cb}$  está no intervalo [27]:

$$1,4 t_p \leq l_{cb} \leq 1,8 t_p \quad (7.4)$$

Nos CALs, as testas de bobinas, são levemente menores do que nos CARs convencionais. Se o indutor for enrolado com barras de secção retangular, a testa de bobina fica relativamente maior e:

$$1,8 t_p \leq l_{cb} \leq 2,2 t_p \quad (7.5)$$

Por outro lado, a Densidade Superficial de Corrente -  $d_{fio}$  - é expressa, por:

$$d_{fio} = I_F / S_{fio} \quad (7.6)$$

O valor a ser adotado para a Densidade Superficial de Corrente, para os condutores do indutor, está associado à classe de isolamento dos mesmos, isto é, aos materiais isolantes usados no condutor, na isolamento das ranhuras, à capacidade de troca de calor com o núcleo do indutor e com meio ambiente.

Como a capacidade de corrente de um condutor é limitada, fica limitada também a força propulsora do CAL, por unidade de comprimento do mesmo. Devido a diferenças na forma de dissipar calor, as diferentes partes do enrolamento são afetadas de forma diferente, o que pode levar à necessidade de ventilação forçada. Desta forma, a temperatura no núcleo de uma bobina, sendo maior do que na superfície da cabeça da mesma, exige do projetista uma boa estimativa da temperatura média dos condutores que formam o enrolamento. O ponto central da bobina, denominado 'ponto mais quente', pode ter temperatura muito superior aos condutores de superfície. É esta temperatura que é utilizada para estabelecer a capacidade de operação de um 'sistema isolante'. Atualmente, estão sendo empregados para a isolamento dos condutores magnéticos, materiais que enquadram-se nas seguintes 'classes de isolamento' [25] :

\* Classe B

\* Classe F

\* Classe H

A escolha de um intervalo de variação para a densidade de corrente para os CALs, é trabalho complexo, porque as Densidades Lineares de Corrente, nestes conversores, abrangem uma gama mais extensa. Por outro lado, a ventilação forçada pode ter eficiência maior, em face da configuração do conversor. Assim [25]:

$$3A/mm^2 \leq d_{fio} \leq 6A/mm^2 \quad (7.7)$$

Aplicando-se à equação (7.1) as equações (7.2) e (7.3), resulta:

$$R_L = \rho_S(\text{os}) \cdot \frac{N_F}{S_{fio}} \cdot (C + l_{cb}) \quad (7.8)$$

$$R_L = \rho_S(\text{os}) \cdot \frac{N_F}{I_F} \cdot d_{fio} \cdot (C + l_{cb}) \quad (7.9)$$

Sendo  $\bar{J}_{S1}$  a Densidade Linear de Corrente para um indutor, em seu valor eficaz, definida por:

$$\bar{J}_{S1} = 3 \frac{N_F \cdot I_F}{P \cdot t_p} \cdot K_{we} = \frac{\bar{J}_S}{2} \quad (7.9a)$$

estando a mesma, no intervalo [18]:

$$10.000 \text{ A/m} \leq \bar{J}_{S1} \leq 60.000 \text{ A/m} \quad (7.10)$$

Associando-se as equações (7.9) e (7.9a), resulta:

$$R_L = R_L(\text{os}) = \rho_S(\text{os}) \cdot \frac{d_{fio} \cdot \bar{J}_{S1} \cdot P \cdot t_p \cdot (C + l_{cb})}{3 \cdot I_F^2 \cdot K_{we}} \quad (7.11)$$

equação que permite o cálculo da resistência indutórica, por fase

e por indutor, estando as espiras e bobinas de uma fase conectadas em série. Ressaltar que  $\bar{J}_{s1}$  é a Densidade Linear de Corrente para um indutor, está representada em valor eficaz e vale  $\bar{J}_s/2$ , onde  $\bar{J}_s$  é a Densidade Linear de Corrente para o conversor, em valor eficaz expressa na equação (2.32).

### 7.3.2. ALTURA FICTÍCIA DA LAMINA DE CORRENTE DO INDUTOR

A altura fictícia da lâmina de corrente indutórica, de Densidade Linear de Corrente  $\bar{J}_{s1}$ , pode ser determinada a partir de:

$$h_B = \frac{\left[ \sum_{k=1}^n S_{Fk} \right] \cdot N_R}{p \cdot t_p} \quad (7.12)$$

onde  $\sum_{k=1}^n S_{Fk}$  é a soma das secções retas dos condutores ativos presentes em uma ranhura e  $N_R$  é o número de ranhuras que compõe um indutor. Ressaltar que o enrolamento de um CAL pode adquirir características próprias, podendo acontecer que nem todas as ranhuras estejam totalmente preenchidas, principalmente as ranhuras das extremidades de entrada e de saída. No caso de todas as ranhuras estarem igualmente preenchidas:

$$\sum_{k=1}^n S_{Fk} = 3 \cdot \frac{N_F \cdot S_{fio}}{N_R} \quad (7.13)$$

de onde:

$$h_B = \left[ \frac{3 \cdot N_F \cdot S_{fio}}{N_R} \right] \cdot \frac{N_R}{p \cdot t_p} \quad (7.14)$$

ou ainda:

$$hs = \left[ \frac{3 \cdot N_F \cdot S_{fio}}{P \cdot t_p} \right] \quad (7.15)$$

Sendo:

$$\bar{J}_{s1} = \left[ \frac{3 \cdot N_F \cdot I_F}{P \cdot t_p} \right] \cdot K_{we}$$

$$d_{fio} = \frac{I_F}{S_{fio}}$$

resulta:

$$hs = \left[ \frac{\bar{J}_{s1}}{d_{fio} \cdot K_{we}} \right] \quad (7.16)$$

equação que permite o cálculo da altura fictícia da lâmina de corrente do indutor. Tudo se passa como se uma lâmina de corrente, fictícia, com comportamento senoidal, cobrisse toda a superfície do indutor. Pode-se atribuir à referida lâmina, a seguinte expressão:

$$\bar{h}_s(x,t) = \left[ \frac{J_{s1M}}{d_{fio} \cdot K_{we}} \right] \cdot \cos \left[ \omega_s \cdot t - (\pi \cdot x) / t_p \right] \quad (7.17)$$

Ressaltar que a amplitude desta lâmina pode ser determinada aos primeiros passos do projeto, se for mantida a filosofia de 'corrente eficaz constante'.

### 7.3.3. RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DO LINOR, POR FASE

O estudo da resistência equivalente do linor, refletida no indutor, exige que se estabeleça uma série de hipóteses:

- i) Os CALs possuem linores laminares, executados em material condutor elétrico, não magnético, de espessura constante nas direções  $x$  e  $z$ ;
- ii) A resistividade volumétrica do material de que é feito o linor, varia com a temperatura e esta é uniforme em toda a região sob análise, em qualquer instante  $t$ ;
- iii) As correntes induzidas formam trajetórias em planos paralelos ao plano dos eixos  $x$  e  $z$  e estas trajetórias passam, inclusive, pelas abas do linor;
- iv) O número de pólos criado no linor é o mesmo dos indutores;
- v) O linor pode ser examinado como dotado de uma lâmina de corrente, função de  $x$ , e  $t$  e expressa por  $J_r(x,t)$ ;
- vi) As trajetórias das correntes induzidas, quando sob a projeção do indutor, são paralelas a direção do eixo  $z$ , e;
- vii) Nas abas do linor, as trajetórias das correntes

induzidas são paralelas a direção do eixo  $x$ .

### 7.3.3.1. ANÁLISE DA RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DO LINOR, POR FASE

Um linor, guardadas as devidas propriedades, pode ser examinado como um cilindro condutor elétrico, não magnético, percorrido por uma lâmina de corrente de altura (espessura)  $h_R$  e de Densidade Linear de Corrente  $\bar{J}_R$ . Para a presente análise, o entreferro, sede do linor, é residência de um Campo Magnético de Translação, produzido por um enrolamento indutórico de dois pólos. Em consequência, na lâmina linórica distribui-se a lâmina de corrente em três componentes, defasadas no espaço e no tempo de  $2\pi/3$  rad, como mostra a Figura 7.2.

No cilindro da Figura 7.2, tudo se passa como se seis condutores ativos (dois por fase) fossem percorridos por correntes elétricas de valor eficaz  $I_{FR}$ . A Densidade Linear de Corrente linórica, em seu valor eficaz, é ser expressa, por:

$$\bar{J}_R = \left[ \frac{3 \cdot N_{FR} \cdot I_{FR}}{p \cdot t_p} \right] \quad (7.18)$$

Para o presente estudo, o número de pólos é dois, assim como o número de condutores ativos do linor, no modelo por fase:

$$N_{FR} = 2_{p=2} \quad (7.19)$$

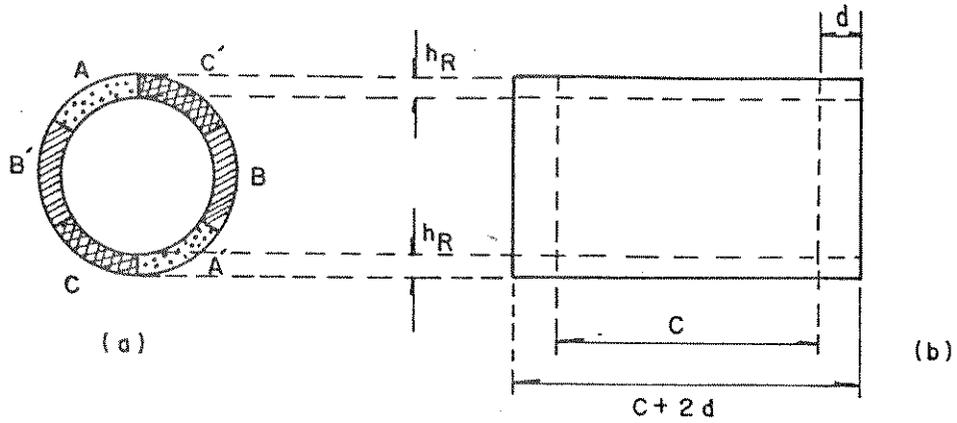


Figura 7.2: Vistas de Topo (a) e Lateral (b) do Cilindro Rotórico

Uma fase linórica tem resistência ôhmica  $R_2$ , expressa

por:

$$R_2 = \rho_V(OL) \cdot \frac{l_{FR}}{S_{FR}} \quad (7.20)$$

onde:

$$l_{FR} = 2 \cdot (C + l_{cb}_R) \quad (7.21a)$$

$$S_{FR} = h_R \left[ \frac{p \cdot t_p}{6} \right] \quad (7.21b)$$

Levando-se as equações (7.21) à equação (7.20):

$$R_2 = 12 \cdot \rho_V(OL) \left[ \frac{(C + l_{cb}_R)}{h_R (p \cdot t_p)} \right] \quad (7.22)$$

Definindo-se Resistividade Superficial de Corrente -

$\rho_R'(OL)$ , por:

$$\rho_R'(OL) = \frac{\rho_V(OL)}{hr}$$

obtém-se:

$$R_2 = 12 \cdot \rho_R'(OL) \left[ \frac{(C + lcb_R)}{P \cdot t_p} \right] \quad (7.23)$$

que expressa a resistência equivalente do linor, no modelo por fase.

#### 7.3.3.2. EFEITO PELICULAR

A lâmina linórica, operando em regime, é sede de correntes alternantes. Dado ser uma peça de espessura comparativamente grande, operando sob frequência  $f_L$ , menor do que a frequência do sinal de alimentação, porém, não desprezível em face do escorregamento ser elevado nestes conversores, deve-se levar em conta a distribuição anormal da corrente e a presença do Efeito Pelicular.

A resistividade da lâmina linórica é aumentada pela presença de variados efeitos e este aumento tem lugar no intervalo entre 1% e 10%, na região de operação dos referidos conversores. Representando-se a resistividade volumétrica do linor, antes da incidência do Efeito Pelicular, por  $\rho_V(OL)$ , e, após a incidência, por  $\bar{\rho}_V(OL)$ , escreve-se:

$$K_{SK} = \frac{\bar{\rho}_V(OL)}{\rho_V(OL)} \quad (7.24a)$$

com  $K_{SK} > 1,0$ .

O Fator  $K_{SK}$ , para conversores de dupla face, é calculado por [28]:

$$K_{SK} = \frac{K_{12}}{2} \left[ \frac{\sinh(K_{12}) + \sin(K_{12})}{\cosh(K_{12}) - \cos(K_{12})} \right] \quad (7.24b)$$

com:

$$K_{12} = hr/K\phi \quad K\phi = \frac{1}{\left[ 2 \cdot \mu_0 \cdot W_s \cdot s/\rho_V \right]^{1/2}} \quad (7.24c)$$

onde  $hr$  é a espessura do linor e  $K\phi$  um fator função do escorregamento  $s$  [28] [33].

Um elemento que tende a aliviar a incidência do Efeito Pelicular é a ausência de ferro no corpo linórico. Os valores alcançados por este efeito, podem ser vistos nas Tabelas 7.1 e 7.2. Um exame aos valores obtidos levará o projetista a introduzir ou não, a correção devida ao referido efeito.

hr	f	s	$\theta_L$	$K_{SK}$
mm	Hz	%	$^{\circ}C$	—
5,6	60	20	50	1,0002
12,2	60	20	50	1,0044
16,8	60	20	50	1,0157
22,4	60	20	50	1,0489
28,0	60	20	50	1,1158
33,6	60	20	50	1,2281

Tabela 7.1

hr	f	s	$\theta_L$	$K_{SK}$
mm	Hz	%	$^{\circ}C$	—
5,6	60	20	50	1,0002
5,6	120	20	50	1,0008
5,6	180	20	50	1,0018
5,6	240	20	50	1,0031
5,6	300	20	50	1,0049
5,6	360	20	50	1,0070

Tabela 7.2

As tabelas 7.1 e 7.2 trazem informações interessantes sobre o comportamento do fator  $K_{SK}$ . Quando o escorregamento e a frequência são mantidos e a espessura é gradativamente aumentada, o coeficiente característico do Efeito Pelicular, aumenta rapidamente. O mesmo comportamento não é encontrado quando o escorregamento e a espessura são mantidos constantes, variando-se a fre-

quência. A incidência do mencionado efeito, é muito mais presente, quando o linor ganha espessura. Esta constatação traz tranquilidade ao projetista, para projetos de CALs que operam em ampla banda de frequências.

### 7.3.3.3. INFLUENCIA DA TRAJETÓRIA DAS CORRENTES INDUZIDAS NO COMPORTAMENTO DA RESISTENCIA $R_z$

O cilindro condutor mostrado na Figura 7.2, é planificado e volta a ter a forma linórica, como mostra a Figura 7.3. Mantidas as regiões de corrente AA', BB' e CC', traça-se o caminhamento teórico de uma linha de corrente.

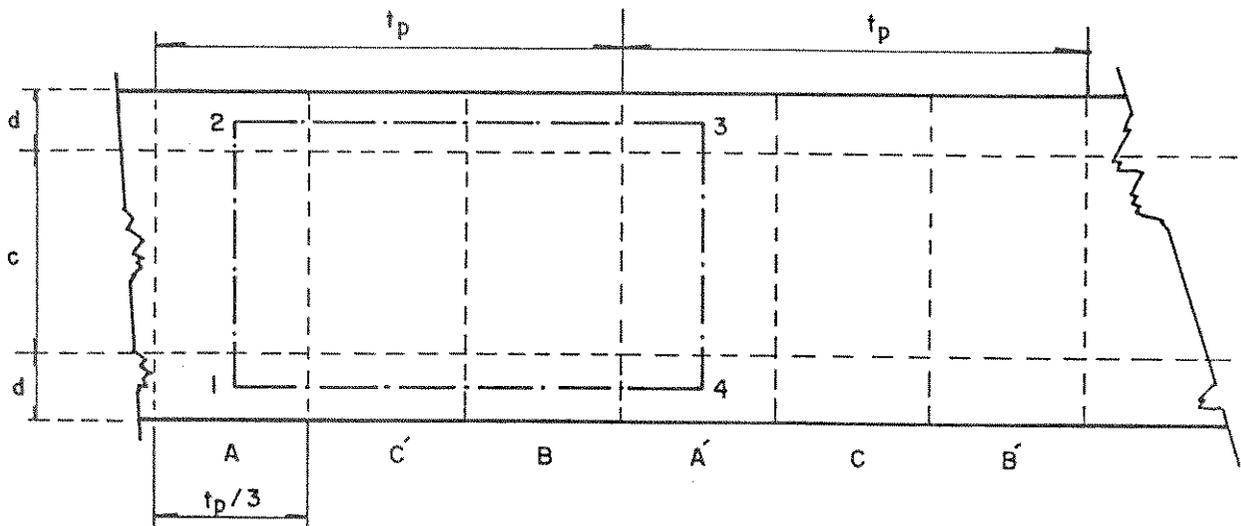


Figura 7.3: Lâmina Linórica Percorrida por Correntes, à semelhança de um Enrolamento discreto

A trajetória teórica de uma linha de corrente linórica é caracterizada por dois comprimentos ativos e dois comprimentos de "testa de bobina". A largura da aba do linor deve ser capaz de escoar corrente sem alterar a densidade superficial da mesma.

Uma inspeção à lâmina da Figura 7.3 mostra que, teoricamente, a aba deve ter a mesma secção reta do condutor e, portanto, sua largura deve ser:

$$d = t_p/3 \quad (7.24d)$$

A referência [9] propõe para largura máxima para a aba, valor calculado a partir de:

$$d = t_p/\pi \quad (7.25)$$

e explicita que a largura da aba não deverá exceder o valor assim calculado.

Adotando-se  $C$  como a largura do indutor, estabelece-se um fator auxiliar  $K_s$ , que relaciona:

$$K_s = \frac{C}{(C + l_{cb_R})} \quad (7.26)$$

ou ainda:

$$R_2 = 12 \cdot \left[ \frac{\rho_V(OL)}{K_s} \right] \cdot \left[ \frac{C}{P \cdot t_p \cdot h_R} \right] \quad (7.27)$$

isto é, tudo se passa como se a lâmina linórica possuísse largura  $C$  e resistividade superficial  $\bar{\rho}'_R(OL)$ , onde :

$$\bar{\rho}'_R(OL) = \frac{\rho_V(OL)}{K_s \cdot h_R} \quad (7.28)$$

Como o fator auxiliar  $K_6$  é menor do que a unidade, dado as hipóteses feitas em 7.3.3; a resistividade superficial  $\bar{\rho}'_R$  (OL) é numericamente maior do que  $\rho'_R$  (OL).

Diversos pesquisadores estudaram o assunto [4] [11] [17] [26] e propuseram equações para a correção do fenômeno a que se denomina Efeito Transversal de Borda. Neste trabalho, operar-se-á com fatores propostos por Bolton [11] e por Russell - Norsworthy [17], respectivamente,  $K_5$  e  $K_6$ , estudados nos Capítulos 4 e 5. O uso do fator  $K_5$  ou do fator  $K_6$  dependerá das características do conversor em projeto e do projetista. Simulação realizada para o conversor proposto na referência [23], forneceu os comportamentos mostrados na Figura 7.4.

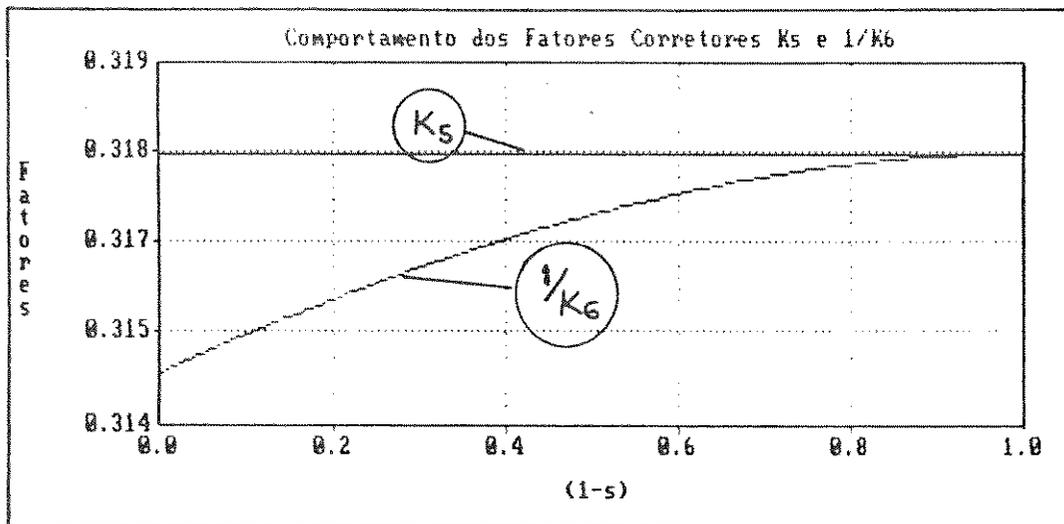


Figura 7.4: Comportamento dos Fatores  $K_5$  e  $K_6$  em função de  $(s)$

Aplicando-se a equação (7.28) à equação (7.27), -  
obtem-se:

$$R_z = 12 \cdot \bar{\rho}'_R \text{ (OL)} \cdot \frac{C}{p \cdot t_p} \quad (7.29a)$$

Se o Fator  $K_0$  for substituído por um fator mais burilado, como são os Fatores de Bolton e de Russell e levar-se em conta o Efeito Pelicular, a resistência  $R_z$  ganha maior precisão, e:

$$R_z = 12 \cdot \rho_R''(OL) \cdot \frac{C}{p \cdot t_p} \quad (7.29b)$$

#### 7.3.3.4. REFLEXÃO DA RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DO LINOR PARA O INDUTOR, 'POR FASE'

A semelhança dos transformadores, os CARs E CALs podem ter os seus parâmetros elétricos refletidos de um membro para o outro. Para o presente estudo, o indutor será o membro a receber o reflexo:

$$R'_z = R_z \left[ \frac{N_F \cdot K_{we}}{N_{FR}} \right]^2 \quad (7.30)$$

A equação (7.19) explicita que, para um conversor de dois pólos,  $N_{FR} = 2$ . Estudo semelhante ao realizado, pode ser feito para conversores de  $p$  pólos e resultados finais idênticos, serão obtidos.

$$R'_z = 12 \cdot \rho_R''(OL) \cdot \frac{C}{p \cdot t_p} \cdot \left[ \frac{(N_F \cdot K_{we})}{2} \right]^2$$

ou ainda:

$$R'_z = 3 \rho_R''(OL) \cdot \left[ \frac{C \cdot (N_F \cdot K_{we})^2}{p \cdot t_p} \right] \quad (7.31)$$

equação que permite calcular o valor da resistência equivalente do linor, 'por fase', e por estator ativo, refletida no indutor, considerando-se os Efeitos Transversal de Borda e Pelicular.

#### 7.3.3.5. ANALISE

A resistividade superficial do linor -  $\rho'_R$  (OL) - deve ser trabalhada de forma a absorver a presença dos Efeitos Transversal de Borda e Pelicular. Esta absorção é um delicado problema. Outro problema cresce com o anterior - as correntes induzidas na lâmina linórica fluem, não somente na direção z, dentro da região do entreferro, porém, também, na direção x. Uma parcela da corrente linórica fecha trajetórias dentro da região do entreferro. A não uniforme distribuição da corrente linórica e do fluxo magnético, ao longo da direção z, são os geradores do Efeito Transversal de Borda e do Efeito Pelicular.

Quando o linor está parado em relação ao indutor, o Efeito Longitudinal de Extremidade tem participação desprezível, como é possível observar pela equação (4.6), do Capítulo 4. Por outro lado, os Efeitos Transversal de Borda e Pelicular se fazem presentes a qualquer velocidade do linor; segundo Russell [17], a atuação do Efeito Transversal de Borda independe do escorregamento. Por outro lado, Bolton [11] demonstra que o referido efeito varia com o escorregamento. Yamamura [4] enfatiza que o Efeito Transversal de Borda influencia na resistividade da lâmina linórica e, conseqüentemente, no desempenho do conversor.

Sintetizando, os Efeitos Transversal de Borda e Lon-

gitudinal de Extremidade, influem um no outro e uma solução rigorosa pode ser obtida, somente, a partir de uma análise tridimensional. Porém, uma boa aproximação pode ser conseguida, tratando-se separadamente os efeitos e superpondo os resultados [4].

A equação (2.15), proposta pela referência [17], traz em seu denominador o termo  $(\operatorname{tgh}(\pi \cdot d/t_p))$ . Este termo aproxima-se da unidade, assintoticamente e aumenta muito lentamente após o argumento  $(\pi \cdot d/t_p)$  alcançar valores maiores do que 1,3. Assim, o parâmetro deve operar como limite superior [4] (para a determinação da largura da 'aba' do linor):

$$(\pi \cdot d/t_p) \leq 1,3$$

$$d \leq 1,3 \cdot (t_p/\pi) \quad (7.32)$$

A referência [9], propõe para  $d$ , o valor limite:

$$d_{\text{limite}} = (t_p/\pi) \quad (7.33)$$

garantindo que valores superiores a esse, não conduzem a CALs de melhores comportamentos.

A referência [23], usando a equação (2.15) e adotando  $d = (t_p/\pi)$  encontrou valores bastante satisfatórios para força propulsora e rendimento reais. Yamamura [4] desaconselha adotar valores para  $d$  superiores a  $0,4 \cdot t_p$ . Como se pode observar, a determinação da largura da 'aba' do linor é complexa.

#### 7.3.4. REATANCIA DE MAGNETIZAÇÃO DOS CALs, PARA O MODELO `POR FASE`

Dado o espesso entreferro empregado nos CALs, uma considerável parte da energia entregue ao mesmo, está armazenada na forma de um campo magnético, no entreferro do referido. O estudo que se desenvolve, parte do princípio que as densidades de campo magnético envolvidas, não apresentam intensidades que possam saturar qualquer região dos estatores, isto é, os circuitos magnéticos envolvidos, são magneticamente lineares. Esta propriedade permite que se trabalhe com um ou dois estatores ativos, indiferentemente.

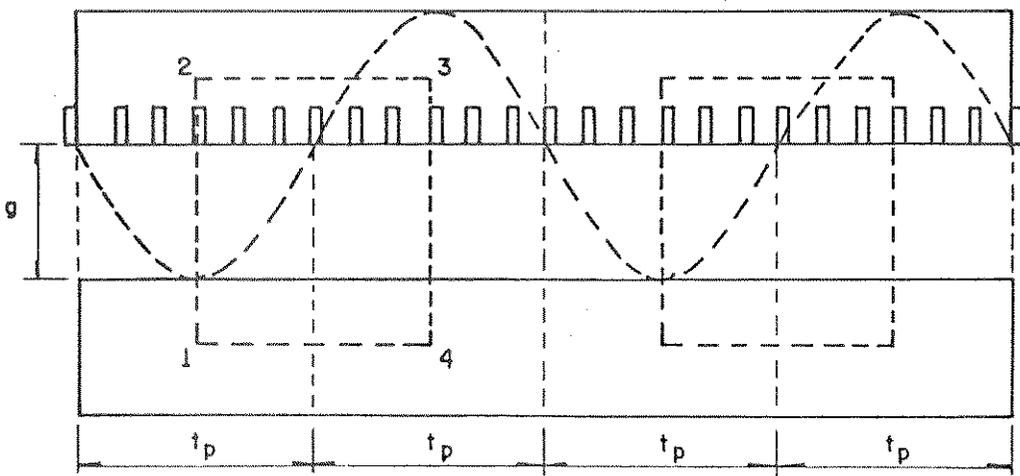


Figura 7.5: Vista Lateral de um CAL de Duplo Estator Magnético e Simple Estator Elétrico

A Figura 7.5 mostra que o estudo pode ser mais facilmente aplicado a um conversor com número par de pólos, porém, as equações obtidas são adequadas a qualquer número de pólos - par ou impar - como se pode observar ao longo dos Capítulos anteriores.

Conservadas as hipóteses feitas ao longo deste trabalho, pode-se afirmar que as forças magnetomotrizes envolvidas, para que o fluxo magnético percorra a trajetória 1,2,3,4,1 assinalada na Figura 7.5, tem como expressão:

$$F_{max} = 2 \cdot N_p \cdot I_{mag_M} = R_r(g) \cdot \Phi_{p_M} \quad (7.34)$$

onde  $N_p$  caracteriza o número de espiras ficticiamente concêntricas, mecanicamente ajustadas, que produzem a onda de força magnetomotriz polar. Em relação ao enrolamento real, disposto nas ranhuras do indutor, sustenta-se:

$$N_p = \frac{3 (N_F \cdot K_{we})}{\pi \cdot p} \quad (7.35)$$

onde  $N_F$  é o número de condutores ativos conectados em série, em uma fase, por indutor.

A relutância magnética oferecida pela trajetória assinalada, é expressa por:

$$R_r(g) = 2 \cdot \left[ \frac{g_r}{\mu_0 \cdot t_p \cdot C} \right] \quad (7.36)$$

onde  $g_r$  caracteriza o entreferro corrigido, respeitados os efeitos da presença das ranhuras indutóricas e dispersão de campo magnético.

O fluxo magnético que deixa uma região polar, é expresso, em seu valor médio, por:

$$\Phi_P = B_{AV} \cdot C \cdot t_p \quad (7.37)$$

onde  $B_{AV}$  representa a Densidade de Campo Magnético média, ao longo de um passo polar. A densidade média  $B_{AV}$  se relaciona com o valor máximo de uma distribuição senoidal, por:

$$B_{AV} = (2/\pi) \cdot B_M \quad (7.38)$$

Transportando o valor da relutância magnética da trajetória, para a equação (7.34), obtém-se:

$$F_{max} = 2 \frac{3}{\pi} \cdot \left[ \frac{(N_F \cdot K_{We})}{P} \right] \cdot I_{mag_M}$$

$$F_{max} = \frac{2 \cdot g_T}{\mu_0 \cdot t_p \cdot C} \cdot \Phi_{PM}$$

Associando equações:

$$\frac{3}{\pi} \cdot \left[ \frac{(N_F \cdot K_{We})}{P} \right] \cdot I_{mag_M} = \frac{g_T}{\mu_0 \cdot t_p \cdot C} \cdot B_M \cdot t_p \cdot C$$

Isolando-se a corrente de magnetização, obtém-se:

$$I_{mag_M} = \frac{g_T \cdot B_M \cdot \pi \cdot P}{3 \cdot \mu_0 \cdot (N_F \cdot K_{We})} \quad (7.39)$$

No Capítulo 3, demonstrou-se que a força eletromotriz induzida em um condutor ativo, tem como expressão:

$$E = 2 K_F \cdot \Phi_P \cdot f \quad (3.62)$$

e que o Fator de Forma para uma onda senoidal, vale:

$$K_F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad (3.63)$$

Associados, fornecem:

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \phi_p \cdot f$$

Se a fase do enrolamento possuir  $N_F$  condutores ativos dispostos em ranhuras:

$$E_F = \left[ \frac{\pi}{\sqrt{2}} \right] \cdot (N_F \cdot K_{We}) \cdot B_{av} \cdot t_p \cdot C \cdot f$$

ou ainda:

$$E_{FM} = \pi \cdot (N_F \cdot K_{We}) \cdot B_{av} \cdot t_p \cdot C \cdot f$$

A reatância de magnetização forma um ramo paralelo com a resistência equivalente às perdas no ferro e ambas são submetidas a uma tensão  $V_1 = E_F$ .

$$X_{mag} = \frac{E_F}{I_{mag}} = \frac{E_{FM}}{I_{mag_M}}$$

ou ainda:

$$X_{mag} = \frac{\pi \cdot (N_F \cdot K_{We}) \cdot B_{av} \cdot t_p \cdot C \cdot f}{\left[ \frac{g_T \cdot B_M \cdot \pi \cdot p}{3 \cdot \mu_0 \cdot (N_F \cdot K_{We})} \right]}$$

(7.40)

$$X_{mag} = \left[ \frac{3 \cdot (N_F K_{we})^2 \cdot \tau_p \cdot C \cdot f}{g_T \cdot p} \right] \cdot \left[ \frac{B_{av} \cdot \mu_0}{(B_{av} \cdot \pi/2)} \right]$$

de onde:

$$X_{mag} = \frac{6 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \tau_p \cdot C \cdot (N_F \cdot K_{we})^2}{\pi \cdot g_T \cdot p} \quad (7.41)$$

equação que permite a determinação da reatância de magnetização de um conversor de dois estatores magnéticos e um elétrico, levando em consideração a presença das ranhuras e dispersão indutóricas.

A equação (2.3) mostra que a Velocidade do Campo de Translação é função do passo polar e da frequência do sinal de alimentação do indutor. Portanto, a colocação de um ou dois indutores elétricos, não altera a referida velocidade. Examinando-se a equação (7.41), constata-se que, adotando-se  $N_F$  como o número de condutores ativos por indutor e por fase e trabalhando-se com dois indutores conectados em série, resulta:

$$X_{mag_D} = 4 X_{mag} \quad (7.42)$$

sendo  $X_{mag}$ , a reatância de magnetização para um indutor elétrico e  $X_{mag_D}$ , para dois indutores elétricos ou para CALs de Dupla Face Ativas.

### 7.3.5. O FATOR DE QUALIDADE REALÍSTICO E SUA PRESENÇA MO ESTUDO DOS CALs

No Capítulo 2 estudou-se o Fator de Qualidade descrito por Laithwaite [13]. Esta proposição do referido pesquisador, pode ser realizada em direção a qualquer conversor assíncrono e permite ou assimila as realidades do conversor como, por exemplo, presença de ranhuras, dispersão de fluxo, Efeito Transversal de Borda, Efeito Pelicular, ou seja, o Fator de Qualidade, originalmente proposto -  $G_L$  - pode ser tornado real, atendendo as particulares propriedades do conversor em estudo.

Assim, a forma como o referido fator está proposto na equação (2.15), forma originalmente proposta por Laithwaite, diz respeito a um conversor com características idealizadas. À medida que o conversor vai evoluindo para sua forma real, suas peculiaridades são introduzidas na fundamental equação (2.13) e o fator torna-se realístico (para o conversor sob análise). Portanto, a única expressão definida, é a (2.13). As demais, com qualquer nome que vierem a portar, são conseqüências, muitas vezes desenvolvidas para atender a um conversor ou a uma família de conversores com características semelhantes. A equação (2.42) está pronta para atender a um CAL de um ou dois estatores elétricos, que possua:

- Ranhuras Indutóricas (Fator  $K_c$ )
- Dispersão de Fluxo (Fator  $K_L$ )
- Efeito Transversal de Borda (Fator  $K_s$  ou Fatores  $K_s$  e  $K_\sigma$ )
- Efeito Pelicular (Fator  $K_{SK}$ )

$$G = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot w_s}{\rho_R \cdot \Pi^2 \cdot g_T} \quad (7.43)$$

(2.41)

Se o conversor puder ter sua reatância de dispersão de linor desprezada, é válida a relação:

$$G = \frac{X_{mag}}{R'z} \quad (7.44)$$

que é a associação das equações (7.31) e (7.41), aplicadas ao conceito fundamental de Fator de Qualidade. A designação real, realístico, corrigido ou qualquer outra, em face das considerações feitas acima, perde importância. Basta, isto sim, que um campo de hipóteses realístico seja efetivado e o Fator de Qualidade emerge, automaticamente, a partir da equação (7.44), dado que  $X_{mag}$  e  $R'z$  contém todas as realidades do conversor, a menos do Efeito Longitudinal de Extremidade.

Aplicando-se (7.44) resulta em um Fator de Qualidade adaptado ao campo de hipóteses desenvolvido para este trabalho, porém, totalmente dinâmico, podendo adaptar-se a qualquer conversor assíncrono - rotativo convencional, rotativo setorial e linear.

$$G = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot W_m}{\rho'_R(OL) \cdot \Pi^2 \cdot g_T} \quad (7.45)$$

A resistividade  $\rho'_R(OL)$  foi gerada em (7.28), quando desenvolveu-se o Fator  $K_R$ . Os Fatores Corretores de Russell - Norgworthy e de Bolton, são mais precisos do que  $K_R$ , pois este é um fator puramente geométrico, que leva em conta a existência da aba do linor, somente. Os referidos Fatores, além de levarem em conta a existência da aba do linor, também admitem a distribuição anormal da corrente na lâmina linórica, sob a influência do indu-

tor. Por tudo, uma expressão substituta para a (7.28), é:

$$\rho_R'' = \frac{\rho_V (OL)}{K_s \cdot hr} \cdot K_{SK} \quad (7.46)$$

ou:

$$\rho_R'' = \frac{\rho_V (OL)}{hr} \cdot K_\sigma \cdot K_{SK} \quad (7.47)$$

### 7.3.6. REATANCIA DE DISPERSAO DO INDUTOR

A importância da reatância de dispersão do estator ou do enrolamento estatórico, é presente em todas as máquinas de corrente alternada - síncronas e assíncronas - e, particularmente, nos conversores lineares, dado estes trabalharem com entrefeirros relativamente grandes.

A semelhança dos transformadores, a reatância de dispersão de um CAL deve ser creditada àquela parcela do fluxo magnético produzido pela força magnetomotriz indutórica que não chega ao linor. Nos CALs, de forma diferenciada, normalmente não se leva em conta a reatância de dispersão do linor se este operar com lâmina contínua, não possuindo a particular forma de escada (Ladder), semelhante à empregada nas gaiolas de esquilo.

Salvo esta semelhança primária, que é aplicada a motores e transformadores, os CALs de linor laminar diferem, consideravelmente, dos transformadores e CARs convencionais e guardam grande semelhança com os CARs de linor laminar - conversor de rotor

em caneca (Cup).

O enrolamento indutórico pode possuir uma ou duas camadas, passo completo ou fracionário. Por outro lado, um CAL pode apresentar um ou dois estatores eletricamente ativos, dando ao fluxo de dispersão uma particular característica.

Retomar-se-á o estator ativo e trabalhar-se-á com enrolamentos onde  $q$  é um número inteiro, com passo pleno ou encurtado, de forma a poder-se admitir uma força magnetomotriz senoidalmente distribuída ao longo de um passo polar completo. Os harmônicos espaciais não serão envolvidos porque o Efeito Longitudinal de Extremidade é, potencialmente, mais perturbador que as presenças dos 5º e 7º harmônicos e também porque um deles pode ser minimizado com a técnica de encurtamento de passo.

Assim, quando do projeto do conversor, o primeiro item a ser examinado, relaciona-se às características do enrolamento a ser aplicado ao indutor. Isto posto, o pesquisador determina o Fator de Enrolamento -  $K_w$  - para o conversor.

Para os CALs de estator eletricamente ativo e litor laminar, pode-se destacar três formas distintas de dispersão:

- Dispersão nas ranhuras do indutor
- Dispersão nas partes frontais das bobinas
- Dispersão diferencial

## 7.3.6.1. REATANCIA DE DISPERSÃO NA REGIÃO DAS RANHURAS

Considere-se um enrolamento de duas camadas, de passo pleno e um pacote indutório dotado de ranhuras semi-fechadas, com o desenho mostrado na Figura 7.6. Como o enrolamento é de passo pleno, os feixes de condutores A1 e A2, que ocupam a mesma ranhura, pertencem a mesma fase e, portanto, conduzirão idênticas correntes (conexão de condutores em série, por fase).

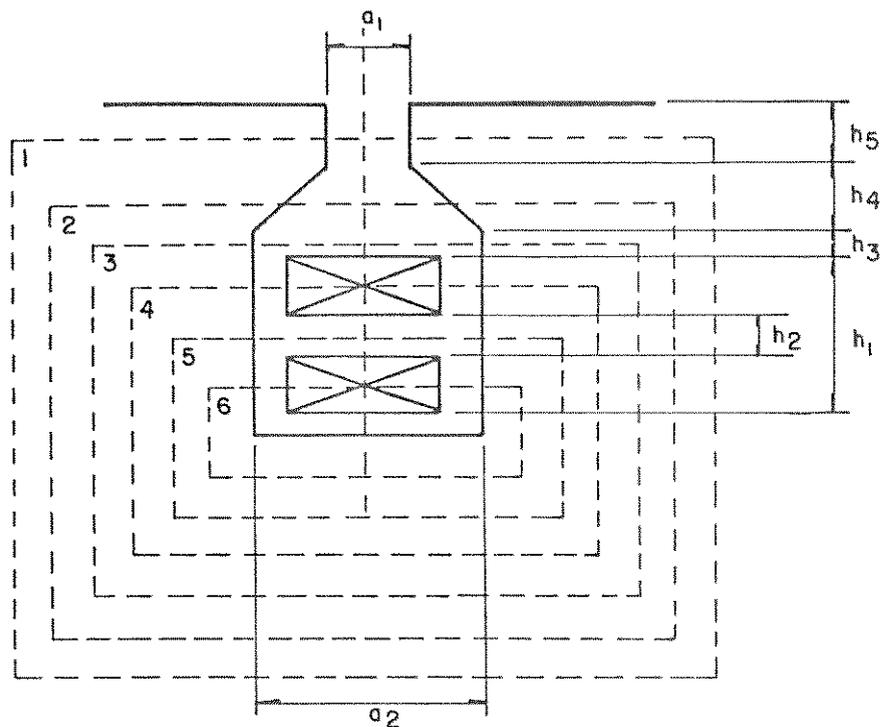


Figura 7.6: Fluxo de dispersão em uma ranhura do Indutor.

A força magnetomotriz das correntes nas ranhuras estabelecerá um fluxo de dispersão que se distribuirá pelos seis caminhos identificados na Figura 7.6. Se ficar convencionalizado que cada caminho estabelece seu fluxo magnético parcial e que a relutância oferecida pelo núcleo de ferro é desprezível em comparação com a do ar ou dos materiais não magnéticos que preenchem o espaço da ranhura, escreve-se:

I - A permanência específica do caminho 1:

$$\lambda_1 = \left[ \mu_0 \cdot h_5 \cdot C/\epsilon_1 \right] \cdot (2 \cdot z)^2$$

II - A permanência específica do caminho 2:

$$\lambda_2 = \mu_0 \cdot h_4 \cdot C \cdot \left[ \frac{2}{a_1 + a_2} \right] \cdot (2 \cdot z)^2$$

III - A permanência específica do caminho 3:

$$\lambda_3 = \left[ \mu_0 \cdot h_3 \cdot C/\epsilon_2 \right] \cdot (2 \cdot z)^2$$

IV - A permanência específica do caminho 5:

$$\lambda_5 = \left[ \mu_0 \cdot h_2 \cdot C/\epsilon_2 \right] \cdot (z)^2$$

V-As permanências dos caminhos 4 e 6 devem ser estudadas de forma diferente, porque passam pelo seio das bobinas:

$$\lambda_4 = \int_0^{1/2(h_1-h_2)} \mu_0 \cdot \frac{C}{a_2} \left[ z + \frac{2 \cdot x \cdot z}{(h_1 - h_2)} \right]^2 dx$$

de onde:

$$\lambda_4 = \left[ \mu_0 \cdot \frac{C}{a_2} \right] \cdot \left[ \frac{7 (h_1 - h_2)}{6} \right] \cdot (z)^2$$

$$\lambda_6 = \int_0^{1/2(h_1-h_2)} \mu_0 \cdot \frac{C}{a_2} \cdot \left[ \frac{2 \cdot y \cdot z}{(h_1 - h_2)} \right]^2 dy$$

de onde:

$$\lambda_{\sigma} = \left[ \mu_0 \cdot \frac{C}{8z} \right] \cdot \left[ \frac{(h_1 - h_2)}{6} \right] \cdot (z)^2$$

onde  $z$  caracteriza o número de condutores existente em um feixe de condutores imerso em uma ranhura. Sendo  $3.N_F$  o número total de condutores ativos presentes no enrolamento indutório e  $N_R$  o número de ranhuras do indutor, resulta:

$$z = \left[ (3.N_F)/(2.N_R) \right] \quad (7.48)$$

se o enrolamento for de dupla camada. Por outro lado, o número de ranhuras é calculado, por:

$$N_R = 3 \cdot p \cdot q \quad (7.49)$$

para um indutor trifásico. Levando-se a equação (7.49) à equação (7.48), obtém-se:

$$z = 3 \cdot N_F \cdot \left[ \left[ 2 \cdot 3 \cdot p \cdot q \right] \right]^{-1} \quad (7.50)$$

ou ainda:

$$z = N_F \cdot \left[ 2 \cdot p \cdot q \right]^{-1} \quad (7.51)$$

A reatância de dispersão na região das ranhuras, envolve todas as ranhuras de uma fase, isto é,  $(p \cdot q)$  ranhuras.

Assim:

$$\begin{aligned} X_R &= 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot p \cdot q \cdot \left[ \sum_{k=1}^6 \lambda_k \right] \\ \bar{X}_R &= 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot p \cdot q \cdot \left[ \mu_0 \cdot C \cdot z^2 \right] \cdot \\ &\cdot \left[ 4\bar{\lambda}_1 + 4\bar{\lambda}_2 + 4\bar{\lambda}_3 + \bar{\lambda}_4 + \bar{\lambda}_5 + \bar{\lambda}_6 \right] \end{aligned} \quad (7.52)$$

onde:

$$\begin{aligned} A &= \left[ 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot p \cdot q \cdot \mu_0 \cdot C \right] \cdot \left[ \frac{N_F}{2 \cdot p \cdot q} \right]^2 \\ A &= 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot C \cdot N_F^2 \cdot \left[ 4 \cdot p \cdot q \right]^{-1} \end{aligned} \quad (7.53)$$

e

$$\begin{aligned} B &= 4 \cdot \left[ \frac{h_5}{a_1} + \frac{2 h_4}{(a_1 + a_2)} + \frac{h_3}{a_2} + \frac{7(h_1 - h_2)}{24 a_2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{h_2}{4 a_2} + \frac{(h_1 - h_2)}{24 a_2} \right] \end{aligned} \quad (7.54a)$$

Operando a equação (7.54a):

$$B = 4 \cdot \left[ \frac{h_5}{a_1} + \frac{2 h_4}{(a_1 + a_2)} + \frac{h_3}{a_2} + \frac{h_1}{3 a_2} - \frac{h_2}{12 a_2} \right] \quad (7.54b)$$

$$B = 4 \cdot \bar{\lambda}_R \quad (7.54c)$$

Concluindo:

$$\chi_R = \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot C \cdot N_F^2}{p \cdot q} \right] \cdot \left[ \bar{\lambda}_R \right] \quad (7.55)$$

equação que permite a determinação da reatância de dispersão, na região das ranhuras.

### 7.3.6.2. REATANCIA DIFERENCIAL DE DISPERSÃO

A reatância diferencial é caracterizada por ser proporcional ao fluxo magnético de dispersão que, deixando um dente estatórico, percorre o espaço no entreferro, de forma tangencial à lâmina linórica e penetra no dente seguinte, formando um zig-zag no espaço compreendido entre o indutor e a lâmina linórica, sem, contudo, penetrar na mesma. A reatância diferencial é função da abertura  $a_1$  da ranhura e da espessura corrigida do entreferro, levando-se em conta a presença das ranhuras [6].

A permeância específica da dispersão diferencial, é calculada por:

$$\bar{\lambda}_D = \left[ \frac{5 \cdot \mu_0}{a_1} \right] \cdot \left[ 5 + \left[ \frac{4 \cdot \mu_0}{a_1} \right] \right]^{-1} \quad (7.56)$$

é:

$$\chi_D = \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot C \cdot N_F^2}{p \cdot q} \right] \cdot \left[ \bar{\lambda}_D \right] \quad (7.57)$$

expressão que permite a determinação da reatância diferencial de dispersão a partir dos parâmetros mecânicos e elétricos do conversor. A equação (7.57) é confirmada pela referência [27].

## 7.3.6.3. REATANCIA DE DISPERSAO NAS TESTAS DE BOBINAS

Os enrolamentos possuem bobinas e estas possuem condutores ativos de comprimento  $C$  e testas com comprimentos que podem ser maiores que os próprios comprimentos dos condutores ativos. Estas testas estão circundadas por fluxo magnético comum a todas elas, fluxo este que, em sua maior parte, circula pelo ar. Uma parte deste fluxo fecha trajetórias onde existe parte de ar e parte de ferro; outra parte fecha trajetórias pelo ar unicamente, como mostra a Figura 7.7. Por outro lado, os campos de dispersão das outras fases do enrolamento influem também sobre os fluxos das testas de bobinas da fase em estudo. Assim, não se trata de uma autoindutância pura, o que faz com que seu cálculo seja extremamente complexo [27].

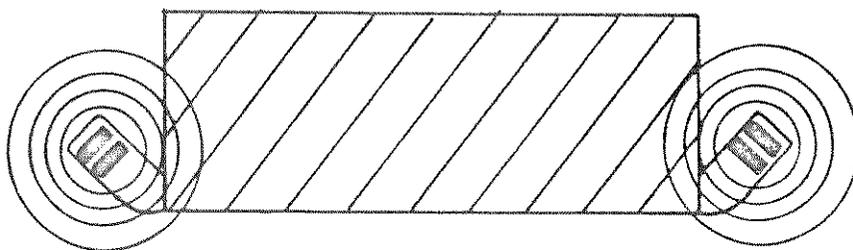


Figura 7.7: Fluxo de Dispersão de Testas de Bobina

A referência [6] fornece, para o cálculo da reatância de dispersão de cabeça de bobina, a expressão:

$$X_F = \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot C \cdot N_F^2}{P \cdot q} \right] \cdot \left[ \frac{q}{C} \cdot P_F \right] \quad (7.58)$$

$$P_F = t_p \cdot \left[ 0,3 \cdot \left( 3 \cdot \beta_e - 1 \right) \right] \quad (7.59)$$

onde  $\beta_e$  é o coeficiente de redução do passo do enrolamento.

A reatância total, no modelo por fase, vale:

$$X_A = X_R + X_D + X_F \quad (7.60)$$

### 7.3.7. FORÇA PROPULSORA TEÓRICA

A força propulsora teórica de um CAL pode ser determinada a partir de:

$$f_{xr} = 3 \cdot \left[ \frac{R'z}{s \cdot V_{sx}} \right] \cdot (I'z)^2 \quad (7.61)$$

Se, na determinação de  $R'z$ , estiver incorporado o Fator de Correção  $K_s$  ou  $1/K_s$ , as forças propulsoras oriundas da equação (7.61), já estarão corrigidas com relação à presença do Efeito Transversal de Borda. Se estiver incorporado  $K_{SK}$  o Efeito Pelicular já estará compensado.

Desenvolvendo-se a equação (7.61), obtém-se:

$$f_{xr} = \left[ \frac{3}{s V_{sx}} \right] \cdot \left[ \frac{3 \cdot C \cdot \rho' \cdot (OL) \cdot (K_{we} \cdot N_F)^2}{p \cdot t_p} \right] \cdot (I'z)^2 \quad (7.62)$$

Demonstrou-se, que:

$$I_F^2 = \frac{(I'z)^2}{\left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot G)^2} \right]} \quad (7.63)$$

e:

$$\bar{J}_s = 3 \cdot \left[ \frac{N_{FF} \cdot I_F}{p \cdot t_p} \right] \cdot K_{We} \quad (2.32)$$

Levando-se as equações (7.63) e (2.32), à equação (7.62), e ressaltando que  $N_{FF} = 2 \cdot N_f$ , obtém-se:

$$f_{XT} = \frac{\rho'_R(OL) \cdot C \cdot p \cdot \bar{J}_s^2}{\left[ 2 \cdot f \cdot s \left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot G)^2} \right] \right]} \quad (7.64)$$

equação que permite a determinação da força propulsora teórica Com o emprego de  $\rho'_R$  e  $G$ , obtém-se valores para  $f_{XT}$  onde a distribuição não homogênea de corrente linórica, os efeitos da presença das ranhuras no indutor, Pelicular e dispersão de fluxo, estão compensados:

$$G = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot W_0}{\rho'_R(OL) \cdot \Pi^2 \cdot g_T} \quad (7.65)$$

### 7.3.8. LARGURA DO INDUTOR

Os CARs tem as dimensões do rotor ligadas a parâmetros como velocidade tangencial, comprimento e diâmetro ideais. Estabelece-se, para aqueles, uma relação ideal entre o comprimento e o diâmetro. Para o rotor ideal:

$$D_d = L_d$$

O comprimento ideal -  $L_{id}$  - do rotor do conversor rotativo, representa a largura -  $C$  - do CAL. Por outro lado, o passo polar se relaciona com o diâmetro, naqueles, por:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{P}$$

Reunidas as equações, resulta:

$$t_p = \frac{\pi \cdot C}{P} \quad (7.66)$$

ou ainda:

$$C = P \cdot \left[ \frac{t_p}{\pi} \right] \quad (7.67)$$

equação que permite determinar a largura de um CAL a partir de parâmetros mecânicos do mesmo. Como o passo polar está ligado à Velocidade Linear Síncrona, a largura do conversor é função linear do número total de pólos. Se, por um lado, estabeleceu-se um compromisso entre a largura do indutor, o passo polar e o número de pólos, por outro lado, pode-se admitir  $C$  como uma variável livre, função do conversor em projeto. Ressaltar que as dimensões do conversor apresentam certo grau de liberdade. Se o projetista não atender a equação (7.67) e adotar um valor para  $C$  que seja ou esteja ligado a compromissos outros, tais como, limitação da largura  $C'$  do línor, limite do comprimento do conversor, as variáveis escolhidas serão reunidas na equação (7.64), equação que permite grande flexibilidade, dado a presença da Densidade Linear de Corrente, que é escolhida num intervalo de limites bem amplos.

## 7.3.9. ALTURA MÍNIMA DA COROA DO INDUTOR

Denomina-se Coroa do Indutor à região do núcleo do indutor colocada acima das ranhuras. Esta região, nos conversores rotativos síncronos ou assíncronos, trabalha com fluxo magnético a densidade eficaz constante e toda a coroa, no seu sentido longitudinal, é solicitada pelo fluxo durante a operação do conversor. Nos CALs, a solicitação da coroa está ligada ao número de pólos do referido. Número de pólos par leva a coroa do indutor a particular desenho, como mostra a Figura 3.9, do Capítulo 3.

Ali, demonstrou-se que CALs com número par de pólos, tem a altura de sua coroa calculada segundo a equação (3.53).

$$h_c = \left[ \frac{2 \cdot t_p}{\pi} \right] \cdot \left[ \frac{B_M(s=0)}{B_{CM}(s=0)} \right] \quad (3.53)$$

A Densidade Máxima de Campo no entreferro do CAL é calculada segundo a equação (6.21) e a condição de maior exigência para a coroa, ocorre para  $s$  tendendo para zero:

$$B_M(s=0) = J_M \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g_T \cdot \pi} \right] \quad (7.68)$$

Observando-se que os CALs possuem entreferros, geralmente muito maiores que os dos CARs convencionais, a Densidade de Campo Magnético  $B_M(s=0)$  é relativamente pequena, só alcançando valores iguais a 0,8 T, para Densidades Lineares de Corrente muito altas. A Figura 7.8 mostra o comportamento de  $B_M(s=0)$ , função de  $J_M$ , para um particular conversor.

A equação (7.68) somente não leva em conta o Efeito Longitudinal de Extremidade. Este efeito só é preocupante na extremidade longitudinal de entrada do indutor, dado a elevada intensidade da Onda de Extremidade de Entrada. Ocorre que este efeito atua no sentido de reduzir a densidade de campo na referida extremidade, o que, indiretamente, atinge a coroa do indutor, beneficiando-a.

O Efeito Transversal de Borda altera a distribuição de densidade de campo na direção transversal e sua atuação é no sentido de reduzir-la, como mostra a Figura (7.9), em levantamento feito por C.M.P. Cabrita [6].

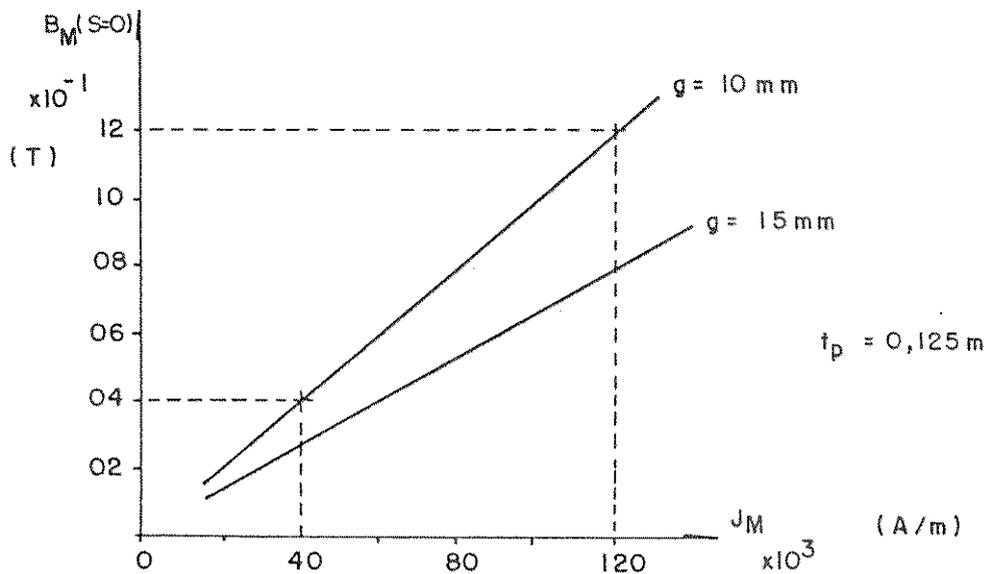
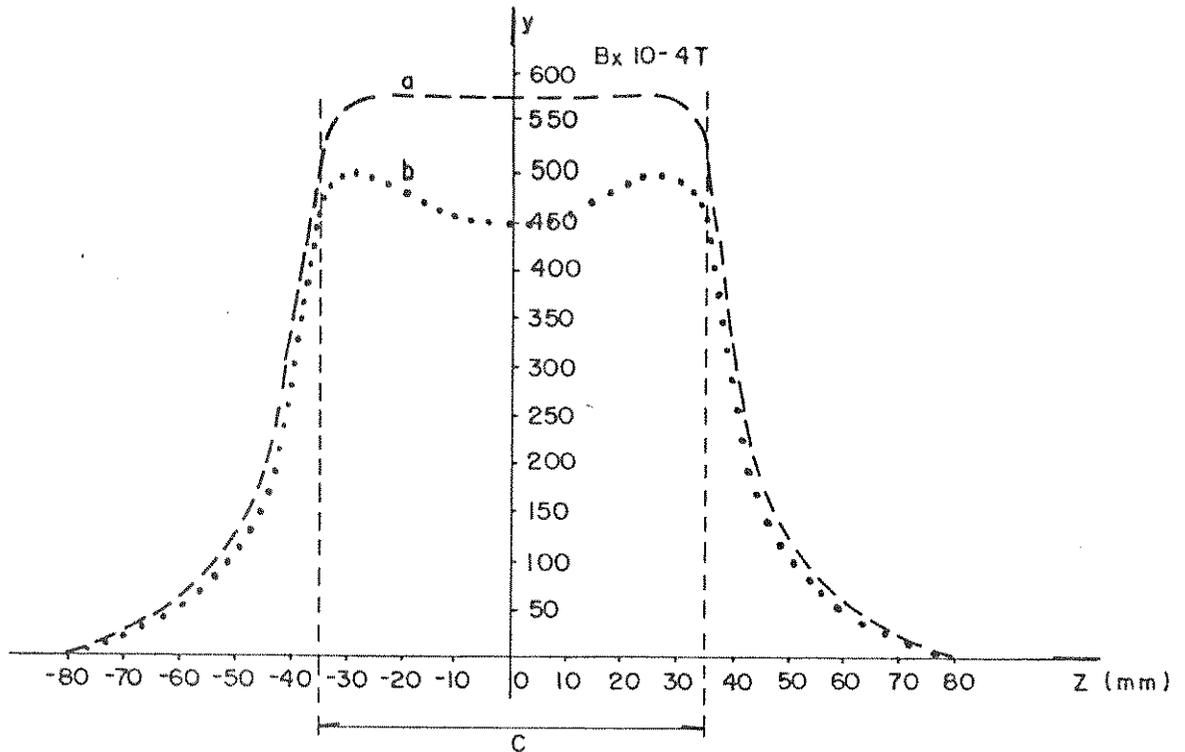


Figura 7.8: Comportamento da Densidade de Campo Magnético para CALs de Duplo Estator Elétrico



curva a: Ausência total dos Efeitos de Extremidades

curva b: Presença dos Efeitos a Linor Bloqueado

Figura 7.9: Comportamento da Densidade de Campo segundo o plano transversal ao comprimento do Conversor

Ressaltar que as curvas a e b da Figura 7.9, foram obtidas por C. M. P. Cabrita, experimentalmente, usando um simulador. A curva a foi obtida com os indutores energizados e sem a lâmina linórica. A curva b foi obtida com uma lâmina linórica de 3 mm de espessura, 160 mm de largura e bloqueada. Mesmo que a simulação acima não satisfaça as condições dinâmicas do processo (conversor a velocidade síncrona e a linor bloqueado) os resultados obtidos por Cabrita acompanham os apontados por Bolton [11]. A importância da constatação, porém, está em mostrar que a Densidade de Campo no entreferro, com o linor presente, é menor do que a Densidade de Campo calculada segundo a equação (7.68), do Capítulo 7. Para o projetista, isto é salutar, porque o conversor real, em

operação, trabalhará com densidades inferiores àquelas calculadas, o que, em termos construtivos, atua no sentido de minimizar saturações nas regiões dos dentes. Como o comportamento da Densidade de Campo na coroa do indutor dos CALs é diverso daquele obtido na coroa dos CARs, a altura da referida, calculada segundo a equação (3.53), atende a conversores com número par de pólos. A mesma equação pode ser empregada em conversores com número ímpar de pólos.

#### 7.3.10. NÚMERO DE POLOS E DE CONDUTORES ATIVOS NO MODELO 'POR FASE'

A equação (7.64) é de extrema importância para a análise do conversor em projeto. Esta equação mostra que a força propulsora teórica é função de  $\rho_R'(OL)$ , C, p,  $\bar{J}_s$ , f, s e G. Por outro lado, G é função de  $\rho_R'(OL)$ ,  $t_p$ , f,  $\mu_0$  e gr. Assim, analisando-se os referidos parâmetros e a equação (7.64), observa-se que o número de pólos, a largura do indutor e o passo polar estão de tal forma relacionados, que as equações (7.67) e (7.64) devem ser combinadas para a determinação de C e de p. Isto somente ocorre se o projetista puder operar livremente com C e com p. Como tal situação pode não ocorrer, este adotará um valor para C, que seja adequado para o seu particular caso e, usando a equação (7.67), determinará p e ajustará o valor da Densidade Linear de Corrente -  $\bar{J}_s = 2 \cdot \bar{J}_{s1}$ .

Como o conversor opera a corrente constante, pode-se determinar o número de condutores ativos, por fase e por indutor -  $N_F$  - e o número de ranhuras do indutor -  $N_R$  - sendo  $\bar{J}_{s1}$  a Densida-

de Linear de Corrente, por indutor.

$$N_R = 3 \cdot p \cdot q \quad (7.69)$$

O número de ranhuras por pólo e por fase -  $q$  - é escolhido em função do enrolamento empregado. Neste ponto, análises gerais devem ser realizadas no sentido de ajustar  $N_f$  e  $N_R$  e um novo valor para  $\bar{J}_{s1}$  deve ser obtido, o que levará a um novo valor para  $f_{xr}$ .

Com os parâmetros mecânicos e elétricos obtidos, pode-se:

- I - Traçar curva do comportamento da força propulsora teórica em função do escorregamento do linor, a partir da equação (7.64) e;
- II - Com os parâmetros do circuito elétrico convencional, traçar curva da força propulsora em função do escorregamento.

Como o Efeito Transversal de Borda já está corrigido na equação (7.64) e em todos os parâmetros do circuito elétrico equivalente que forem afetados pelo mesmo, as duas curvas assinaladas, devem ser coincidentes. Caso isto não ocorra, os parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente convencional não estão satisfatoriamente determinados.

Quando as curvas referidas forem coincidentes, o

projetista pode passar para a determinação da resistência  $R_E$  e da reatância  $X_E$  a serem acopladas ao Circuito Elétrico Equivalente convencional. Isto posto, o mesmo toma a forma do circuito da Figura 5.6; do Capítulo 5, acrescido do ramo  $Z_E$ .

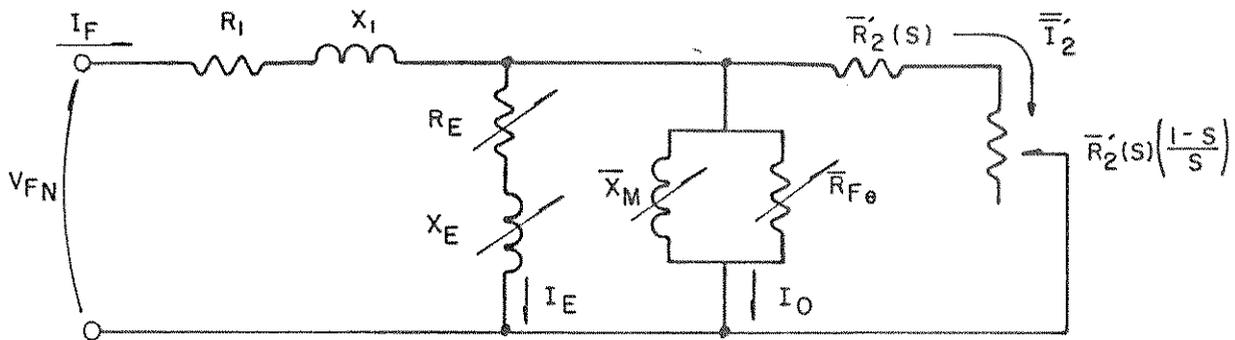


Figura 7.10: Circuito Elétrico Equivalente, respeitados os Efeitos Transversal de Borda e Longitudinal de Extremidade

A impedância equivalente  $Z_E$ , é calculada segundo equações derivadas no Capítulo 5.

O Fator de Extremidade de Entrada -  $K_E$  - segue a referência [10] e foi bastante pesquisado por R.C. Creppe [31].

A força propulsora líquida, levando em conta os Efeitos Transversal de Borda e Longitudinal de Extremidade, é calculada segundo a equação (5.32).

$$f_{xg} = \frac{3}{V_{sx}} \cdot \left[ \frac{\bar{R}'_2}{s} \right] \cdot (\bar{I}'_2)^2 \quad (5.32)$$

onde  $\bar{R}'_2$  é calculado segundo a equação (5.16) ou (5.17). As curvas obtidas para o comportamento da força propulsora, estão dispostas na Figura 7.11.

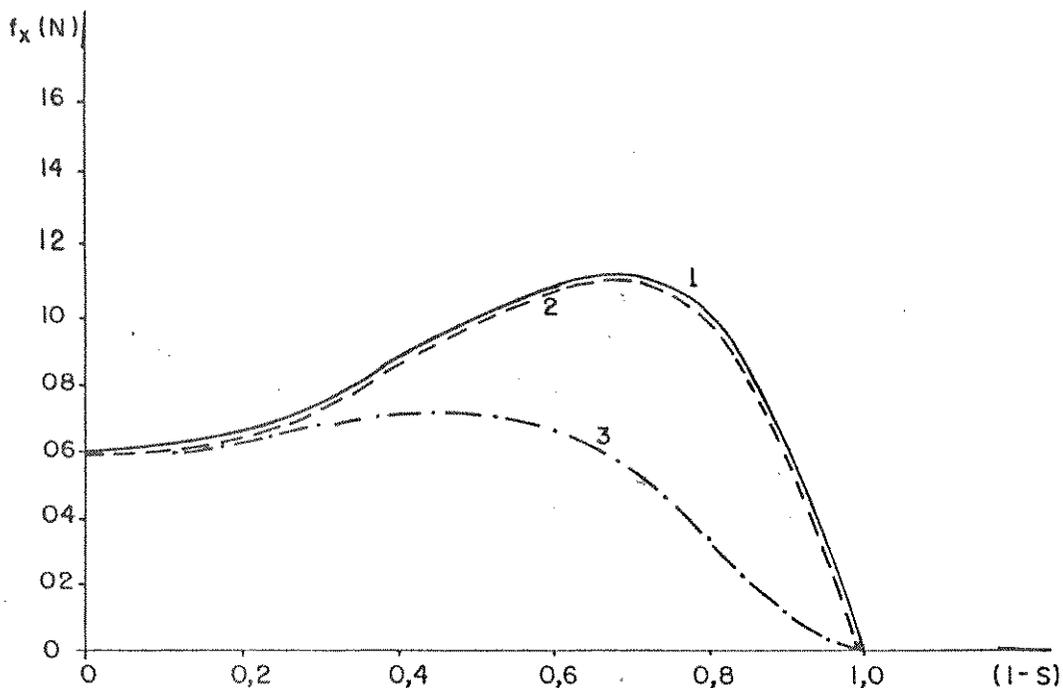


Figura 7.11: Comportamento da Força Propulsora considerando a interferência dos Efeitos de Extremidades

As curvas mostradas na Figura (7.11) seguem a seguinte convenção:

- 1 - curva da força propulsora calculada segundo a equação (7.64)
- 2 - curva da força propulsora calculada a partir do Circuito Elétrico Equivalente convencional, respeitados os Efeitos Transversal de Borda e Pelicular, e;
- 3 - curva da força propulsora líquida, calculada segundo o Circuito Elétrico Equivalente da Figura 7.10, respeitados os Efeitos de Extremidades - equação 5.32

Detalhe importante a ser observado está no ponto onde as curvas cortam o eixo das ordenadas, na Figura 7.11. Quando  $s = 1$ , isto é, quando o conversor está a linor bloqueado, o Efeito Longitudinal de Extremidade não se faz presente e as curvas 1, 2 e

3, da referida Figura, demandam o mesmo ponto. Esta propriedade é de imensa valia para o projetista, porque é passível de ser avaliada quando do projeto, da simulação e dos testes.

No Capítulo 6, foi derivada a equação (6.17) diretamente da análise unidimensional praticada na direção longitudinal do conversor. Como esta equação traz em seu bojo, os Efeitos - Transversal de Borda e Longitudinal de Extremidade, caracteriza-se em elemento de extrema valia para a corroboração da equação (5.32) e das curvas 1 e 3, da Figura (7.11). Desta forma o projetista disporá de duas ferramentas para análise do projeto, antes da confecção do protótipo.

#### 7.3.11. PERDAS NO FERRO, NO MODELO 'POR FASE'

Como foi ressaltado em item anterior, a Densidade de Campo Magnético nas regiões de ferro dos CALs, é normalmente inferior às densidades de campo nas regiões de ferro dos CARs convencionais. Esta particularidade faz com que a quase totalidade dos pesquisadores não faça referência a perdas no ferro, em CALs. Ocorre, que estas perdas existem e não são tão desprezíveis a ponto de serem olvidadas.

As chapas magnéticas empregadas na confecção dos indutores não possuem orientação preferencial e suas características são descritas em catálogos de fabricantes. A chapa magnética M-15, do fabricante 'The Armco International Corporation', é indicada para a confecção de máquinas rotativas de grande potência, o que a torna também adequada à confecção de CALs.

Determinadas as dimensões do pacote magnético do linor e descontadas as ranhuras, pode-se determinar as Densidades de Campo Magnético na região dos dentes e na região da coroa do indutor. Isto posto, calcula-se o volume e o peso das referidas regiões. Com as respectivas densidades, estabelece-se as perdas específicas.

A força eletromotriz induzida na armadura do conversor é máxima quando o referido está operando em vazio. A menos dos efeitos perturbadores do Efeito Longitudinal de Extremidade de Entrada, pode-se escrever:

$$E_{FN}(s) = 2,22 \cdot K_{we} \cdot N_F \cdot f \cdot t_p \cdot C \cdot B_{AV}(s) \quad (7.70)$$

$$B_{AV}(s) = (2/\pi) \cdot B_M(s) \quad (7.71)$$

$$B_M(s) = \frac{J_M}{\left[ \left[ \frac{\pi \cdot g_T}{\mu_0 \cdot t_p} \right]^2 + \left[ \frac{s \cdot V_{SX}}{\rho'_R(OL)} \right]^2 \right]^{1/2}} \quad (7.72)$$

A resistência equivalente às perdas no ferro, varia com o escorregamento e é calculada a partir, de:

$$R_{Fe}(s) = \frac{E_{FN}^2(s)}{W_{Fe}} \quad (7.73)$$

Na equação (7.73), as perdas no ferro são função das densidades de campo nas diversas regiões dos estatores. O projetista deverá analisar o comportamento de  $B_M(s)$  com o escorregamento e decidir-se com relação à melhor forma de enquadrar  $R_{Fe}(s)$ .

Como  $B_m(s)$  tem seu valor reduzido à medida que o escorregamento aumenta, as perdas no ferro, que são função de  $B_m(s)$ , também tenderão a reduzir-se. A referência [23], operando com RFE calculado para  $B_m(s=0)$ , constante, obteve resultados bastante aceitáveis, principalmente para o ponto  $s = 1$ , que é o ponto de controle da simulação, sabendo-se que  $B_m(s=1) < B_m(s=0)$  para  $I_f$  constante.

### 7.3.12. A OPERAÇÃO COM DOIS ESTADORES ATIVOS

É sabido que dois ou mais enrolamentos iguais podem ser conectados em série ou em paralelo, dependendo dos níveis de tensão e de corrente. Nos CARs convencionais, não está presente o Efeito Longitudinal de Extremidade e a conexão série ou paralelo só envolve problemas relativos a níveis de tensão e de corrente. Nos CALs, além de correntes e tensões, existe a presença do Efeito Longitudinal de Extremidade que, mantida a hipótese de corrente eficaz constante, influencia o comportamento das tensões nos terminais, com valores diferentes para cada uma das fases e o comportamento da distribuição de campo no entreferro e fora dele. Em face disso, a conexão paralelo leva a comportamento dispar da conexão série, sendo esta última a mais indicada, quando possível.

No presente item, será analisada a conexão série de condutores e de fases do mesmo nome, nos conversores de simples e duplo estadores ativos.

A filosofia de projeto estabelece que o conversor é calculado por indutor ativo, isto é, como se o conversor possuísse um indutor ativo e um passivo. Obtidos os parâmetros para a cons-

trução de um Circuito Elétrico Equivalente, que representa um conversor modelado como acima se explica, o pesquisador, se o desejar, poderá operar o conversor assim modelado. Se fizer atuar sobre o Circuito Elétrico Equivalente o corretor do Efeito Longitudinal de Extremidade, poderá simular, desenvolver e testar um CAL de um indutor ativo.

O Circuito Elétrico Equivalente mostrado na Figura 5.6 tem os seus parâmetros corrigidos, no que diz respeito a Efeito Transversal de Borda, presença de ranhuras, dispersão indutórias e efeito Pelicular.

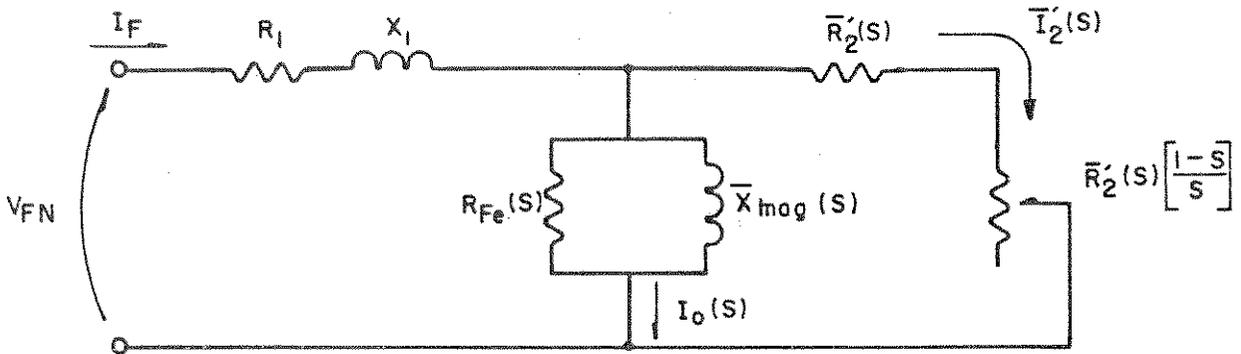


Figura 7.12: Circuito Elétrico Equivalente, desenvolvido para um Indutor Ativo e um Passivo.

Quando os dois indutores são ativos, circuitos elétricos idênticos são ligados em série e os parâmetros dos mesmos guardam as seguintes relações, segundo Figura 7.12:

$$R_{11} = 2 \cdot R_1 \quad (7.74a)$$

$$X_{11} = 2 \cdot X_1 \quad (7.74b)$$

$$R_{Fe_{11}}(s) = 4 \cdot R_{re}(s) \quad (7.74c)$$

$$X_{mag_{11}}(s) = 4 \cdot \bar{X}_{mag}(s) \quad (7.74d)$$

$$R'_{21}(s) = 4 \cdot \bar{R}'_2(s) \quad (7.74e)$$

A dependência da maioria dos parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente a  $s$ , está no fato de os Fatores Corretores de Bolton serem funções do escorregamento. Se entender-se que o Fator Corretor  $K_s$  de Bolton pode ser substituído pelo Fator Corretor  $K_s$  de Russell, a dependência de  $\bar{R}'_2$  com relação a  $s$ , desaparece. O ramo de excitação, porém, mantém a referida dependência.

O Efeito Longitudinal de Extremidade é corrigido com a introdução do Fator de Extremidade de Entrada -  $K_E$  - estudado no Capítulo 5.

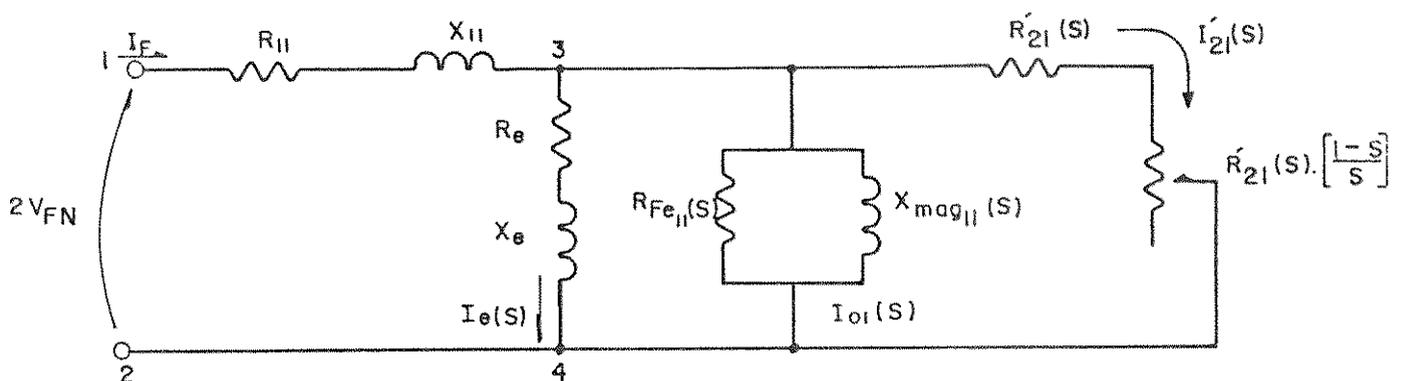


Figura 7.13: Circuito Elétrico Equivalente, considerados todos os efeitos presentes em um CAL de dupla face elétrica.

Com o Circuito Elétrico Equivalente mostrado na

Figura 7.13, mantendo-se  $I_F$  constante, simula-se o conversor e calcula-se:

$$f_{xg} = 3 \cdot \frac{R'_{z1}(s)}{s \cdot V_{sx}} \cdot \left[ I'_{z1}(s) \right]^2 \quad (7.75)$$

equação derivada diretamente da energia que é convertida em trabalho pelo conversor. O método acima exposto, proposto na referência [10], somente não atende com rigor, ao projetista, na região de baixíssimos escorregamentos, porém, tal fato não invalida ou reduz a sua aplicabilidade, por serem os escorregamentos dos CALs relativamente maiores que os dos CARs.

Para estabelecer comparação e analisar resultados, pode-se calcular  $f_x$  por meio da equação (6.17), que emprega a equação fundamental da força propulsora:

$$f_{xH} = \frac{C}{2} \cdot \int_0^{P \cdot t_P} \text{Re} \left[ J_s(x,t) \cdot b^*(x,t) \right] dx \quad (6.12)$$

As vantagens do uso da equação (6.12) são inegáveis, porém, o Circuito Elétrico Equivalente é de mais fácil compreensão e muito didático. Assim, manteve-se as duas formas de calcular  $f_x$ , no corpo do trabalho.

### 7.3.13. RENDIMENTO DOS CALs

O rendimento teórico dos CALs pode ser calculado a partir das equações (7.76):

$$\eta_T = \frac{f_{XT} \cdot V_{RX}}{f_{XT} \cdot V_{RX} + 3 R_1 (I_F)^2 + 3 \bar{R}'_2 (\bar{I}'_2)^2} \quad (7.76a)$$

se o conversor for mono estator ativo, e:

$$\eta_T = \frac{f_{XT} \cdot V_{RX}}{f_{XT} \cdot V_{RX} + 3 R_{11} (I_F)^2 + 3 R'_{21} (I'_{21})^2} \quad (7.76b)$$

se for de duplo estator ativo.

Desenvolvendo-se a equação (7.76a), obtém-se:

$$\eta_T = \frac{(1 - s)}{\left[ 1 + \frac{R_1}{s \cdot \bar{R}'_2} \cdot \left[ s^2 + \frac{1}{G^2} \right] \right]} \quad (7.77)$$

que permite calcular o rendimento teórico, desconsiderando-se as perdas no ferro e o Efeito Longitudinal de Extremidade. Demais efeitos podem ser considerados, levando-se em conta que eles incidem sobre a resistividade superficial e a espessura do entreferro e estes elementos estão presentes no denominador de  $G$  (Fator de Qualidade), equação 2.41 e no cálculo de  $\bar{R}'_2$ .

Desta forma, ao calcular o valor de  $G$ , muitos fenômenos presentes nos CALs podem ser levados em conta e, indiretamente, considerados no rendimento teórico. O Efeito Longitudinal de Extremidade pode ser considerado com a introdução da força propulsora provável, que é obtida com a aplicação do Método exposto no Capítulo 5 ou do exposto no Capítulo 6. Adotando-se, por exemplo, o Método exposto no Capítulo 5, para um conversor com um indutor

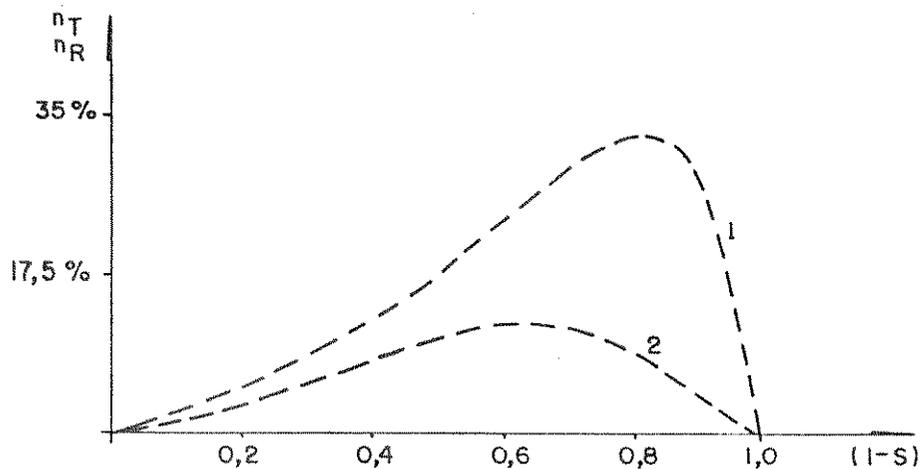
ativo, escreve-se:

$$\eta_R = \frac{f_{XG} \cdot V_{RX}}{3 R_1 (I_F)^2 + 3 \bar{R}'_2 (\bar{I}'_2)^2 + f_{XG} \cdot V_{RX}} \quad (7.78)$$

que expressa o valor do rendimento dos CALs, para qualquer valor de escorregamento. O rendimento também pode ser analisado a partir do Método estudado no Capítulo 6, adotando-se como o provável valor da força resultante, o valor  $f_{XH}$  e, desta forma:

$$\eta_R = \frac{f_{XH} \cdot V_{RX}}{3 R_1 (I_F)^2 + 3 \bar{R}'_2 (\bar{I}'_2)^2 + f_{XH} \cdot V_{RX}} \quad (7.79)$$

que expressa o rendimento dos CALs, para qualquer valor de escorregamento.



curva 1: Rendimento teórico, respeitando-se os Efeitos Transversal de Bordã, Ranhuramento, Pelicular e Dispersão de Campo

curva 2: Rendimento teórico, levando-se em conta todos os efeitos

Figura 7.16: Comportamento dos Rendimentos Teóricos do Conversor

## 7.3.14. FATOR DE POTÊNCIA DOS CALs

Apesar do pronunciado entreferro destes conversores, o Fator de Potência apresentado, embora inferior aos dos CARs convencionais, não é tão baixo a ponto de inviabilizar a aplicação daqueles, economicamente.

Aparentemente, o fator de potência dos CALs, pode ser calculado a partir do Circuito Elétrico Convencional, relacionando-se as correntes  $I_2'$  e  $I_F$  - Figura 7.15.

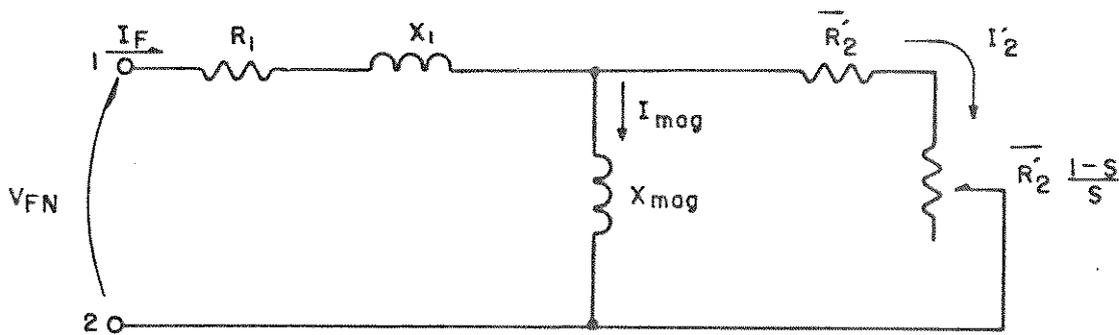


Figura 7.15: Circuito Elétrico Equivalente, respeitados os Efeitos Transversal de Borda, Ranhuramento, Pelicular e Dispersão de Fluxo

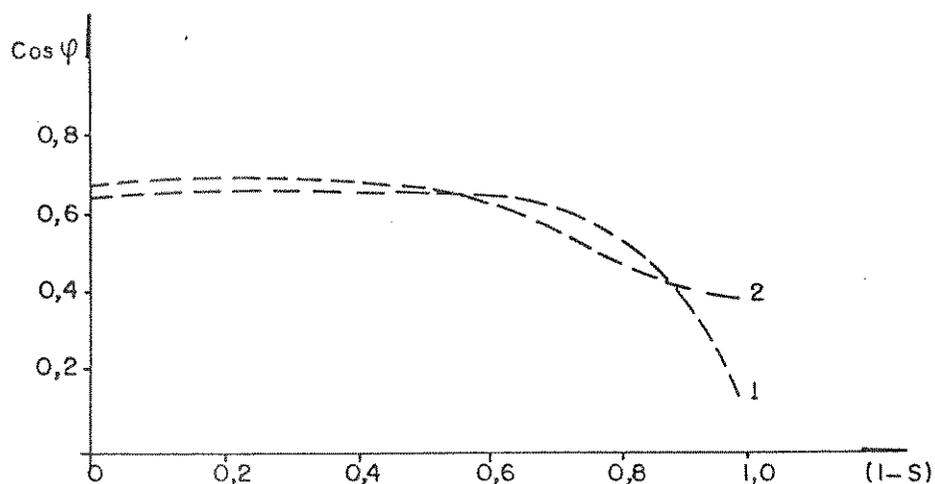
A partir de exame do conversor representado na Figura 7.15 pode-se, para o Fator de Potência, escrever:

$$\cos \varphi = \frac{R_1 \cdot I_F^2 + \left[ \frac{\bar{R}'_2}{s} \right] \cdot (I_2')^2}{Z_F \cdot I_F^2} \quad (7.80)$$

Demonstra-se que:

$$\cos \varphi = \left[ R_1 + \left[ \frac{\bar{R}'_2}{s} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(s G)^2} \right]^{-1} \right] \cdot [Z_F]^{-1} \quad (7.81)$$

onde  $Z_F$  é a impedância equivalente do circuito da Figura (7.15), vista dos terminais 1.2. A equação (7.81) converge para o fator de potência real, quando  $s \rightarrow 1$ , porque é nesta região que o Efeito Longitudinal de Extremidade, praticamente se anula. Quando  $s \rightarrow 0$  a equação (7.87) fornece resultados inadmissíveis. A Figura (7.16) mostra os comportamentos dos fatores de potência verdadeiro e calculado, para o conversor descrito na referência [23].



curva 1: Fator de potência calculado segundo a equação (7.81).

curva 2: Fator de potência real (medido)

Figura 7.16: Comportamento dos Fatores de Potência calculado segundo a equação (7.81) e verdadeiro

§

As curvas da Figura (7.16) mostram a inabilidade da equação (7.81) no cálculo do fator de potência para as regiões de



#### 7.4. CONCLUSÕES

Apoiado no conteúdo dos Capítulos anteriores e fundamentado na hipótese que os CALs obedecem a equações, desde que os efeitos presentes sejam compreendidos e analisados com ferramental adequado, desenvolveu-se equações que permitem, partindo-se de um conjunto sólido de hipóteses, calcular os parâmetros mecânicos e elétricos que compõe os CALs de um ou de dois indutores ativos. Na referência [23] experimentou-se o desenvolvimento, construção e testes de um CAL de face única. Os resultados obtidos foram extremamente positivos. O fator de potência calculado segundo a equação (7.81), divergia nas regiões de escorregamentos médio e baixo, dos valores medidos. Com equação semelhante a (7.82), desenvolvida para CALs de um estator ativo, obteve-se extraordinária aproximação entre os fatores de potência medido e calculado e isso dá a necessária segurança para usar o ferramental aqui proposto.

## CAPÍTULO 8

### DESENVOLVIMENTO DE ROTINA COMPUTACIONAL PARA O PROJETO DE CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES

#### 8.1. ASPECTOS GERAIS

No Capítulo 7 desenvolveram-se equações para o cálculo dos parâmetros elétricos e mecânicos dos CALs. Observou-se que a Filosofia de Projeto adota como metodologia para o projeto, um conversor dotado de um indutor ativo e um passivo e depois, se desejável, associa dois indutores ativos.

A Rotina Computacional a ser desenvolvida deve levar em conta o fato acima, como também usar todo o embasamento teórico analisado em itens anteriores. As equações do Capítulo 7 tiveram como apoio o conjunto de hipóteses feitas ao longo dos capítulos anteriores.

Escolheu-se para o desenvolvimento do programa a Linguagem Basic. O compilador do Basic é um sub-programa dentro do referido. Ele lê e entende as instruções de um programa em BASIC, as compara e confere em relação a certos tipos de erros e, por fim, as traduz para linguagem de máquina. Duas das extraordinárias características do mesmo, relativas à compilação, são velocidade e eficiência.

## 8.2. FILOSOFIA DO PROGRAMA

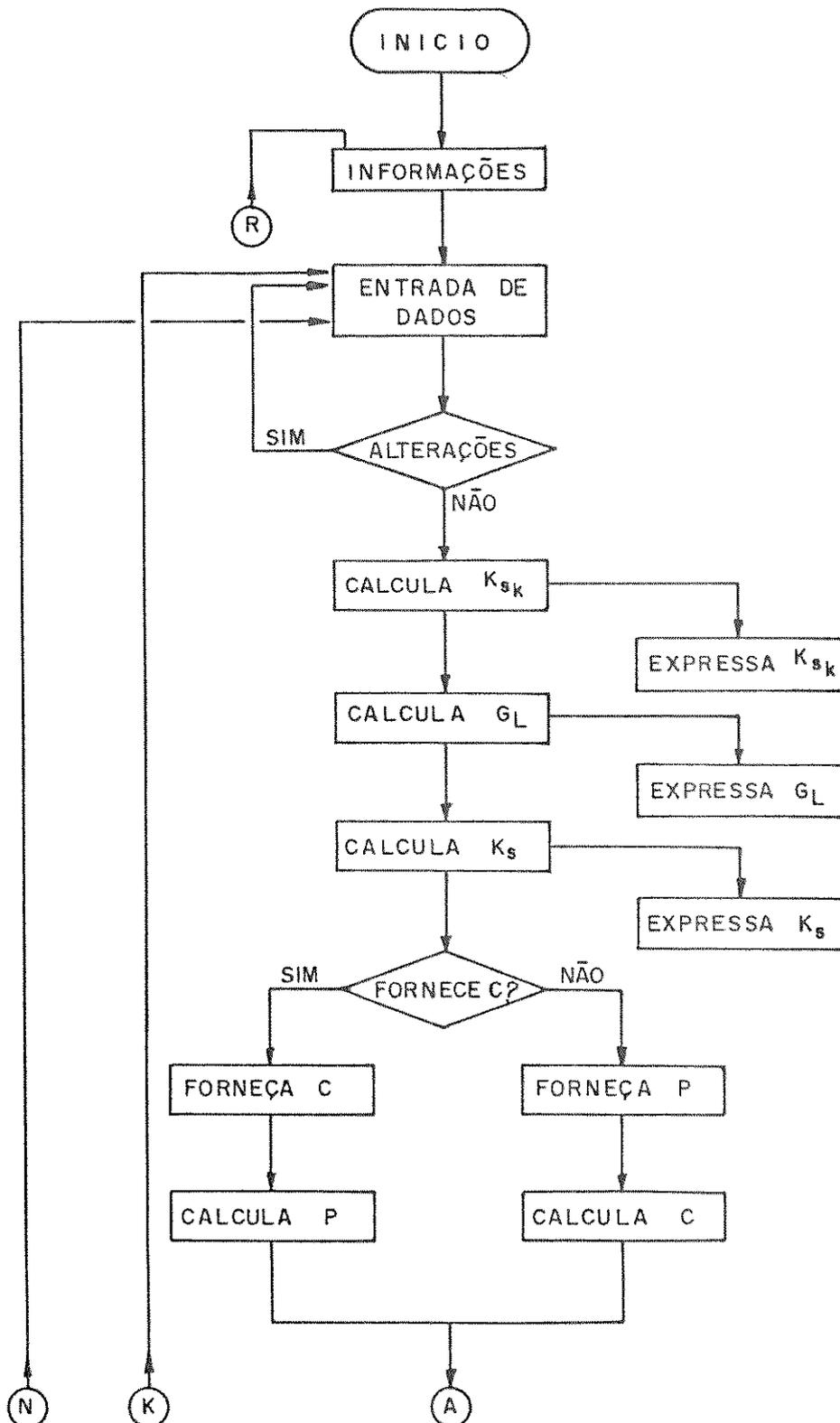
Procurou-se manter ao longo do desenvolvimento do programa uma constante interação entre o projetista e o programa, mostrando, em sucessivas telas, a etapa em análise e os resultados que estão sendo encontrados. Em diversos pontos do programa, existem estágios decisórios, onde o projetista pode prosseguir ou retornar a um ponto anterior. As telas finais mostram os parâmetros mecânicos e elétricos encontrados.

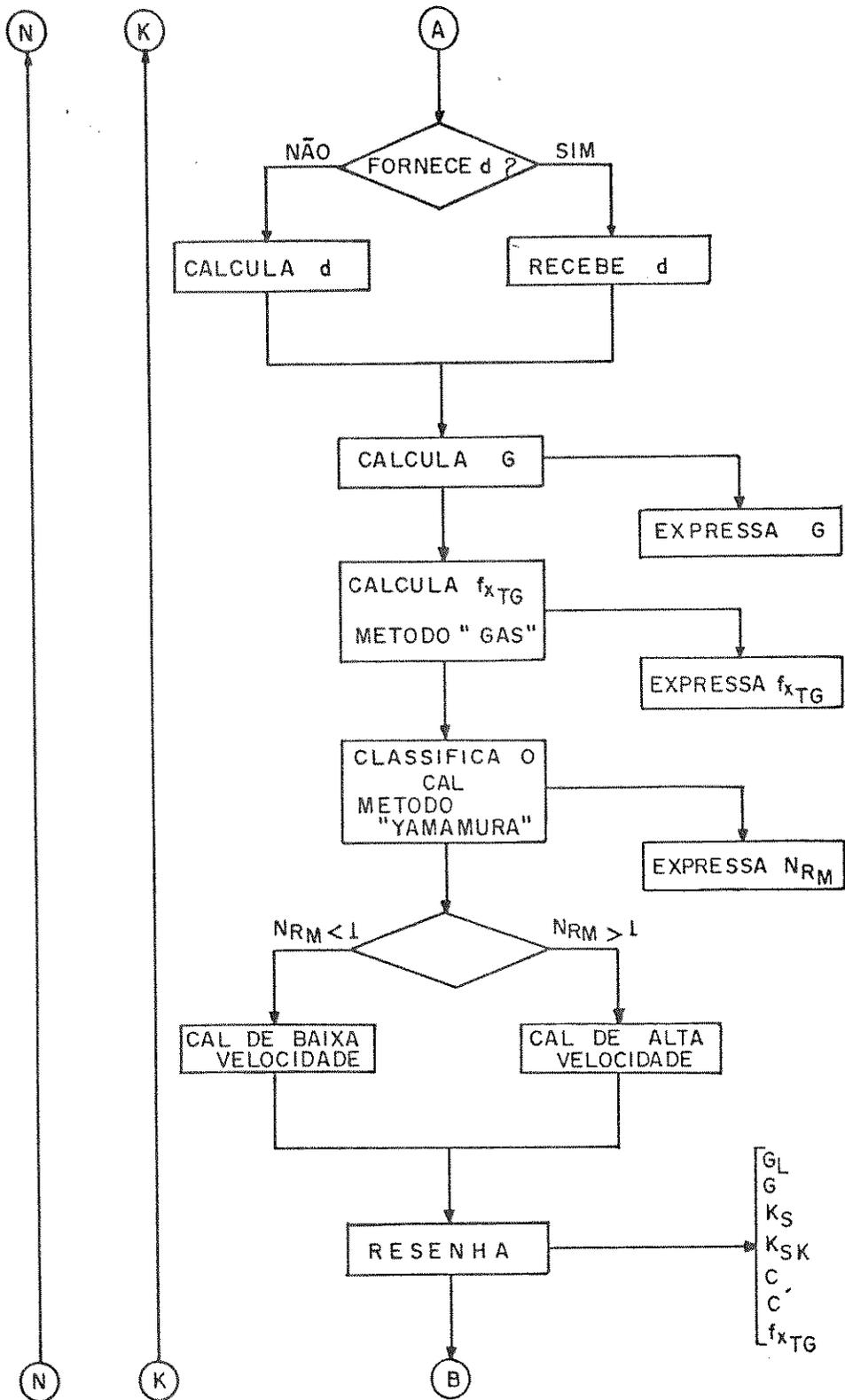
### 8.2.1. DADOS FORNECIDOS AO PROGRAMA

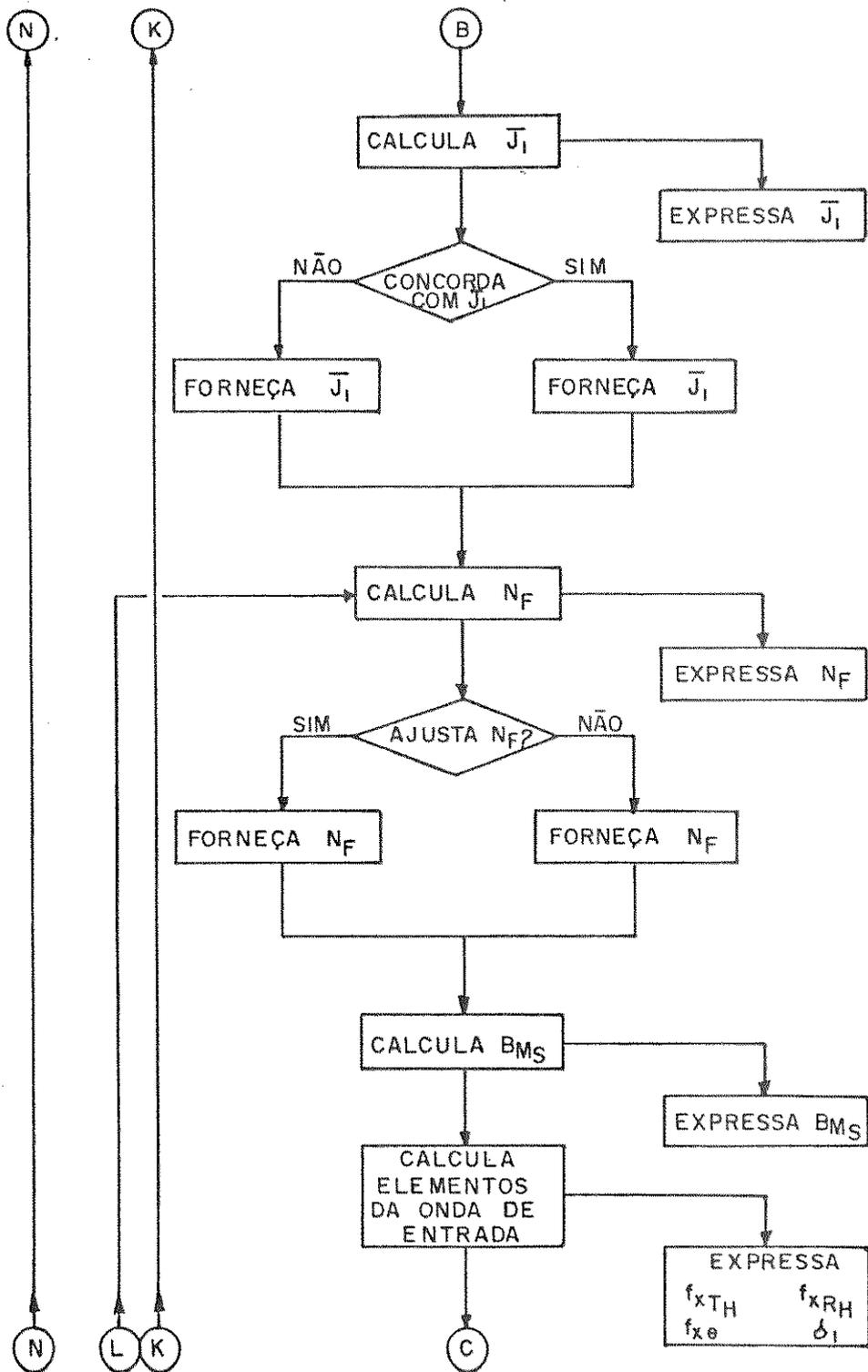
- \* força real -  $f_x$
- \* corrente indutórica, por fase -  $I_f$
- \* velocidade linear síncrona -  $V_{sx}$
- \* frequência do sinal -  $f$
- \* temperatura média dos cond. indutóricos -  $o_s$
- \* temperatura média linórica -  $o_L$
- \* escorregamento porcentual -  $s\%$
- \* espessura do linor -  $h_r$
- \* espessura do entreferro -  $g$
- \* fator de enrolamento -  $K_{we}$
- \* densidade superficial de corrente nos condutores -  $d_{fic}$
- \* fator de ocupação de uma ranhura -  $f_{oc} \%$
- \* número de estatores ativos -  $NEA$
- \* fator de Carter -  $K_c$
- \* fator de empilhamento indutórico -  $f_e \%$

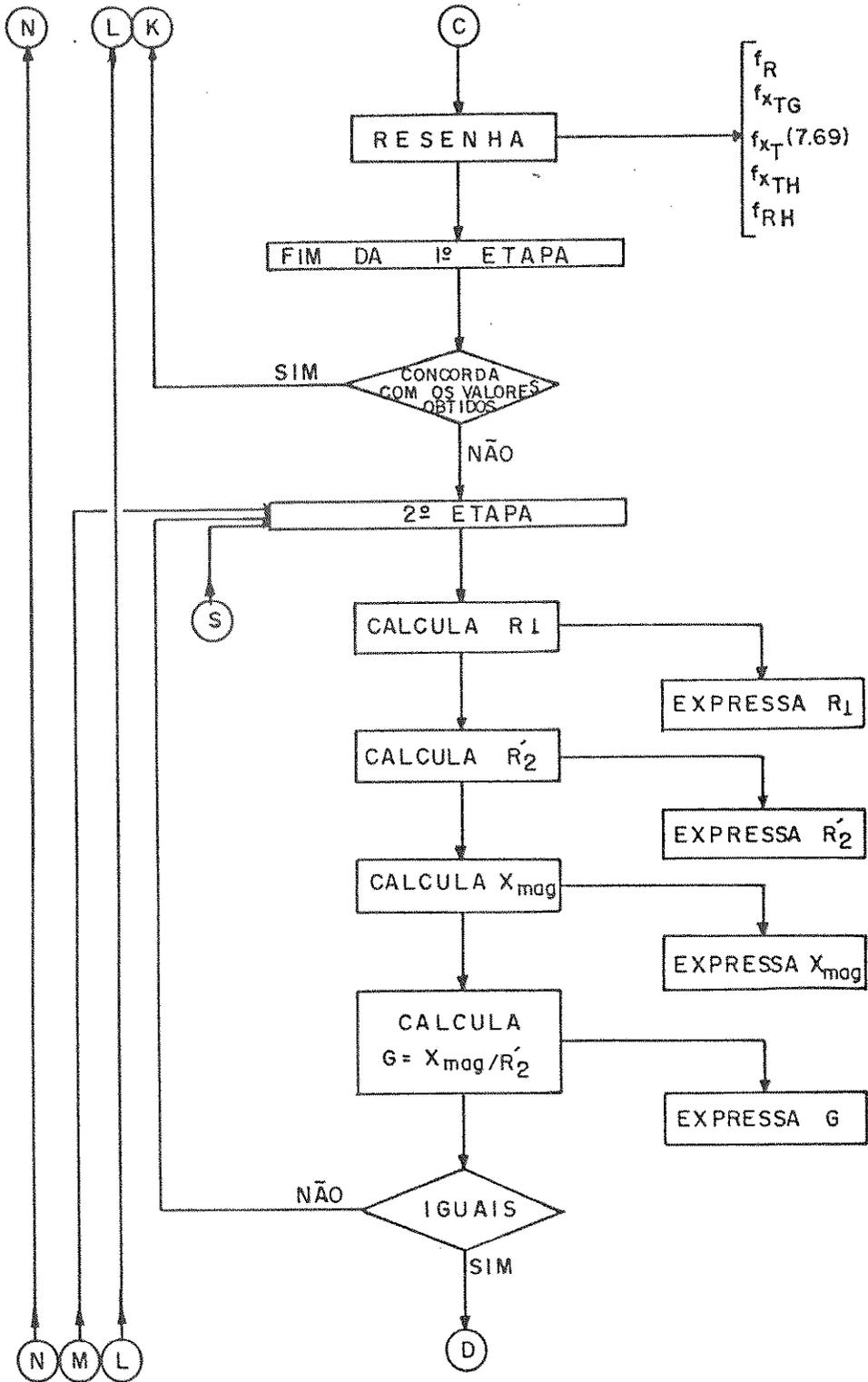
## 8.2.2. FLUXOGRAMA

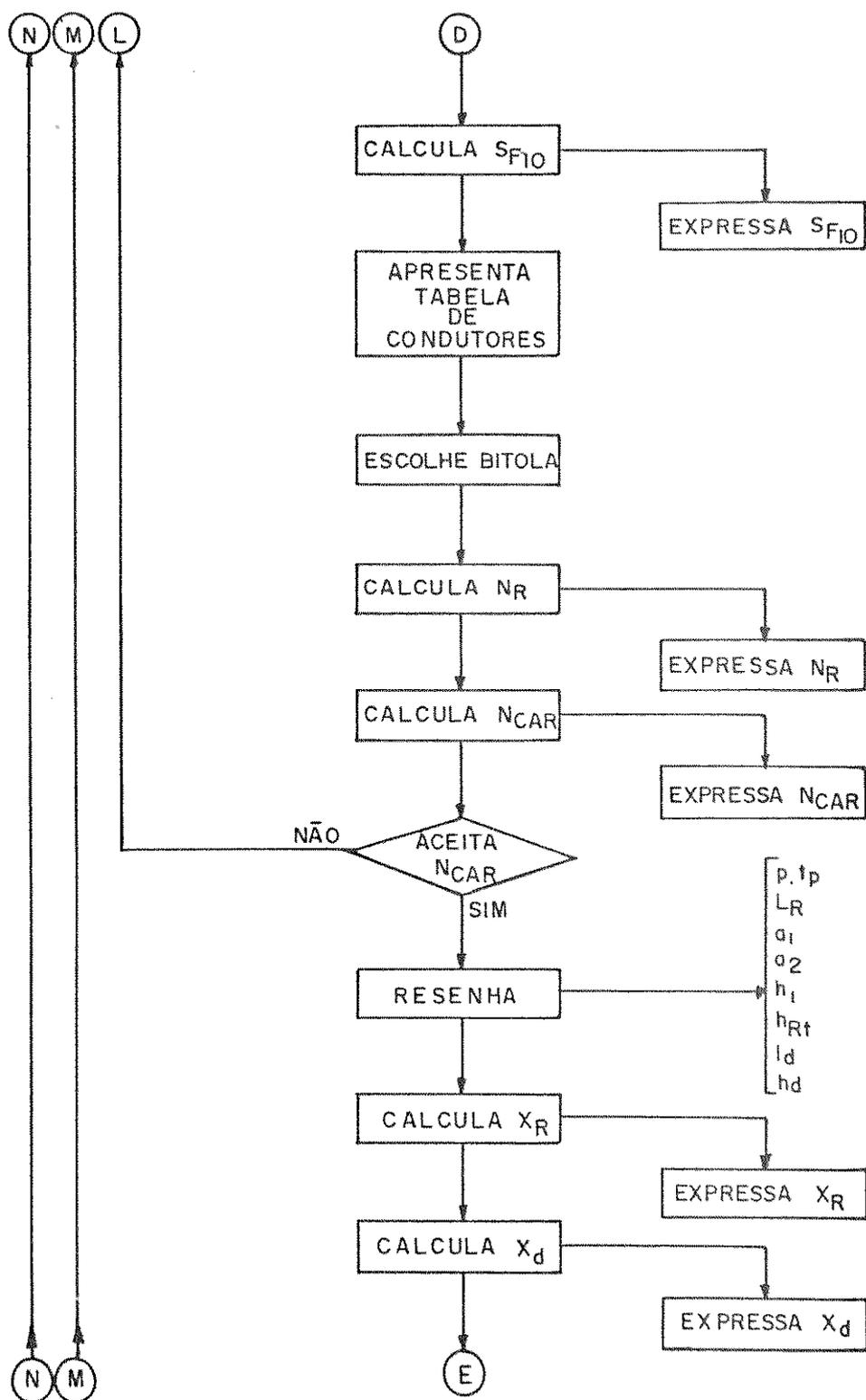
Deu-se ao programa desenvolvido, o nome de 'PROCAL'. O seu fluxograma está apresentado em figuras, como segue.

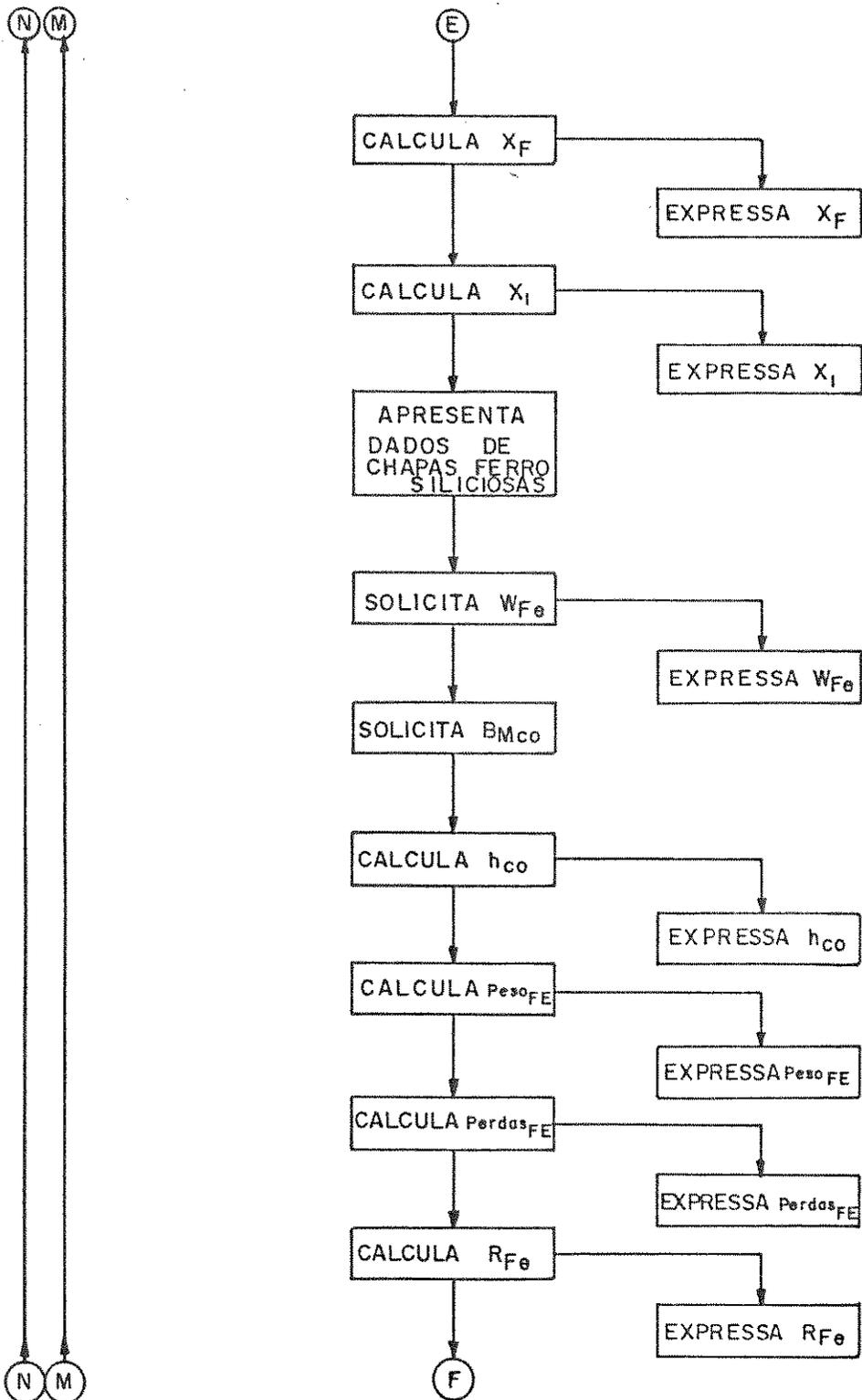


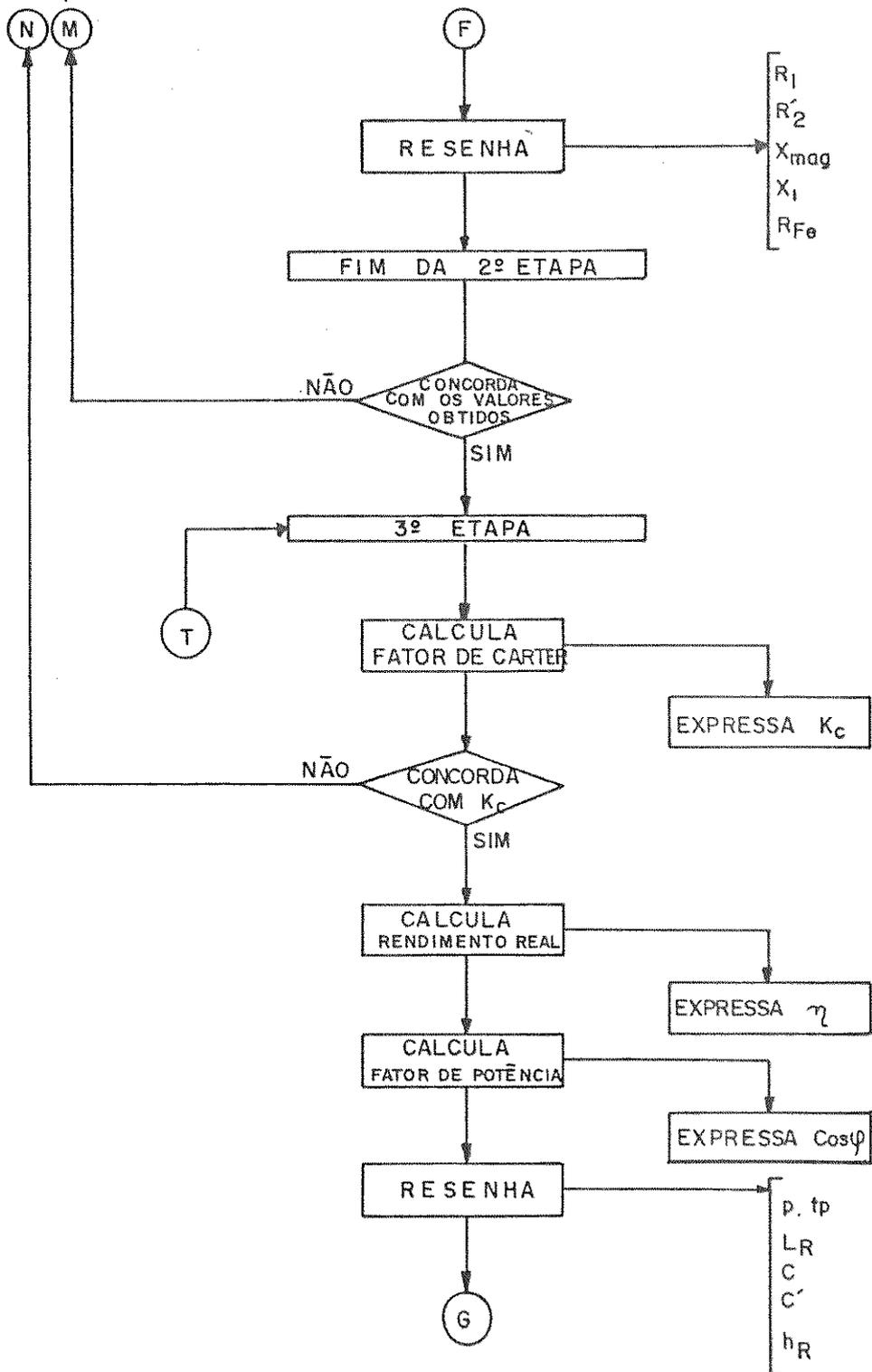


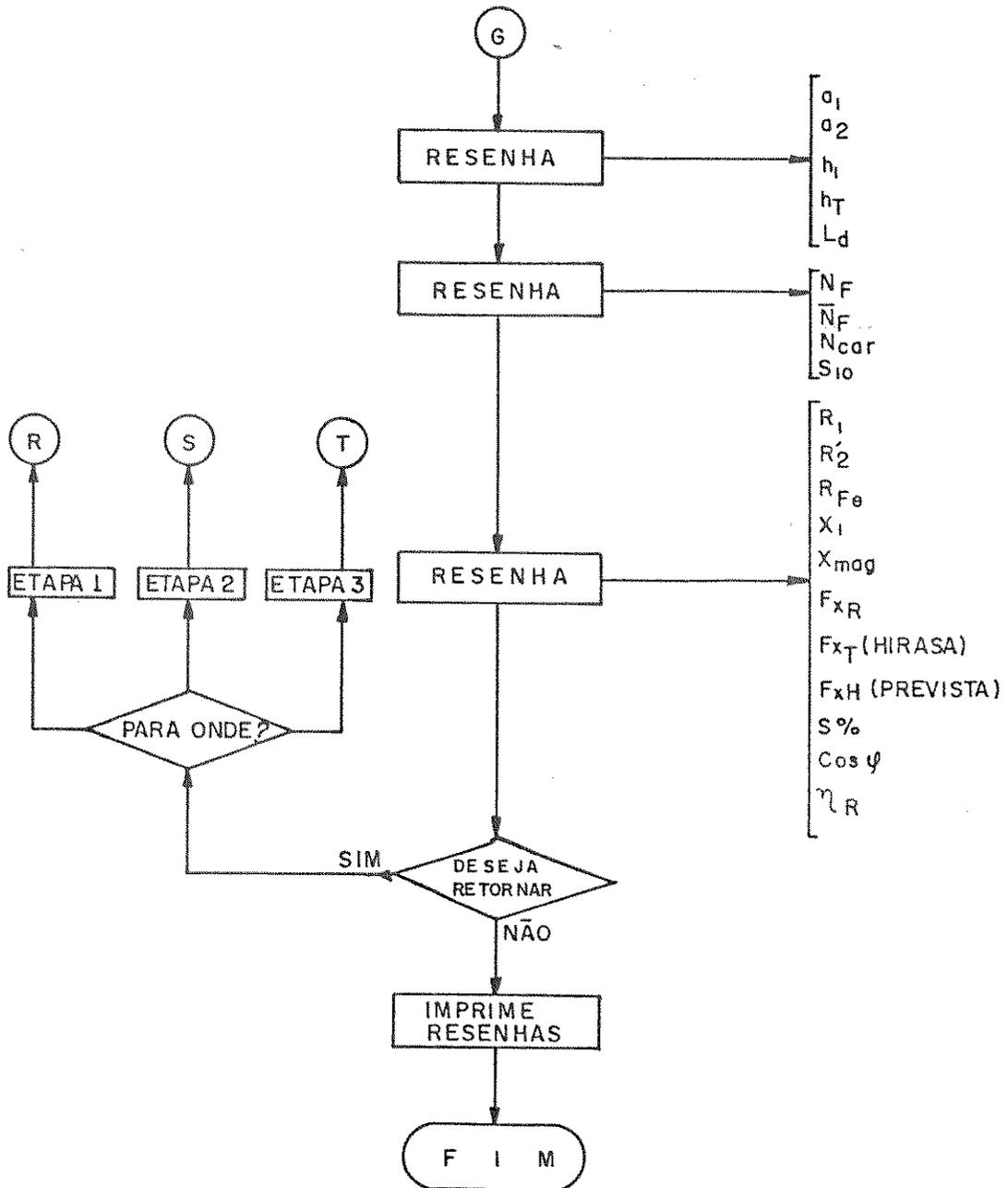












## 8.3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para teste do Programa "PROCAL", admitiu-se:

$f_x = 7,5N$  ;  $I_F = 6A$  ;  $V_{sx} = 15 \text{ m/s}$   
 $f = 60 \text{ Hz}$  ;  $\theta_S = 120^\circ \text{ C}$  ;  $\theta_L = 70^\circ \text{ C}$   
 $s\% = 20\%$  ;  $h_R = 5,6 \text{ mm}$  ;  $g = 7,9 \text{ mm}$   
 $K_{we} = 0,96$  ;  $d_{fio} = 5,78 \text{ A/mm}^2$  ;  $f_{oc} \% = 35\%$   
 $N_{EA} = 2$  ;  $K_c = 1,004$  ;  $f_e \% = 94\%$

Como elementos auxiliares de projeto, foi adquirido:

- \* Número de pólos:  $p = 2$
- \* Largura Real do Indutor:  $C = 4 \text{ cm}$
- \* Densidade Linear de Corrente:  $J_s = 33385 \text{ A/m}$

Com os dados fundamentais e os auxiliares obteve-se os parâmetros elétricos e mecânicos apresentados nas telas que seguem:

```

*****
ENTRADA DE DADOS

Força Propulsora Real, em 'N'? 7.5
Corrente Operacional, em 'A'? 6
Velocidade Linear Sincrona, em m/s? 15
Frequencia do Sinal Linorico, em 'Hz'? 60
Temperatura Operacional do INDUTOR, em 'GRAUS'? 120
Temperatura Operacional do LINOR, em 'GRAUS'? 70
Escorregamento Linorico, em %? 20
Espessura do LINOR, em 'mm'? 5.6
Espessura do Entreferro Mecanico, em 'mm'? 7.9
Fator de Enrolamento? .96
Densidade Superficial de Corrente, em 'A/mm2'? 5.78
Fator de Ocupação de uma Ranhura em %? 35
Numero de INDUTORES ATIVOS? 2
Provisoriamente, o FATOR DE CARTER, vale? 1.004
Fator de Empilhamento de Chapas, em %? 94

```

\* \* \* \* \*



```

*****
*
*           RESENHA DOS RESULTADOS (em N)
*
*
*   FORÇA PROPULSORA SOLICITADA - :      7.50
*   FORÇA PROPULSORA ESTIMADA - GAS:    32.40
*   FORÇA PROPULSORA EQUAÇÃO  7.69:    32.80
*   FORÇA PROPULSORA ESTIMADA - HIR:    32.80
*   FORÇA PROPULSORA PROVAVEL - HIR:     9.76
*
*****

```

TELA 05

```

.....
Sera calculado o FATOR DE QUALIDADE - 'G' -, a partir
da relação estabelecida por:  $G = X_{mag}/R^2$ 

```

Fator de Qualidade, calculado anteriorm. G': 4.91412

Fator de Qualidade, usando ' Xmag/R^2 ' G': 4.91412

```

.....
TELA 06

```

```

.....
RESENHA
.....
COMPRIMENTO IDEAL DO INDUTOR, em 'm': 0.2500
COMPRIMENTO REAL DO INDUTOR, em 'm': 0.2723
RANHURA SEMI FECHADA:
    Largura da Ranhura,          em 'mm': 7.000
    Altura util da Ranhura,      em 'mm': 18.700
    Largura do Dente,           em 'mm': 7.700
    Entrada da Ranhura,         em 'mm': 1.500
    Altura Total da Ranhura,     em 'mm': 21.600
    Condutor Linorico,          em 'mm2': 1.0381
.....
TELA 07

```



## RESENHA

## DADOS DA RANHURA:

Largura Real, em 'mm': 7.000  
 Altura Util, em 'mm': 18.700  
 Altura Total, em 'mm': 21.600

## DADOS DO DENTE:

Largura Real, em 'mm': 7.700  
 Altura Total, em 'mm': 21.600

## DADOS DO ENROLAMENTO:

No. de Condutores Ativos  
 por Fase e por Indutor: 240.0  
 No. de Condutores Ativos  
 por Ranhura do Indutor: 40.0  
 Secção Reta do Condutor  
 Indutorico, em 'mm<sup>2</sup>': 1.0381  
 Passo Polar, em 'cm': 12.5000

TELA 10

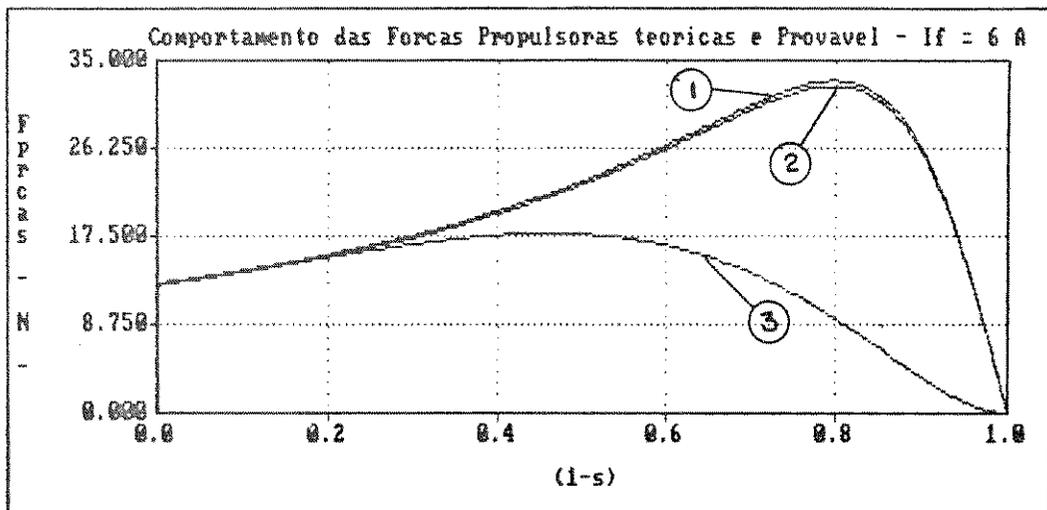
## RESENHA

RESISTENCIA INDUTORICA, em 'ohms' R1 : 1.34081  
 RESISTENCIA LINORICA, em 'ohms' R2': 0.45787  
 REATANCIA INDUTORICA, em 'ohms' X1 : 1.79158  
 REATANCIA DE MAGNETIZAÇÃO, em 'ohms' Xmag: 2.25001  
 RESISTENCIA DE PERDAS NO FE, em 'ohms' Rfe: 1366.602  
 FORÇA PROPULSORA ESTIPULADA, em 'N' Fxr: 7.50  
 FORÇA PROPULSORA TEORICA, em 'N' Fxt: 32.80  
 FORÇA PROPULSORA PREVISTA, em 'N' Fxh: 9.76  
 ESCORREGAMENTO PORCENTUAL, S %: 20.00  
 FATOR DE POTENCIA DO CONVERSOR, : 0.6609  
 RENDIMENTO DO CONVERSOR, : 0.1915

TELA 11

#### 8.4. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados apresentados nas Telas, conclui-se que a execução do CAL proposto, é possível. Com auxílio de um Programa Simulador desenvolvido na referência [31], pode-se simular o provável desempenho do Conversor e comparar os valores calculados pelo 'PROCAL', com as simulações efetuadas:



curva 1: Comportamento da Força Propulsora segundo a Equação (7.69);

curva 2: Comportamento da Força Propulsora usando o Circuito Elétrico Equivalente mostrado na Figura 7.15, sem o Ramo  $Z_E$ ;

curva 3: Comportamento da Força Propulsora Provável segundo método do Capítulo 5 -  $f_{xg}$

Figura 8.9: Comportamento da Força Propulsora provável para o Conversor proposto -  $I_f = 6 \text{ A}$

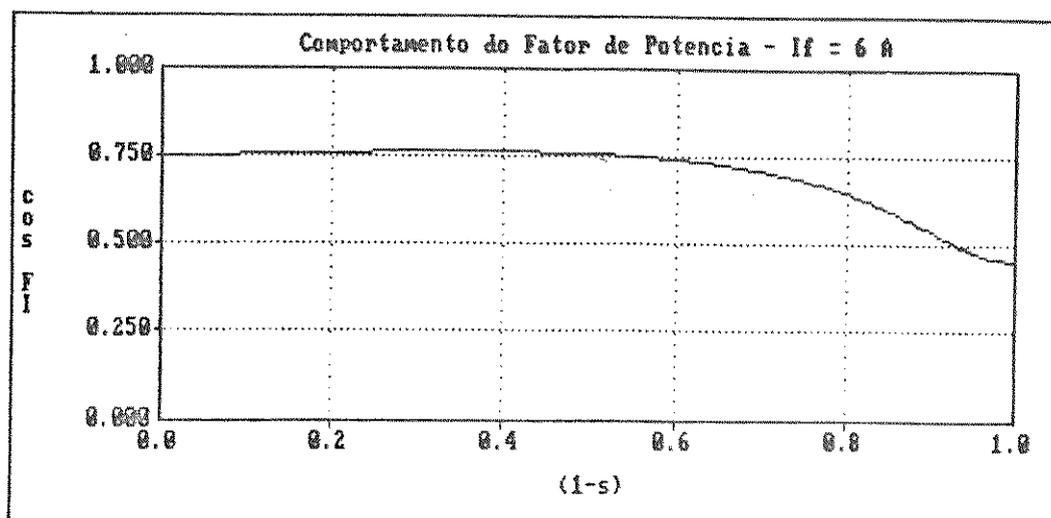


Figura 8.10: Comportamento do Fator de Potência para Conversor proposto -  $I_f = 6 \text{ A}$

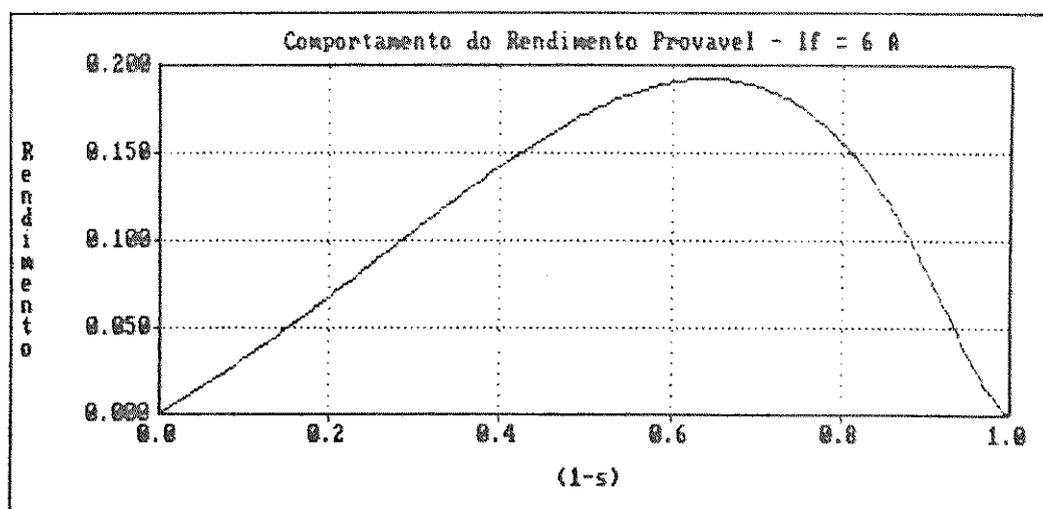
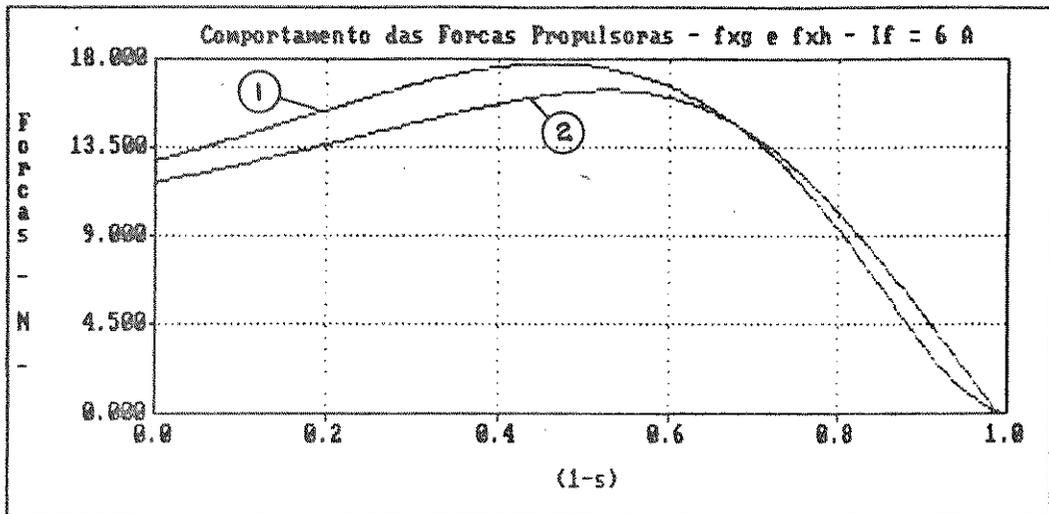


Figura 8.11: Comportamento do Rendimento provável para o Conversor proposto -  $I_f = 6 \text{ A}$



curva 1: Comportamento provável da Força Propulsora calculada segundo o método proposto no Capítulo 5 -  $f_{xg}$  -, e:

curva 2: Comportamento provável da Força Propulsora calculada segundo o método proposto no Capítulo 6 -  $f_{xh}$  -.

Figura 8.12: Comportamento das Forças Propulsoras  $f_{xg}$  e  $f_{xh}$  para o Conversor proposto -  $I_f = 6 \text{ A}$

## CAPÍTULO 9

### O CONVERSOR ASSÍNCRONO LINEAR EM ENSAIO

#### 9.1. INTRODUÇÃO

O Conversor Assíncrono Linear, em contraste com o rotativo, possui extremidades longitudinais de entrada e de saída e pode possuir espessura de entreferro mais pronunciada. Nos CALs, podendo o entreferro chegar a 20 mm e associado aos Efeitos de Extremidades, principalmente, é normal encontrar-se:

- i) Redução da potência de saída em CALs operando como motores;
- ii) Perda de Pressão em bombas eletromagnéticas;
- iii) Baixo rendimento e pequena relação potência - peso, em todos os casos.

Estes e outros pontos caracterizam-se como desafios para o projetista de CALs. A espessura do entreferro influi, diretamente, no Fator de Qualidade e, portanto, na habilidade do conversor em efetuar conversão eletromecânica de energia. Os Efeitos de Extremidades reduzem o rendimento e o fator de potência esperados, tornando necessário a introdução de compensadores para

minimizar, principalmente, o Efeito Longitudinal de Extremidade.

$$G = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot \omega_s}{\rho_R \cdot \Pi^2 \cdot g^T} \quad (9.1)$$

A equação (9.1) conduz à conclusão que o aumento de espessura pode ser compensado com atuação sobre parâmetros outros do conversor, como, por exemplo, a resistividade superficial do linor. Esta solução pode não ser de execução prática, dado ser o alumínio o candidato natural a linor. Desta forma, se o objetivo do projetista é aumentar a habilidade de um conversor que opere com entreferro espesso, a única solução prática é atuar sobre o passo polar e a frequência, para uma determinada Velocidade Linear Síncrona. Portanto, CALs que possuam compromisso com a prática, estão, inexoravelmente, ligados à variação de frequência e, conseqüentemente, à Eletrônica de Potência.

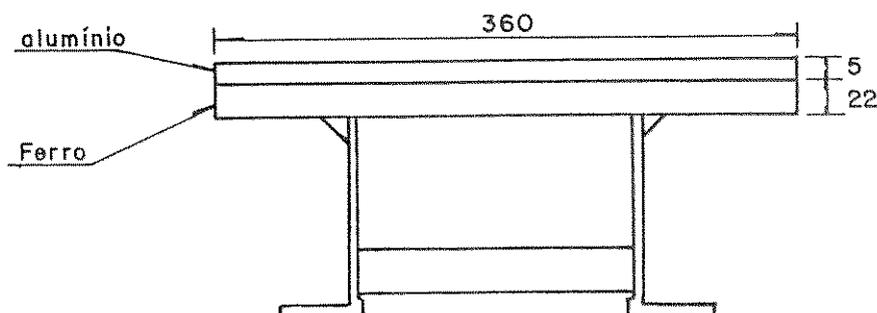
Para a redução da presença do Efeito Longitudinal de Extremidade, tem sido sugerido pelos pesquisadores alterações em enrolamentos e novas modelagens para o indutor [4].

O Metrô de Osaka, usando um indutor laminado e enrolado, com residência no veículo e uma placa de reação instalada entre trilhos, alcançou:

- i) Redução na manutenção preventiva e corretiva;
- ii) Redução na secção reta de túneis, com conseqüente redução no custo de implantação;

- iii) Veículos confortáveis com alturas menores, maior estabilidade e custos finais menores;
- iv) Maiores aclives, dado as rodas não serem elementos de propulsão. O aclive a ser admitido é função do conforto do usuário e da potência dos acionadores.
- v) Pequeno ruído operacional, em decorrência do pequeno atrito roda-trilho, ausência de engrenagens e modificação do sistema de sustentação do veículo.

A placa de reação é um integrado alumínio e ferro, instalada entre trilhos e com dimensões mostradas à Figura (9.1).



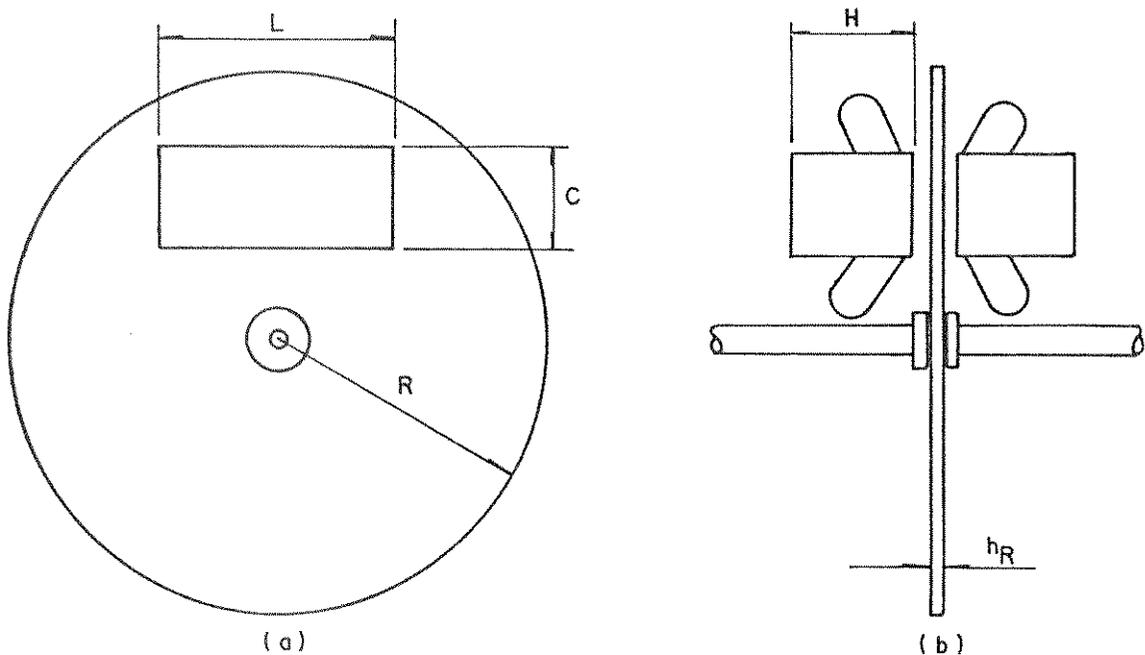
Medidas em Milímetros

Figura 9.1: Placa de Reação do Metrô de Osaka - Japão

## 9.2. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DO PROTÓTIPO - BRU - 03

Em face da complexidade da execução de uma pista de

translação sobre a qual o indutor ou indutores pudessem transladar-se ou também da construção de uma lâmina que pudesse transladar-se entre indutores, optou-se pela construção de dois indutores ativos, estáticos, compreendendo um entreferro e neste colocou-se a girar, livre, um disco de alumínio naval, usinado. O conjunto de estatores recebeu um enrolamento trifásico e, eletricamente conectados, tem suas forças magnetomotrizes adicionadas. No entreferro formado, opera o disco de alumínio, que caracteriza o linor.



a: vista frontal:  $R = 200 \text{ mm}$   $H = 50 \text{ mm}$   $L = 290 \text{ mm}$

b: vista lateral:  $C = 40 \text{ mm}$   $h_R = 5,6 \text{ mm}$

Figura 9.2: Protótipo de um Conversor Assíncrono Linear – BRU-03

a) Indutores: Executados em chapa de ferro-silício, sem orientação preferencial, possuem, cada um, 18 ranhuras e um enrolamento de camada única com 40 condutores ativos por ranhura, de # 17 AWG -  $1,0381 \text{ mm}^2$

- classe de isolamento H.

$N_{RE}$ : 18 ranhuras por indutor

$N_F$ : 240 condutores ativos por indutor e por fase

b) Linor: Executado em alumínio naval, tem forma de disco, diâmetro de 400 mm e espessura de 5,6 mm.

c) Ranhuras: Os indutores são dotados de ranhuras semi-fechadas, de lados paralelos e possuem a forma e as dimensões mostradas na Figura (9.3).

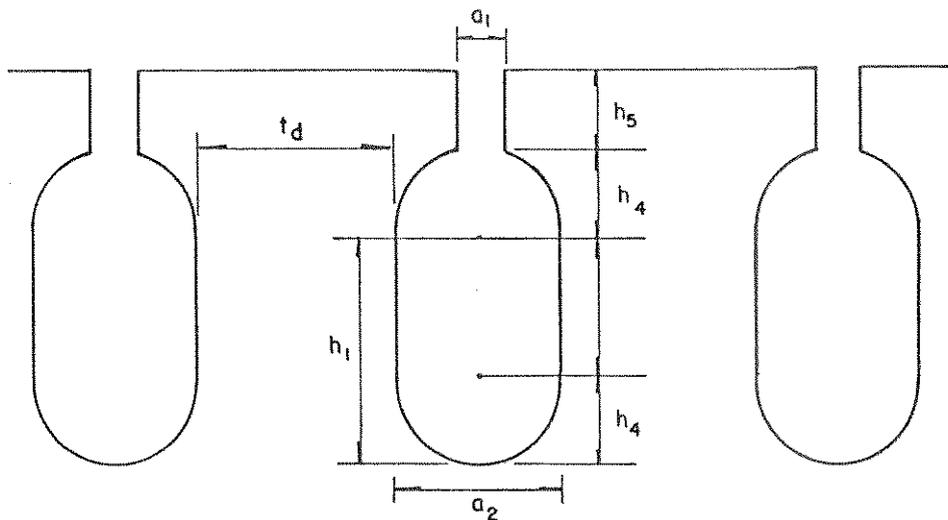


Figura 9.3: Ranhuras Indutóricas do protótipo

As ranhuras indutóricas tem as dimensões:

$$h_1 = 15,2 \text{ mm}$$

$$h_4 = 3,5 \text{ mm}$$

$$h_5 = 2,9 \text{ mm}$$

$$a_1 = 1,5 \text{ mm}$$

$$a_2 = 7,0 \text{ mm}$$

$$t_d = 7,7 \text{ mm}$$

$$S_{RANH} = 120 \text{ mm}^2$$

d) **Eixo Motor:** O referido conversor está dotado de uma polia em V, de sulco único, que possibilita o tracionamento.

e) **Entreferro:** Nos CALs de dupla face deve-se atentar para a diferença entre entreferro e abertura de ar. O entreferro é a distância física entre os dois indutores. No protótipo BRU-03, o entreferro pode ser ajustado a partir de apoios de indutores. Para o presente estudo, o entreferro foi ajustado em 7,9 mm.

### 9.3. ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE DADOS

Cumprе ressaltar que os CALs podem ser submetidos a testes de linor livre e de linor bloqueado, porém tais testes não conduzem aos parâmetros corretos do Circuito Elétrico Equivalente. Para desenvolver-se o referido circuito, seus parâmetros devem ser calculados a partir das equações desenvolvidas no Capítulo 7, simulado através do programa simulador já citado e os resultados, comparados com os obtidos, empregando-se a equação (7.64). Com os parâmetros do circuito elétrico obtidos por equações, simula-se a operação do conversor. Se estes parâmetros estiverem corretos, as curvas 1 e 2 da Figura 9.4, coincidem.

Os protótipos BRU-01 e BRU-02 são, respectivamente, um conversor plano que opera sobre uma lâmina de ferro de 4mm de espessura e um conversor de arco que possui um estator com abertura de 90° e rotor cilíndrico, dotado de gaiola de esquilo.

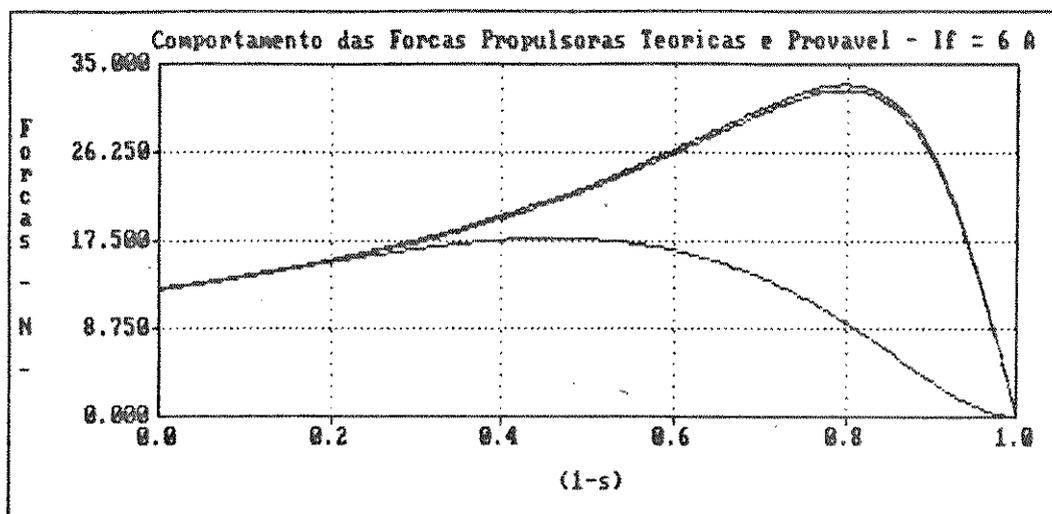
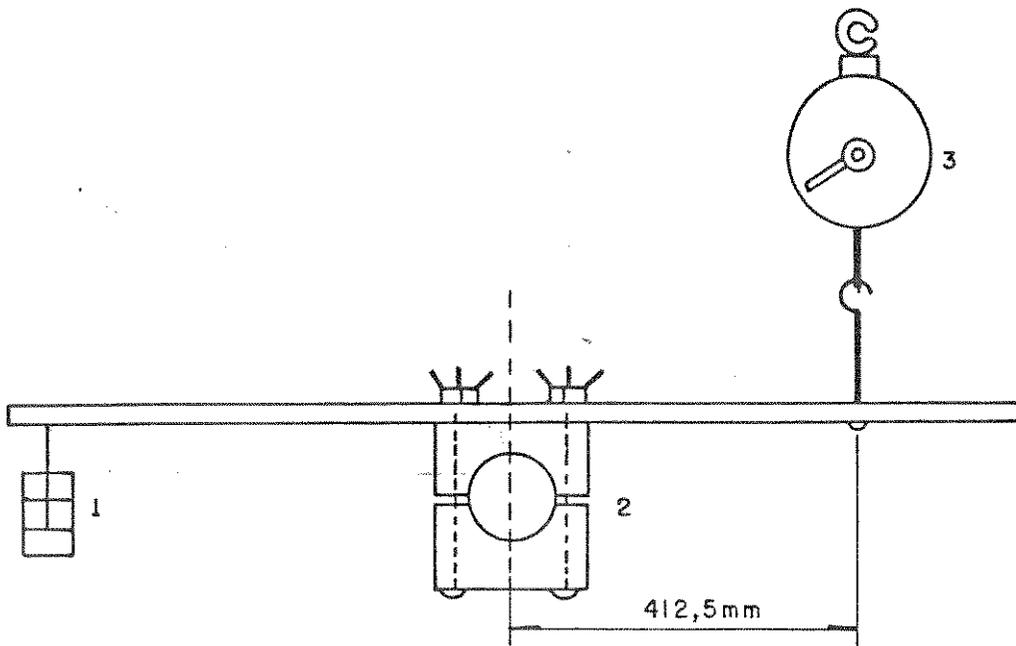


Figura 9.4: Comportamento das Forças Propulsoras para  $I_f = 6,0 \text{ A}$

### 9.3.1. FREIO DE PRONY

De início, usou-se para o ensaio do conversor, um freio eletrodinâmico, porém a vibração da correia, em altos escorregamentos, era transmitida ao freio e deste ao dinamômetro, de forma que as leituras se faziam impossíveis. Após análises, concluiu-se pelo uso do Freio de Prony, o qual já havia sido empregado pelas referências [2] e [23], com sucesso.

O Freio empregado, possui as características mostradas na Figura (9.5). É confeccionado em madeira de pinho e possui um conjunto de sapatas que, por meio de parafusos e borboletas, aperta uma polia de 100 mm colocada na ponta do eixo mecânico do conversor. Um sistema de massas opera como contra-peso e é responsável pelo equilíbrio do braço do freio. Um dinamômetro com fundo de escala de 2 kgf e divisões de 20 gf, é empregado para aquilatar a força à ponta ativa do freio.



1 - contra-peso    2 - aperta polia    3 - dinamômetro

Figura 9.5: Freio de Prony

### 9.3.2. ENSAIO A CORRENTE CONSTANTE

A técnica de projeto desenvolvida tem como filosofia básica a operação em corrente constante. Ocorre que em um CAL com pequeno número de pólos, a corrente elétrica que circula pelas fases é desequilibrada, se a tensão for equilibrada. Como o regulador de tensão disponível, é trifásico, fica impossível comandar fase por fase. Em face desta dificuldade, definiu-se:

$$I_F = \left[ \frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}{3} \right]^{1/2} \quad (9.2)$$

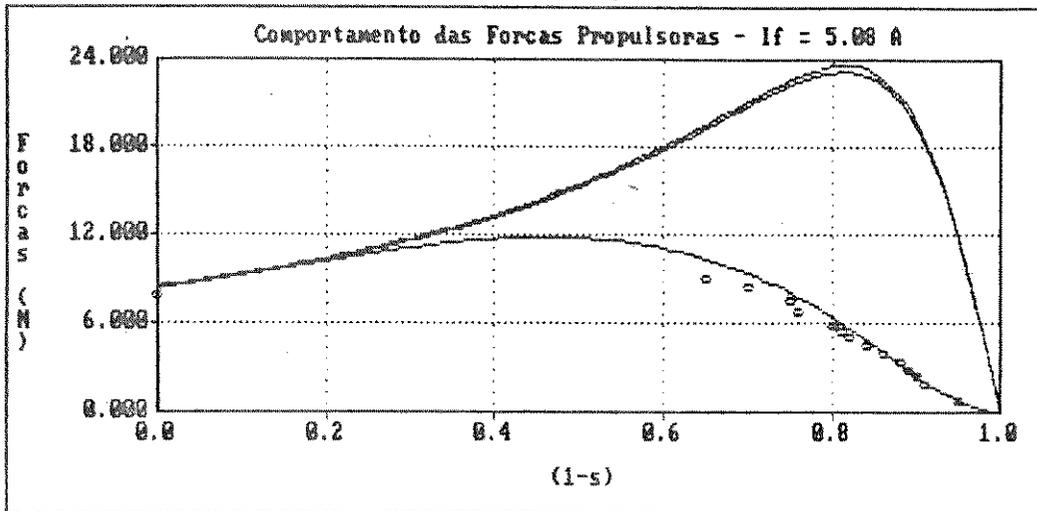
Operando-se com a equação (9.2), estabeleceu-se um valor de corrente  $I_F$ , constante para o ensaio.

1º Ensaio:  $I_r = 5A$ 

IF(A)	VM(V)	WF(W)	1-S	F(N)	cos $\phi$	w(rad)	$\eta$
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
Imedia(A)							
5,08							

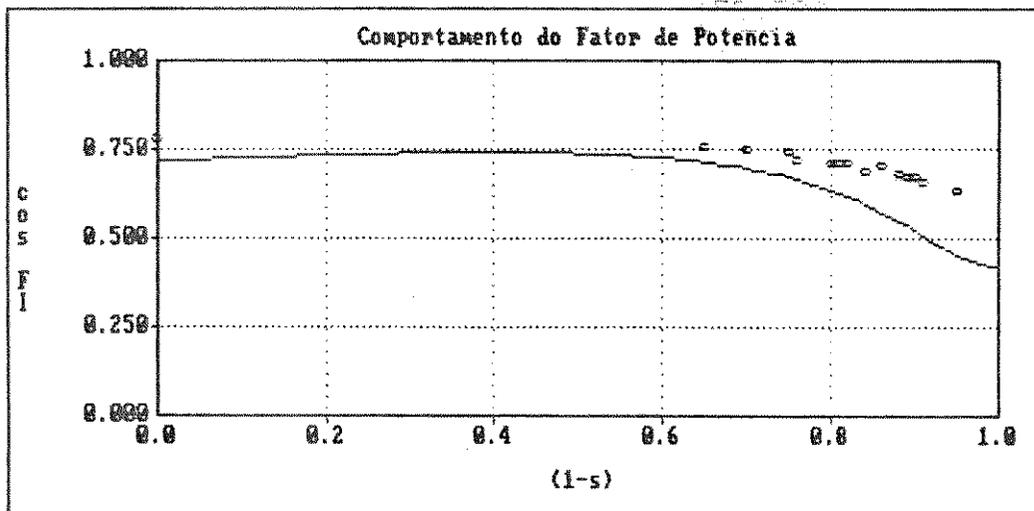
Tabela 9.1: Dados de Ensaio para a Corrente de 5,08A

Como os dados espelhados na Tabela 9.1, pode-se simular o comportamento do conversor em estudo.



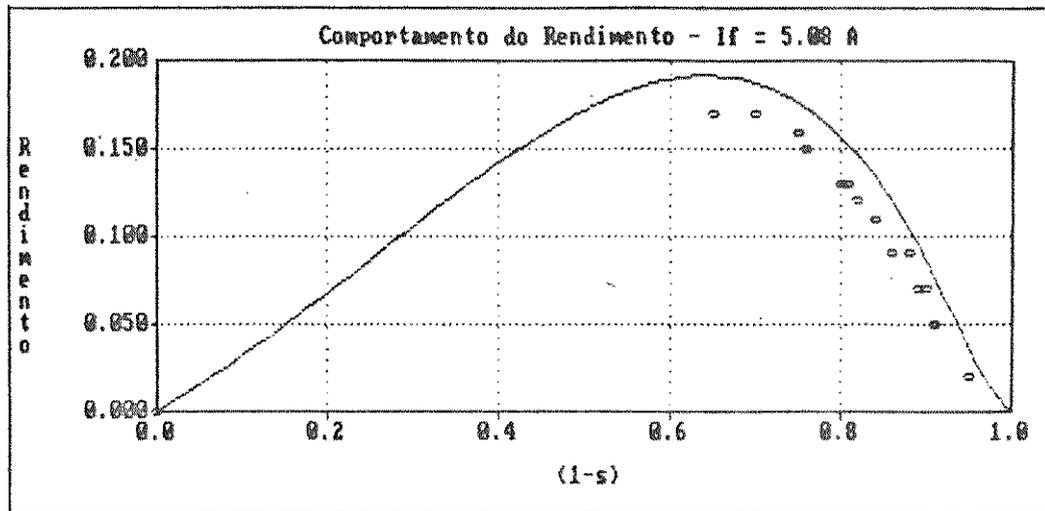
————— ..... Força Propulsora Calculada -  $f_{xg}$  -  
 ○ ○ ○ ○ ○ ..... Força propulsora obtida em ensaio

Figura 9.6: Comportamento da Forças Propulsoras



————— ..... Fator de Potência Calculado  
 ○ ○ ○ ○ ○ ..... Fator de Potência obtido em ensaio

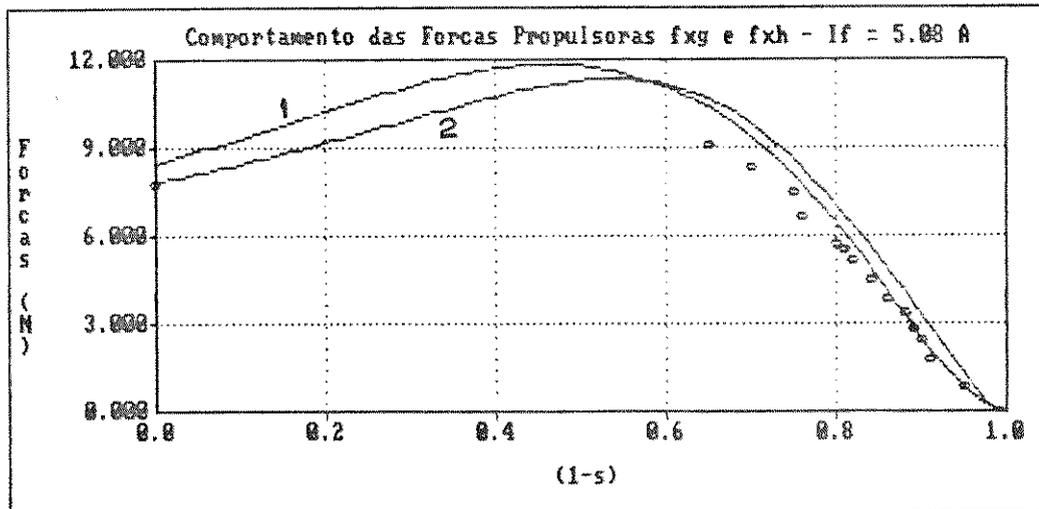
Figura 9.7: Comportamento dos Fatores de Potência



———— Rendimento Calculado

o o o o o ..... Rendimento obtido em ensaio

Figura 9.8: Comportamento dos Rendimentos



curva 1: Força Propulsora -  $f_{xg}$

curva 2: Força Propulsora -  $f_{xh}$

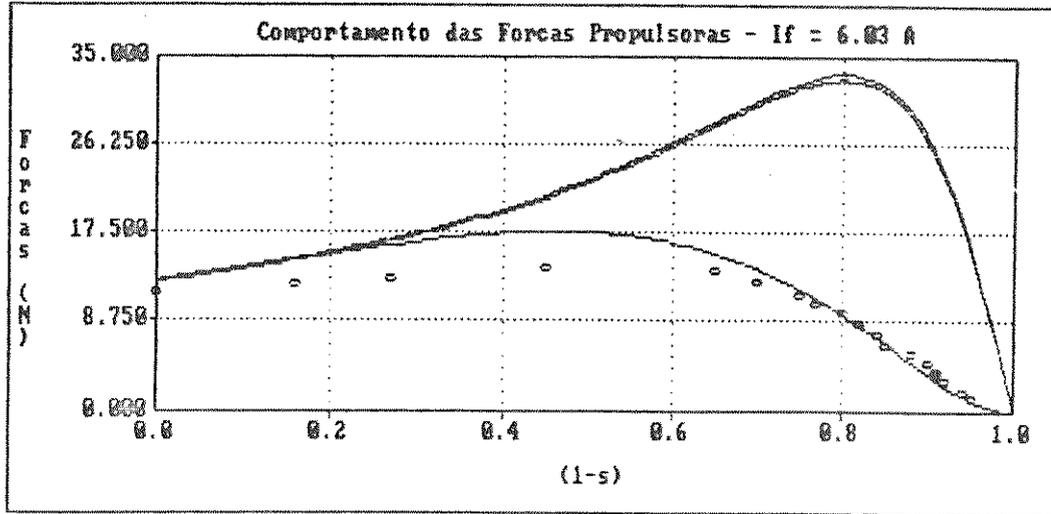
Figura 9.9: Comportamento das Forças Propulsoras  $f_{xg}$  e  $f_{xh}$

29 Ensaio:  $I_f = 6A$ 

IF(A)	VF(V)	WF(W)	1-S	F(N)	cos $\phi$	w(rad)	$\eta$
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
Imedia(A)							
6,03							

Tabela 9.2: Dados de Ensaio para Corrente de 6.03A

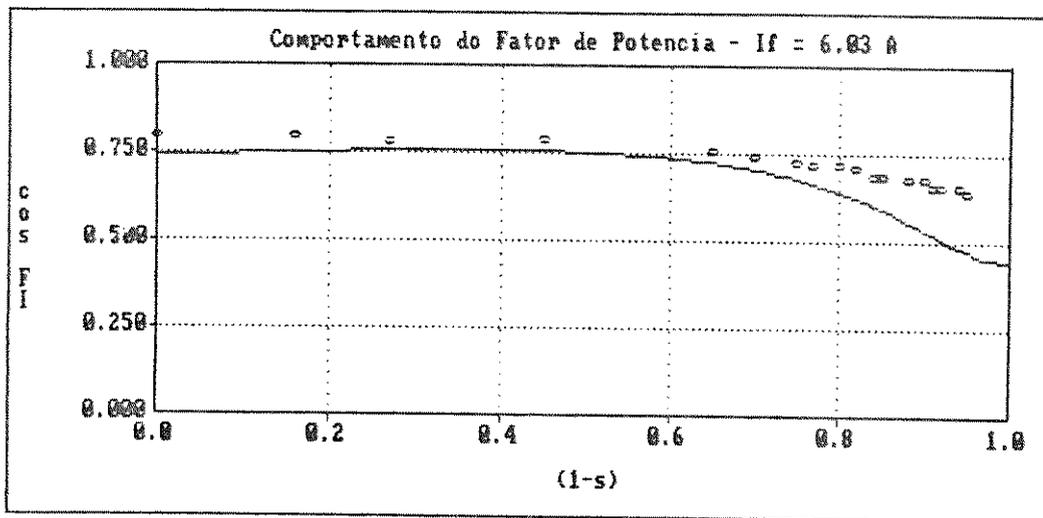
Com os dados espelhados na Tabela 9.2, pode-se simular o comportamento do conversor em estudo:



————— .... Força Propulsora Calculada -  $f_{xg}$

o o o o o .... Força Propulsora obtida em ensaio

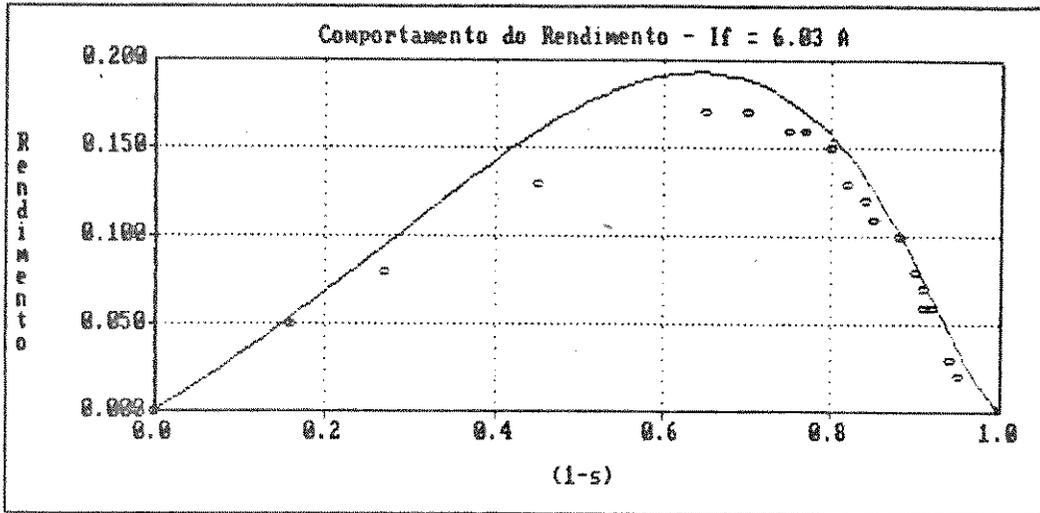
Figura 9.10: Comportamento das Forças Propulsoras



————— .... Fator de Potência Calculado

o o o o o .... Fator de Potência obtido em ensaio

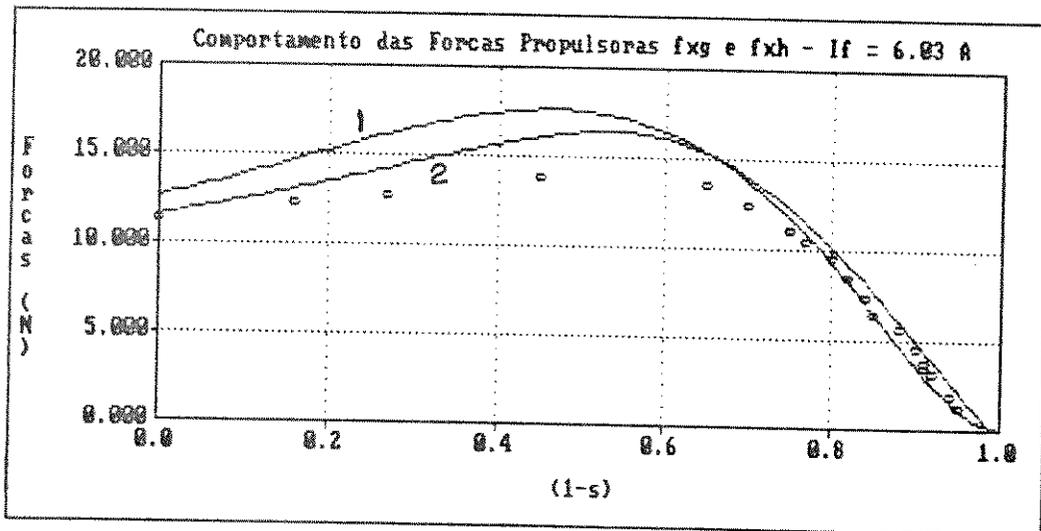
Figura 9.11: Comportamento dos Fatores de Potência



————— ..... Rendimento Calculado

o o o o o ..... Rendimento obtido em ensaio

Figura 9.12: Comportamento dos Rendimentos



curva 1: Força Propulsora -  $f_{xg}$

curva 2: Força Propulsora -  $f_{xh}$

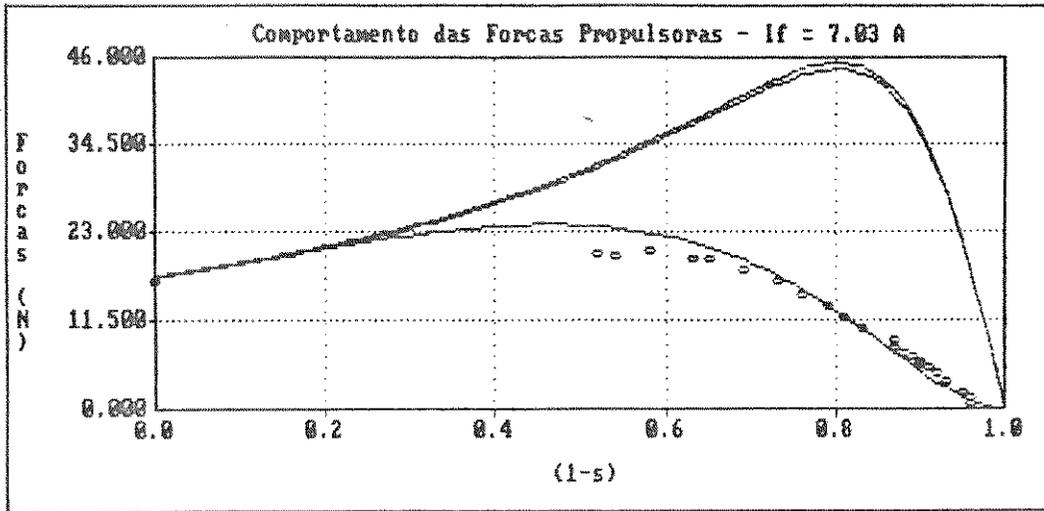
Figura 9.13: Comportamento das Forças Propulsoras  $f_{xg}$  e  $f_{xh}$

39 Ensaio:  $I_F = 7A$ 

IF(A)	VF(V)	WF(W)	1-S	F(N)	cos $\phi$	w(rad)	$\eta$
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
Imedia(A)							
7,03							

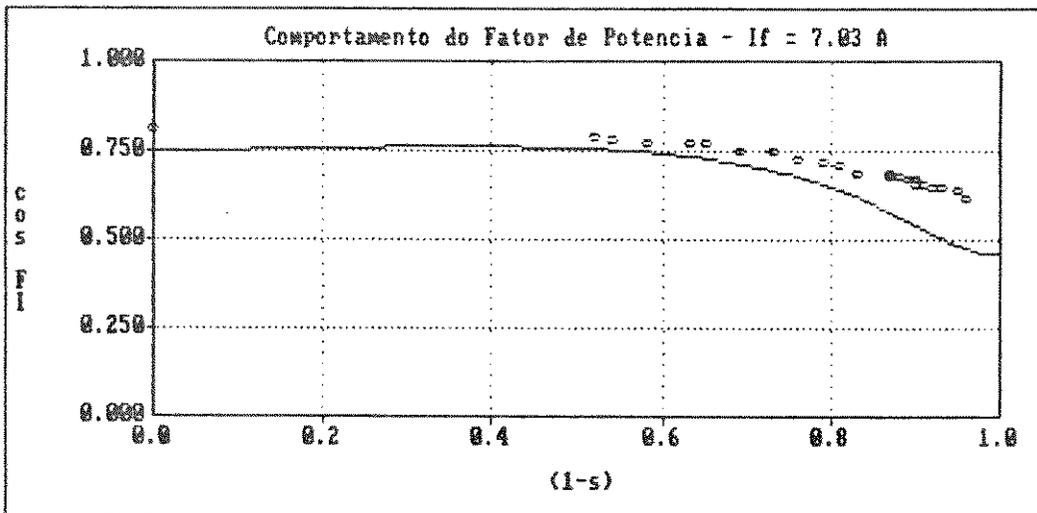
Tabela 9.3: Dados de Ensaio para Corrente de 7,03A

Com os dados obtidos no ensaio e espelhados na Tabela 9.3, simulou-se o comportamento do conversor em estudo:



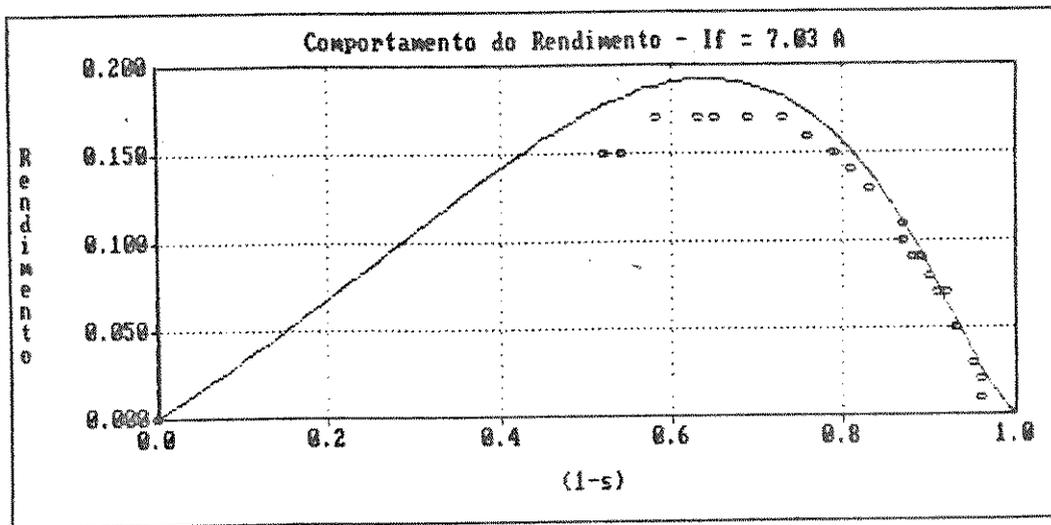
————— ..... Força Propulsora Calculada -  $f_{xg}$   
 o o o o o ..... Força Propulsora obtida em ensaio

Figura 9.14: Comportamento das Forças Propulsoras



————— ..... Fator de Potência Calculado  
 o o o o o ..... Fator de Potência obtido em ensaio

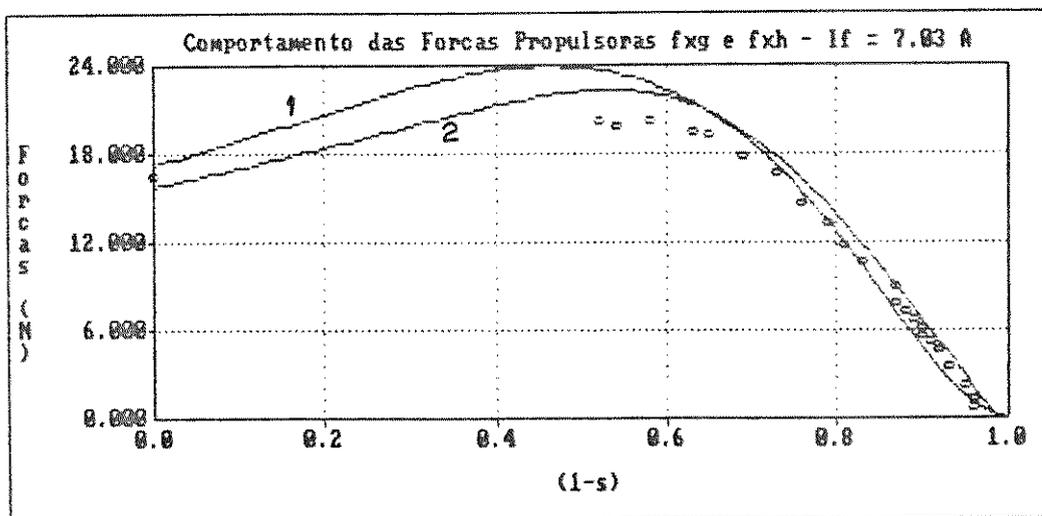
Figura 9.15: Comportamento dos Fatores de Potência



———— Rendimento Calculado

o o o o o ..... Rendimento Obtido em ensaio

Figura 9.16: Comportamentos do Rendimentos



curva 1: Força propulsora -  $f_{xg}$

curva 2: Força Propulsora -  $f_{xh}$

Figura 9.17: Comportamento das Forças Propulsoras  $f_{xg}$  e  $f_{xh}$

#### 9.4. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

Como se pode observar a partir das Figuras e Tabelas que antecedem, os resultados obtidos nos Ensaios e as Simulações efetuadas sustentam a teoria desenvolvida e a técnica de projeto. Os valores mostrados nas telas do Capítulo 8 permitiram o desenvolvimento de simulações e estas, comparadas com os valores obtidos com o protótipo BRU-03, dão sustentação ao Capítulo 7, onde foi desenvolvido todo o conjunto de equações que permitem calcular o conversor. Desta forma, pode-se dizer, com toda segurança, que o conjunto de equações desenvolvido no referido Capítulo, forma a base necessária para o projeto de Conversores Assíncronos Lineares de Dupla Face, que é o objetivo primacial desta Tese.

#### 9.5. CONCLUSÕES

A associação das equações obtidas no Capítulo 7 com a Rotina Computacional exposta no Capítulo 8, permite, sem sombra de dúvida, determinar os parâmetros elétricos e mecânicos dos Conversores Assíncronos Lineares. A associação do Programa 'PROCAL' à Rotina Simuladora desenvolvida na referência [31], permite ao pesquisador desenvolver CALs de Dupla Face dotados de linores não magnéticos e pesquisar seus prováveis comportamentos. As Figuras (9.18), (9.19) e (9.20) dizem respeito ao comportamento do conversor em si e independem das correntes a que o mesmo é submetido.

A figura (9.18) refere-se ao Fator Corretor  $K_s$ , de Bolton. Pode-se observar que o referido fator é muito pouco menor do que a unidade. Assim, a reatância de magnetização, que é sobre

quem atua o mencionado fator, pouco varia com sua presença.

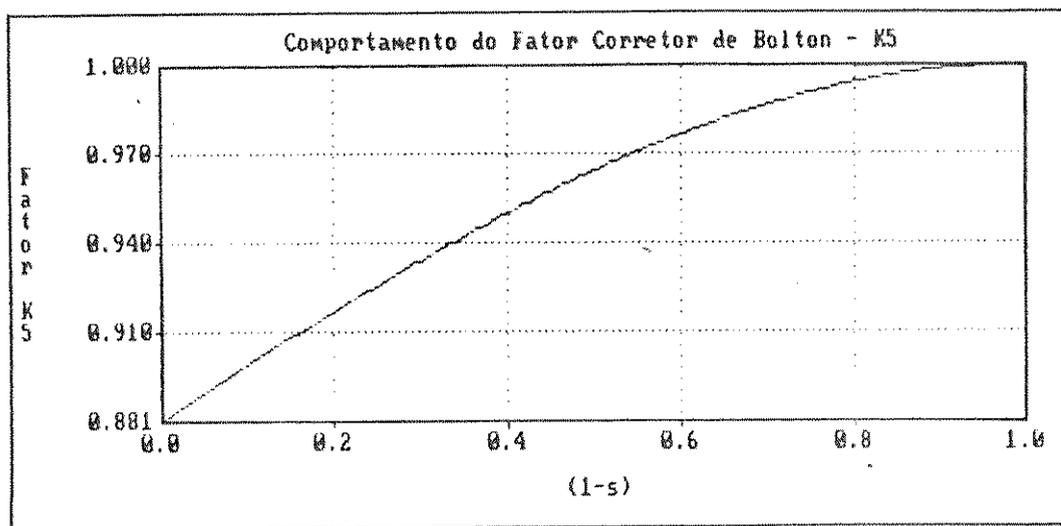


Figura 9.18: Fator Corretor de Bolton -  $K_5$

A Figura (9.19) mostra, superpostos, os Fatores Corretores de Bolton -  $K_5$  - e de Russell -  $K_s$ . Como se pode observar, a variação entre  $K_s$  e  $1/K_s$  é tão pequena que o projetista pode trabalhar com o Fator de Russell, sem cometer erros ou desvios que comprometam o projeto. Como estes fatores atuam sobre a resistividade da lâmina linórica, o uso do Fator de Russell é extremamente mais simples, tornando menos lento o processo de projeto de CALs de Mono e Dupla Faces Elétricas.

Na Figura (9.20) os Fatores Corretores de Bolton e de Russell são superpostos e a escala vertical é alterada, podendo-se observar o pequeno desvio existente entre  $K_s$  e  $1/K_s$ .

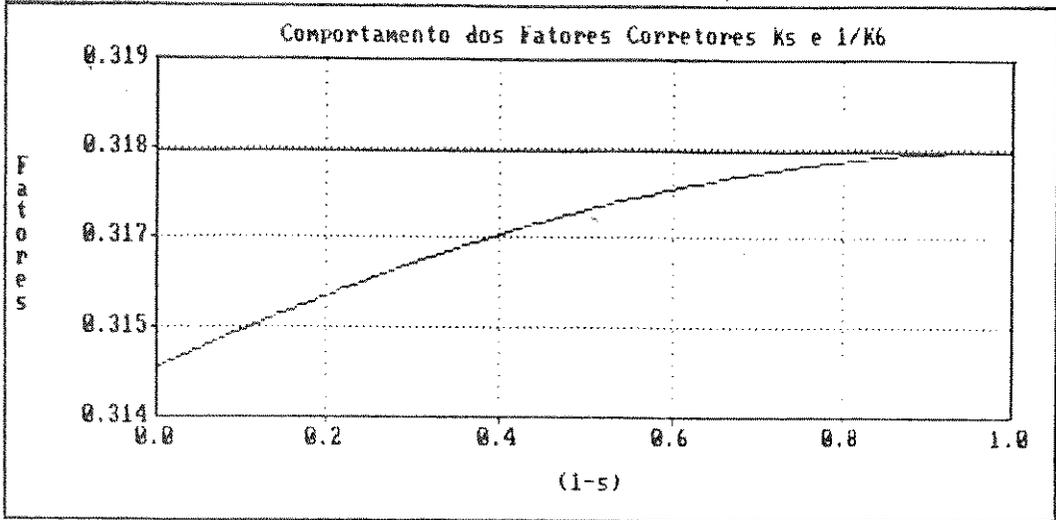


Figura 9.19: Fatores Corretivos de Bolton -  $K_6$  e de Russell -  $K_s$

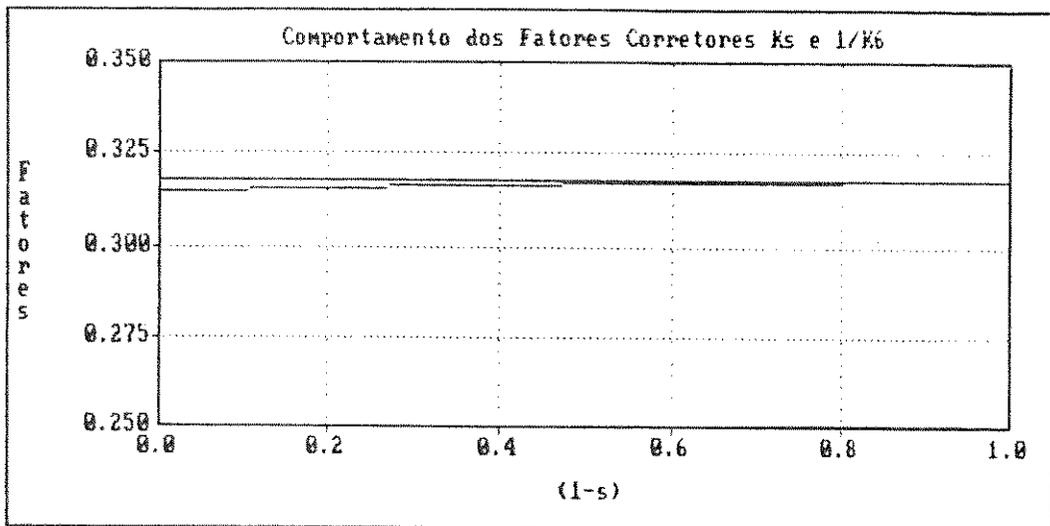


Figura 9.20: Fatores Corretivos de Bolton -  $K_6$  e de Russell -  $K_s$   
(Escala Vertical Alterada)

## CAPÍTULO 10

### COMENTARIOS E CONCLUSÕES

#### 10.1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho foi efetuado um estudo pormenorizado dos Conversores Assíncronos Lineares, dos efeitos que os acompanham e das equações que se fazem presente, objetivando compensá-los. Analisou-se o Fator de Qualidade e suas possibilidades no estudo dos CALs e desenvolveu-se uma Técnica de Projeto para os referidos conversores, técnica esta que oferece recursos para compensar a presença dos diversos efeitos prejudiciais que perturbam a operação desta família de conversores.

O uso da técnica de projeto proposta adaptou-se muito bem a um conversor com Velocidade Linear Síncrona de 15 m/s e que, de acordo com S. Yamamura, se caracteriza como um elemento com comportamento de Conversor de Alta Velocidade, onde os Efeitos de Extremidades se fazem sentir. As figuras (8.9), (8.10), (8.11) (8.12) e (8.13) são mostras da profunda atuação dos Efeitos de Extremidades.

A indisponibilidade de um Inversor de Corrente Constante, não permitiu a execução de ensaios mais apurados e a frequências diferentes da industrial. Cumpre, porém, ressaltar que as

análises teóricas desenvolvidas, a técnica de projeto proposta e a execução e testes do protótipo, propiciaram um conhecimento dos CALs dotados de linor não magnético, que suplanta, de muito, a impossibilidade de testes complementares e permite que se faça sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de modelo magneticamente linear que permita simulação dinâmica dos CALs, em regime transitório e permanente;
- Análise das possibilidades da aplicação dos CALs na irrigação agrícola, empregando-se rotores furados radialmente e impulsionados a altas velocidades;
- Análise das possibilidades da aplicação dos CALs, associados a inversores, no transporte e distribuição de ração em granjas, em confinamento de reses, no acionamento de correias metálicas - transportadoras para traslado de grãos, de congelados, de carne em estágios de preparação em abatedouros de aves e de reses;
- Desenvolvimento de modelo matemático para CALs que operem com pista de reação ferromagnética, para o acionamento de veículos ferroviários e metroviários;
- Partindo da equação (7.64), desenvolvimento de

teoria para os conversores assíncronos rotativos, dotados dos mais vários rotores, visando técnicas de controle.

- Desenvolvimento de sistemas mecânicos operados com CALs, que possam acionar misturadores nas indústrias de refrigerantes e xaropes, em geral.

À medida que se tornam conhecidos e que se desenvolvem formas melhores de controle, os CALs passam a ter mais importância como fonte alternativa de força motriz. Isto, por si só, justifica um maior empenho no seu estudo, aprimoramento, metodologias de projeto e aumento do campo de utilização desta família de conversores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AEG - TELEFUNKEN - "O Motor Linear na Técnica de Acionamento"  
-Revista Mundo Elétrico - Agosto - 1980.
- [2] SIMONE, G. A. - " Uma Contribuição ao Estudo dos Conversores Assíncronos Lineares" - Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia-M.G. - 1989
- [3] LAITHWAITE, E. R. - "Linear Induction Motor" - Proc. IEE - Paper Nº 2433U - Dezembro - 1957
- [4] YAMAMURA, S. - "Theory of Linear Induction Motors" - University of Tokio Press - Japão - 1972
- [5] LAITHWAITE, E.R. - "Máquinas de Inducción Especiales" - Editorial Labor, S.A. - Barcelona - Espanha - 1976
- [6] CABRITA, C. M. P. - "Motor Linear de Indução - Análise Teórica, Projeto e Ensaio" - Tese de Doutorado - Instituto Electrotécnico de Lisboa - Portugal - 1988
- [7] NASAR, S. A. - "Electromagnetic Energy Conversion" - Prentice - Hall, Inc. - Nova Jersey - EUA - 1970

- [8] YAMAMURA, S. et alii - "Theories of The Linear Induction Motors" - IEEE Trans. on Power Apparatus Systems - Vol. 91 - Julho/Agosto 1972
- [9] BOLDEA, I e NASAR, S. A. - "Linear Motion Electromagnetic Systems" - John Wiley and Sons, Inc. Nova York - EUA - 1985
- [10] GIERAS, J.F. et alii - "A New Longitudinal End Effect Factor for Linear Induction Motors" - IEEE Trans. on Energy - Conversion - Vol. Ec. 2 - Março - 1987
- [11] BOLTON, H. - "Transverse Edge Effect in Sheet Rotor Induction Motors - Proc. IEE - Vol. 116 - Maio - 1969
- [12] Mc LEAN, G. W. - "Review of Recent Progress in Linear Motors" - Proc. IEE - Vol. 135 - Novembro - 1988
- [13] LAITHWAITE, E. R. - "The Goodness of a Machine" - Proc. IEE - Vol 112 - Março - 1965
- [14] LAITHWAITE, E. R. - "Linear Motion Electrical Machines" - Proc. IEEE - Vol., 58 - Abril - 1970
- [15] LAITHWAITE, E. R. - "Linear Electric Machines a New View" - Proc. IEEE - Vol. 63 - Fevereiro - 1975
- [16] BOLDEA, I. e NASAR S. A. - "Optimum Goodness Criterion for Linear Induction Motors Design - Proc. IEE - Vol 123 - Janeiro - 1976

- [17] RUSSELL, R. L. et alii - "Eddy Currents and Wall Losses in Screened - Rotor Induction Motors" - Proc. IEE - Vol.195A - 1958
- [18] NASAR, S. A. e BOLDEA, I - "Linear Electric Motors - Theory, Design and Pratical Applications" - Prentice - Hall, Inc, Englewood Cliffs - Nova Jersey - EUA - 1987
- [19] KOSTENKO, M. P. et alii - "Electrical Machines" - Vol. 2 - Mir Publishing - Moscou - 1980
- [20] OOI, B. T. - "A Generalized Machine Theory of the Linear Induction Motor" - IEEE Trans. on Power Apparatus and - Systems - Vol. 92 - Julho/Agosto - 1973
- [21] BARLOW, H. E. M. et alii - "Travelling Field Theory on - Induction Types Instruments and Motors" - Proc. IEE - Vol. 112 - Junho - 1965.
- [22] HIRASA, T. et alii - "Equivalent Circuit of Linear Induction Motor with End Effect Taken Into Account" - IEE Transac. - Japan, Vol. 100 - Nº 2 - 1980
- [23] SIMONE, G. A. et alii - "O Motor Assíncrono Linear para - Baixas Velocidades - Uma Técnica de Projeto" - II Seminário Internacional de Motores Elétricos e Acionamentos - Reguláveis - São Paulo - Vol. 4 - 1991

- [24] GUY, A. G. - "Ciência dos Materiais" - Editora da Universidade de São Paulo - São Paulo - 1980
- [25] LOBOSCO, O. S. et alii - "Seleção e Aplicação de Motores Elétricos" - Editora McGraw - Hill - São Paulo - Vol. 1 - 1988
- [26] POLOUJADOFF, M. - "The Theory of Linear Induction Machinery" - Oxford University Press - Inglaterra - 1980
- [27] KONIGSLOW, A. - "Maquinas de Corriente Alternada Sincronicas" - Editorial Labor S.A. - Barcelona - Espanha - Vol. 5 - 1965
- [28] NASAR, S. A. et alii - "Linear Motion Electric Machines" - John Wiley and Sons - Nova York - EUA - 1976
- [29] ELECTRIC VEHICLE DEVELOPMENT - Vol. 7 - Nº 2 - Abril - 1988
- [30] NIKOLSKI, V. V. - "Electrodinámica y Propagación de Ondas de Rádio" - Editorial Mir - Moscou - 1976
- [31] CREPPE, R. C. - "Circuito Elétrico Equivalente para Conversores Assíncronos Lineares" - Tese de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas - S.P. - 1992
- [32] SIMONE, G. A. et alii - "O Motor Setorial - Uma Técnica de Análise" - II Simpósio de Pesquisa e Pós-Graduação - UNESP - Campos do Jordão - S.P. - 1991

- [33] ALGER, P. L. - "The Nature of Polyphase Induction Machines" -  
John Wiley and Sons - Londres - 1951
- [34] LANGSDORF, A. S. - "Teoria de las Máquinas de Corriente -  
Alterna" - Editorial Mc Graw - Hill del México - México -  
1971
- [35] LAITHWAITE, E. R. - "Linear Electric Machines - A Personal  
View" - IEEE Proc. - Vol. 63 - N° 3 - 1975

## APENDICE I

### FATOR DE CARTER

#### AI.1. INTRODUÇÃO

O efeito produzido no entreferro ou no comportamento do fluxo magnético que atravessa o entreferro, pela presença de ranhuras nos indutores, faz com que o entreferro efetivo ("visto" pelo fluxo magnético) seja fisicamente maior do que o real. F.W. Carter demonstrou que o 'acrécimo' ao entreferro real, pode ser determinado a partir da expressão:

$$\Delta g = g_e - g \quad (\text{AI.1})$$

com:

$$g_e = K_c \cdot g \quad (\text{AI.2})$$

onde  $K_c$  representa o Fator de Carter, definido por:

$$K_c = t_{PR} / \alpha_R \quad (\text{AI.3})$$

$$\alpha_R = t_{PR} - \left[ \frac{(a_1/g)^2}{(s + a_1/g)} \right]$$

onde  $t_{pr}$  é o passo de ranhura,  $a_1$  é a abertura da ranhura e  $g$  é a espessura do entreferro real, tendo as dimensões, iguais unidades.

Se o conversor é de duplo indutor elétrico e ambos indutores são ranhurados, os respectivos Fatores de Carter são calculados independentemente, obtendo-se  $K_{c1}$  e  $K_{c2}$ . O Fator de Carter Combinado, será igual ao produto de ambos.

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} \quad (AI.4)$$

que caracteriza o caso geral. Se ambos os indutores possuírem idêntico ranhuramento, escreve-se:

$$K_c = (K_{c1})^2 \quad (AI.5)$$

## APENDICE II

### COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO EM UM CAL OPERANDO EM VAZIO

#### AII.1. ASPECTOS GERAIS

No Capítulo 3, para um CAL de dupla face a linor laminar, escreveu-se:

$$\frac{\delta b(x,t)}{\delta x} \cdot dx = \left[ \frac{\mu_0}{g} \cdot J_s(x,t) \right] \cdot dx \quad (\text{AII.1})$$

onde:

$$b(x,t) = \left[ \frac{\mu_0}{g} \cdot J_M \right] \cdot \int_L \cos(w_s \cdot t - \Pi \cdot x/t_p) dx \quad (\text{AII.2})$$

ou ainda:

$$b(x,t) = \left[ \frac{\mu_0}{g} \cdot \frac{t_p}{\Pi} \cdot J_M \right] \cdot \left[ -\text{sen}(w_s \cdot t - \frac{\Pi \cdot x}{t_p}) \right] + C_1 \quad (\text{AII.3})$$

A constante de integração -  $C_1$  - é obtida a partir das condições de contorno, impostas ao conversor:

$$b(x = 0, t) = 0 \quad b(x = p \cdot t_p, t) = 0 \quad (\text{AII.4})$$

ou ainda:

$$\int_0^{p \cdot t_p} \left[ \frac{\mu_0}{g} \cdot \frac{t_p}{\pi} \cdot J_M \right] \text{sen}(w_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p) dx + C_1 dx = 0$$

sendo:

$$y = (w_s \cdot t - \pi \cdot x/t_p)$$

$$dy = - (\pi / t_p) dx$$

com:

$$A_1 = \left[ \frac{\mu_0}{g} \cdot \frac{t_p^2}{\pi^2} \right] \cdot J_M$$

e:

$$A_1 \int_{w_s \cdot t}^{w_s \cdot t - \pi \cdot p} \text{sen } y \, dy + C_1 \int_0^{p \cdot t_p} dx = 0$$

ou ainda:

$$- A_1 \left[ \cos(w_s \cdot t - \pi \cdot p) - \cos(w_s \cdot t) \right] = - C_1 \cdot p \cdot t_p$$

(AII.5)

operando a equação (AII.5), obtém-se:

$$C_1 = \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p \cdot J_M}{g \cdot \pi^2 \cdot p} \right] \cdot \left[ \cos(w_s \cdot t) \cos(\pi \cdot p) + \right. \\ \left. + \text{sen}(w_s \cdot t) \text{sen}(\pi \cdot p) - \cos(w_s \cdot t) \right]$$

$$C_1 = \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p \cdot J_M}{g \cdot \Pi^2 \cdot p} \right] \cdot \left[ \cos(w_s \cdot t) \cdot (\cos^2(\Pi \cdot p/2)) + \right. \\ \left. - \sin^2(\Pi \cdot p/2) + \sin(w_s \cdot t) \cdot 2 \cdot \sin(\Pi \cdot p/2) \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos(\Pi \cdot p/2) - \cos(w_s \cdot t) \right] \quad (\text{AII.6})$$

$$C_1 = C_3 \left[ \cos(w_s \cdot t) \cdot (1 - 2 \cdot \sin^2(\Pi \cdot p/2)) + \right. \\ \left. + \sin(w_s \cdot t) \cdot 2 \cdot \sin(\Pi \cdot p/2) \cdot \cos(\Pi \cdot p/2) - \cos(w_s \cdot t) \right] \quad (\text{AII.7})$$

com:

$$C_3 = J_M \cdot \left[ \frac{\mu_0 \cdot t_p}{g \cdot \Pi^2 \cdot p} \right] \quad (\text{AII.8})$$

Operando-se a equação (AII.8), resulta:

$$C_1 = C_3 \left[ 2 \cdot \sin(\Pi \cdot p/2) \left[ - \cos(w_s \cdot t) \cdot \sin(\Pi \cdot p/2) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sin(w_s \cdot t) \cdot \cos(\Pi \cdot p/2) \right] \right]$$

ou ainda:

$$C_1 = 2 C_3 \sin(\Pi \cdot p/2) \cdot \left[ \sin(w_s \cdot t - \Pi \cdot p/2) \right] \quad (\text{AII.9})$$

Levando-se a equação (AII.9) à equação (AII.3) e definindo-se Densidade de Campo Magnético em vazio, obtém-se:

$$b_o(x,t) = J_M \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p}{g \cdot \Pi} \right] \cdot (-\text{sen}(w_s \cdot t - (\Pi \cdot x/t_p))) +$$

$$+ 2 \cdot J_M \left[ \frac{\mu_o \cdot t_p}{g \cdot \Pi^2 \cdot p} \right] \cdot (\text{sen}(\Pi \cdot p/2) \cdot \text{sen}(w_s \cdot t - \Pi \cdot p/2))$$

(AII.10)

(3.5)

que expressa o comportamento da Densidade de Campo Magnético no entreferro, para conversores dotados de qualquer número de pólos, operando com  $V_{rx} \rightarrow V_{sx}$ .

### APENDICE III

#### ANALISE DO FLUXO MAGNÉTICO POLAR

##### AIII.1. ASPECTOS GERAIS

O fluxo magnético que deixa uma região polar, pode ser expresso, por:

$$\varnothing_p = \int_0^{t_p} B_M(s) \cdot C \cdot \text{sen}(\Pi \cdot x/t_p) dx \quad (\text{AIII.1})$$

sendo C o comprimento ativo do condutor:

$$\varnothing_p = B_M(s) \cdot C \cdot \int_0^{t_p} \text{sen}(\Pi \cdot x/t_p) dx \quad (\text{AIII.2})$$

Definindo-se:

$$x = R \cdot \varphi$$

$$\Pi \cdot x/t_p = \left[ \Pi \cdot R/t_p \right] \cdot \varphi$$

$$dx = R \cdot d\varphi$$

$$\varnothing_p = B_M(s) \cdot C \int_0^{R \cdot \varphi} \text{sen}((\Pi \cdot R/t_p) \cdot \varphi) \cdot R \cdot d\varphi \quad (\text{AIII.3})$$

Definindo-se:

$$(\Pi \cdot R / t_p) \cdot \varphi = \beta$$

Resulta:

$$(\Pi / t_p) \cdot (R \, d\varphi) = d\beta$$

e:

$$\theta_p = E_M(s) \cdot C \cdot \int_0^{\bar{\beta}} \text{sen } \beta \cdot (t_p / \Pi) \, d\beta$$

(AIII.4)

$$\theta_p = E_M(s) \cdot C \cdot \left[ t_p / \Pi \right] \left[ 1 - \cos (\Pi) \right]$$

de onde:

$$\theta_p = \left[ 2 / \Pi \right] \cdot \left[ E_M(s) \right] \cdot (C \cdot t_p)$$

(AIII.5)

Sendo:

$$E_{\Delta v} = \frac{2}{\Pi} \cdot E_M(s)$$

(AIII.6)

Resulta:

$$\theta_p = E_{\Delta v} \cdot (C \cdot t_p)$$

(AIII.7)

O ângulo  $\bar{\beta} = \Pi$ , expresso em (AIII.4), é obtido a partir de:

$$t_p = \left[ \pi \cdot D / p \right]$$

$$\bar{x} = t_p = R \cdot \bar{\varphi}$$

$$\bar{\beta} = \left[ \pi \cdot R / t_p \right] \cdot \bar{\varphi} = \left[ (\pi \cdot R / t_p) \cdot (t_p / R) \right] = (\pi)$$

Portanto:

$$\bar{x} = t_p$$

$$\bar{\beta} = \pi$$

(AIII.8)

A equação (AIII-7) é de imenso alcance para o estudo dos CALs. no que tange ao comportamento de uma região polar. Sendo o produto  $(C \cdot t_p)$  a área polar, o produto desta pela Densidade Média de Campo, conduz ao fluxo polar, o que está em perfeita consonância com a teoria dos conversores rotativos (síncronos, assíncronos e de corrente contínua).

## APENDICE IV

### A FORÇA PROPULSORA TEORICA A PARTIR DA ANALISE UNIDIMENSIONAL

#### AIV.1. ASPECTOS GERAIS

Associando à equação (6.18) obtida no Capítulo 6, item 6.1, com as equações (2.13), (3.37) e (3.41), encontra-se:

$$G_L = \frac{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot w_s}{\rho'_R \cdot \Pi^2 \cdot g} \quad (2.13)$$

e:

$$\text{tg } \delta_s = \frac{\rho'_R \cdot \Pi \cdot g}{\mu_0 \cdot t_p \cdot s \cdot V_{sx}} \quad (3.37)$$

Se:

$$V_{sx} = 2 \cdot t_p \cdot f \quad (2.3)$$

escreve-se:

$$\text{tg } \delta_s = \frac{\rho'_R \cdot \Pi^2 \cdot g}{\mu_0 \cdot t_p^2 \cdot s \cdot w_s}$$

ou melhor:

$$\operatorname{tg} \delta s = \left[ 1 / (s \cdot GL) \right] \quad (\text{AIV.1})$$

Por outro lado:

$$\cos^2 \delta s = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta s}$$

de onde:

$$\cos \delta s = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot GL)^2} \right]^{1/2}} \quad (\text{AIV.2})$$

Segundo a equação (3.41), a Densidade de Campo da Onda de Translação Síncrona, tem valor máximo, dado por:

$$E_M(s) = \frac{J_M}{\left[ \left( \frac{g \cdot \Pi}{\mu_0 \cdot t_p} \right)^2 + \left( \frac{s \cdot V_{sx}}{\rho'_R} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

$$E_M(s) = \frac{J_M}{\left[ \frac{g^2 \cdot \Pi^2}{\mu_0^2 \cdot t_p^2} + \frac{s^2 \cdot V_{sx}^2}{\rho'^2_R} \right]^{1/2}}$$

de onde:

$$E_M(s) = \frac{J_M}{\frac{s \cdot V_{sx}}{\rho'_R} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot GL)^2} \right]^{1/2}}$$

ou ainda:

$$B_M(s) = \frac{\rho_R' \cdot J_M}{s \cdot V_{sx} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot GL)^2} \right]^{1/2}} \quad (\text{AIV.3})$$

que permite observar a relação existente entre a Densidade de Campo Magnético e o escorregamento, para operação a corrente constante.

Sendo:

$$f_{xr} = \frac{1}{2} B_M(s) J_M (C \cdot t_p) p \cdot \cos \delta s \quad (6.18)$$

Transportando-se para a equação (6.18), as relações anteriores, escreve-se:

$$f_{xr} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\rho_R' \cdot J_M^2 (C \cdot t_p) \cdot p}{s \cdot V_{sx} \left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot GL)^2} \right]} \right] \quad (\text{AIV.4})$$

que expressa o comportamento da força propulsora, desconsiderando-se os Efeitos Transversal de Borda e Longitudinal de Extremidade.

No Capítulo 3, demonstrou-se, que na ausência dos Efeitos de Extremidades, a força propulsora que atua na lâmina móvel, para passo polar, vale:

$$\bar{f}_x = \frac{1}{\rho_R} \cdot B_M^2(s) \cdot C \cdot s \cdot f \cdot t_p^2 \quad (3.97)$$

Por outro lado, a densidade de campo, no seu valor máximo, é expresso, por (AIV.3). Levando-se esta constatação à

equação (3.97), resulta:

$$f_{xr} = \bar{f}_x \cdot p$$

onde  $p$  é o número de pólos do conversor.

Sabendo-se, que:

$$V_{sx} = 2 \cdot t_p \cdot f$$

resulta:

$$f_{xr} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\rho'_R \cdot J_M^2 \cdot C \cdot p}{(2 \cdot s \cdot f) \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(s \cdot Gl)^2} \right]} \right]$$

que é a equação (AIV.4). Portanto, desconsiderando-se os Efeitos de Extremidades, as equações (3.97) e (6.22) podem mostrar o comportamento da força propulsora de CALs e de CARs.

Com a adoção de um Fator Corretor (de Russell ou de Bolton), pode-se compensar, na equação (6.22), o Efeito Transversal de Borda.