

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Reinaldo Shindo

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

George Alves Soares, D.Sc.

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2003

SHINDO, REINALDO

Cálculo de Parâmetros de Motor de Indução
Trifásico Utilizando o Método dos Elementos
Finitos [Rio de Janeiro] 2003

XXI, 165 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2003)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Motor de Indução Trifásico

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Na colação de grau em engenharia, jura-se desenvolver tecnologia respeitando a natureza em prol da humanidade e, assim, guio minha vida pessoal e profissional.

Mas, ao longo destes 4 anos do curso de mestrado em engenharia elétrica, fui obrigado a assistir o emprego da tecnologia contra a humanidade e a favor das guerras pelo mundo.

Devemos fazer nossa parte e mostrar nossos anseios pela Paz e pela Vida de todos com justiça e dignidade.

Dedico este trabalho à minha mãe,
Sueli, e à minha namorada Simone.

AGRADECIMENTOS

Ao CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, pela permissão de realizar este trabalho, disponibilizar o meu tempo e os recursos de edição.

Ao PROCEL - PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, por sustentar este princípio e financiar o projeto vinculado a esta tese de mestrado.

A KOHLBACH MOTORES LTDA, por incentivar a implementação do projeto otimizado de motores e pela construção dos protótipos. Esta tese de mestrado está vinculada ao referido projeto.

Ao meu amigo, pesquisador George Alves Soares, por me incentivar e propiciar a oportunidade de cursar o mestrado na COPPE/URFJ. Além disso, pela sólida orientação em alguns momentos críticos deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Antônio Carlos Ferreira, pela sólida orientação durante as disciplinas pré - requisitos e, principalmente, em todas as etapas deste trabalho.

À aluna orientada pelo Prof. Antônio Carlos Ferreira, Gisella Margarita Vizhñay Zambrano, pela indispensável ajuda e orientação no uso do pacote computacional "ANSYS".

Ao Prof. Alquindar de Souza Pedroso, pela sólida orientação durante as disciplinas pré - requisitos e no momento crítico da tese nos dias da curta semana após o carnaval.

Ao engenheiro Ricardo Marques Dutra, pelo incentivo contínuo e revisão inicial do texto deste trabalho.

Ao Macláudio Marcelino de Barros, pela colaboração na edição deste trabalho.

Aos meus colegas do CEPEL e aos meus amigos, pela compreensão e incentivo nos momentos mais críticos da elaboração deste trabalho.

À minha mãe, Sueli, pelo incondicional incentivo em todas as etapas do curso de mestrado que se encerra nesta tese.

À minha namorada, Simone, pelo incentivo e compreensão pelas horas de dedicação a este trabalho, principalmente, durante os finais de semana e feriados.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Reinaldo Shindo

Março/2003

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho estabelece uma metodologia para calcular os parâmetros do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico com rotor de gaiola, em regime permanente, utilizando o método dos elementos finitos. Os resultados obtidos são confrontados com metodologias clássicas de determinação dos parâmetros do motor de indução através de cálculos analíticos e ensaios.

O circuito equivalente permite cálculos aproximados de queda de tensão, correntes, perdas, conjugado e é amplamente utilizado por projetistas para avaliar o desempenho do motor. Esta técnica dos elementos finitos supre a carência de precisão dos modelos em razão dos cálculos feitos na forma de distribuição dos campos magnéticos estabelecidos no interior da máquina.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CALCULATION OF POLYPHASE INDUCTION MOTOR PARAMETERS USING
FINITE ELEMENT METHOD

Reinaldo Shindo

March/2003

Advisor: Antônio Carlos Ferreira

Department: Electric Engineering

This work establishes a methodology to determine the steady state polyphase squirrel cage induction motor's equivalent circuit parameters, using the finite element method. The results are compared with classical methodologies to determine the induction motor's parameter by analytical calculations and tests.

The equivalent circuit model allows approximated calculations of voltage dips, currents, losses, torque and is mostly used by designers to evaluate the motor's performance. Finite element analysis is characterized by good accuracy due to calculations carried out as distributions of the magnetic field established inside the machine.

ÍNDICE

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO 1

- I.1 Motivação e Importância do Trabalho 4
- I.2 Objetivos do Trabalho 4
- I.3 Estrutura do Trabalho 4

CAPÍTULO II

MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO 7

- II.1 Introdução 7
- II.2 Circuito Equivalente Monofásico do Motor de Indução Trifásico em regime Permanente 10
- II.3 Descrição dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor 12
 - II.3.1 Resistência do Estator (R_1) 12
 - II.3.2 Resistência do Rotor Refletida ao Estator (R'_2) 12
 - II.3.3 Reatância de Dispersão do Estator (X_1) 12
 - II.3.4 Reatância de Dispersão do Rotor Refletida ao Estator (X'_2) 13
 - II.3.5 Reatância de Magnetização (X_m) 13
 - II.3.6 Resistência do Núcleo (R_{fe}) 13
- II.4 Cálculo do Desempenho do Motor 14
- II.5 Metodologia de Cálculos Analíticos para Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor 20
- II.6 Metodologia de Ensaio para Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor 21
- II.7 Conclusões 22

CAPÍTULO III

**ELEMENTOS FINITOS APLICADOS AO MOTOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO** **23**

III.1	Introdução	23
III.2	Revisão Bibliográfica	25
	III.2.1 Modelos de Malha Fixa	26
	III.2.2 Modelos de Malha Móvel	29
	III.2.3 Comentários Adicionais	30
III.3	Metodologia Proposta	33
	III.3.1 Ensaio com Rotor Removido	33
	III.3.2 Ensaio em Vazio	34
	III.3.3 Ensaio com Rotor Bloqueado	35
III.4	Conclusões	38

CAPÍTULO IV
ESCOLHA DO MOTOR E DO PROGRAMA
COMPUTACIONAL UTILIZADOS **39**

IV.1	Introdução	39
IV.2	Descrição das Características do Motor Utilizado	40
IV.3	Descrição das Características do Programa Computacional Utilizado	41
	IV.3.1 Pré – Processador	42
	IV.3.2 Processador	44
	IV.3.3 Pós – Processador	45
IV.4	Conclusões	45

CAPÍTULO V
ANÁLISE DOS RESULTADOS **47**

V.1	Introdução	47
V.2	Ensaio Rotor Removido	47
V.3	Ensaio em Vazio	50
	V.3.1 Perdas Magnéticas em Vazio	53
V.4	Ensaio Rotor Bloqueado	54
V.5	Resultados Finais	59
V.6	Conclusões	62
 CAPÍTULO VI		
CONCLUSÕES		63
VI.1	Conclusões	63
VI.2	Sugestões	64
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		66
 ANEXO 1		
PROPRIEDADES DA GEOMETRIA E DOS MATERIAIS DO MOTOR		71
 ANEXO 2		
VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DE X_1 COM O ROTOR REMOVIDO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS		79
 ANEXO 3		
METODOLOGIA DE CÁLCULO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR		101

ANEXO 4

METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR	117
---	------------

ANEXO 5

LISTAGEM DE ROTINAS IMPLEMENTADAS NO PROGRAMA ANSYS	123
--	------------

LISTA DE SÍMBOLOS

∇	Gradiente;
$\nabla \cdot$	Divergente;
$\nabla \times$	Rotacional;
α	Ângulo entre barras do rotor
α_i	Fator de enchimento do fluxo magnético;
α_1	Fator de Leiman para a coroa do estator;
α_2	Fator de Leiman para a coroa do rotor;
ε	Fator de enrolamento;
ϕ	Fluxo magnético em um passo polar;
γ_{al}	Densidade volumétrica do alumínio;
γ_{cu}	Densidade volumétrica o cobre;
γ_{fe}	Densidade volumétrica da chapa;
η	Rendimento do motor;
Φ_f	Fluxo por polo;
ϕ_{fe1}	Fator de empilhamento da chapa magnética do núcleo do estator;
ϕ_{fe2}	Fator de empilhamento da chapa magnética do núcleo do rotor;
λ	passo
λ_1	Permeância da ranhura do estator;

λ_2	Permeância da ranhura do rotor;
μ	Permeabilidade magnética de um meio qualquer;
μ_0	Permeabilidade do ar;
μ_r	Permeabilidade magnética relativa;
ν	Permissividade de um meio qualquer;
θ_{Sk}	Ângulo de inclinação das barras do rotor;
π	Constante igual a 3,14159265;
ρ	Densidade de carga elétrica;
ρ_2	Resistividade do alumínio da gaiola;
ρ_{cu}	Resistividade do cobre;
σ	Fator de forma da curva de densidade de fluxo magnético ao longo do entreferro;
σ	Condutividade elétrica de um meio qualquer;
τ	Passo polar;
τ_1	Coefficiente de dispersão do fluxo;
τ_{ind}	Conjugado induzido;
τ_{carga}	Conjugado da carga;
τ_{max}	Conjugado máximo;
$\tau_{partida}$	Conjugado de partida;
ω	Velocidade angular de rotação
ω_m	Velocidade angular mecânica;

ω_s	Velocidade angular síncrona;
\vec{A}	Potencial vetor magnético;
A_1	Área do condutor;
A_2	Área do anel do rotor;
Ab_2	Área da barra do rotor;
a	Fator de escala
a_{12}	Largura da ranhura do estator no meio do dente do estator;
a_{22}	Largura da ranhura do rotor no meio do dente do rotor;
an_1	Abertura da ranhura do estator;
an_2	Abertura da ranhura do rotor;
\vec{B}	Vetor densidade de fluxo magnético;
B_g	Valor máximo da densidade de fluxo magnético ao longo do entreferro;
B_{j1}	Densidade de fluxo magnético na coroa do estator;
B_{j2}	Densidade de fluxo magnético na coroa do rotor;
B_x	Densidade de fluxo para um ponto x ao longo do entreferro;
B_{z1}	Densidade de fluxo magnético no meio do dente do estator;
B_{z2}	Densidade de fluxo magnético no meio do dente do rotor;
CA	Corrente alternada;
CC	Corrente contínua;
CBMA	Comprimento da cabeça da bobina;

C_e	Carregamento elétrico;
$\cos\varphi$	Fator de potência;
\vec{D}	Vetor densidade de fluxo elétrico;
D	Diâmetro interno do estator;
D_m	Diâmetro médio do anel da gaiola do rotor;
D_f	Diâmetro do condutor do enrolamento;
\vec{E}	Vetor intensidade de campo elétrico;
E_1	Força eletromotriz induzida;
F_b	Fator de perdas do aço, obtido da curva do fabricante do aço;
F_{CA}	Fator que leva em consideração o efeito da corrente alternada na resistência do estator;
F_{cp}	Relação entre a corrente de rotor bloqueado e nominal permitida pela normalização;
F_e	Ferro;
F_{ens}	Fator empírico de perdas, obtido nos ensaios em vazio;
f	Frequência da rede elétrica de alimentação do motor;
f_1	Frequência no estator;
f_r	Frequência no rotor;
f_{kc1}	Fator de Carter do estator;
f_{kc2}	Fator de Carter do rotor;
f_{kl}	Fator de correção do efeito da frequência da rede de elétrica na reatância de dispersão da ranhura do rotor, usado no cálculo da

	corrente e do torque em rotor bloqueado;
f_{kr}	Fator de correção do efeito da frequência da rede de elétrica na resistência das barras do rotor, usado no cálculo da corrente e do torque em rotor bloqueado;
f_{ksk}	Fator de inclinação das barras do rotor;
f_{pa}	Fator empírico de diminuição das reatâncias de dispersão para a condição de rotor bloqueado;
\vec{H}	Vetor intensidade de campo magnético;
H_{j1}	Intensidade de campo magnético na coroa do estator;
H_{j2}	Intensidade de campo magnético na coroa do rotor;
H_{z1}	Intensidade de campo magnético no meio do dente do estator;
H_{z2}	Intensidade de campo magnético no meio do dente do rotor;
h_1	Altura da ranhura do estator;
h_2	Altura da ranhura do rotor;
h_a	Altura média do anel da gaiola do rotor;
h_{j1}	Altura da coroa do estator;
h_{j2}	Altura da coroa do rotor;
I	Módulo da corrente em um meio qualquer;
\dot{i}_a	Corrente da fase A do estator;
\dot{i}_b	Corrente da fase B do estator;
\dot{i}_c	Corrente da fase C do estator;

\dot{I}_1	Corrente de fase do estator;
\dot{I}_m	Corrente de magnetização por fase;
I_m	Módulo da corrente de magnetização por fase;
\dot{I}_2'	Corrente de fase do rotor refletida ao estator;
I_n	Corrente nominal;
$I^2 R_{\text{estator}}$	Perdas ôhmicas do estator;
$I^2 R_{\text{rotor}}$	Perdas ôhmicas do rotor;
\vec{J}	Vetor densidade de corrente total;
\vec{J}_e	Vetor densidade de corrente induzida;
\vec{J}_s	Vetor densidade de corrente aplicada por fonte externa;
J_s	Módulo da densidade de corrente aplicada por fonte externa;
j	Parte imaginária;
K_c	Fator de Carter;
K_s	Fator de saturação;
k_{sk}	Fator devido à inclinação das barras do rotor;
L	Comprimento do pacote magnético;
L_a	Indutância própria da fase A do estator;
L_{ab}	Indutância mútua entre as fases A e B do estator;
L_{ac}	Indutância mútua entre as fases A e C do estator;
L_1	Indutância total por fase do estator;
l_a	Largura média do anel da gaiola do rotor;

l_g	comprimento do entreferro;
l_{gc}	comprimento do entreferro corrigido;
l_{j1}	Comprimento médio da coroa do estator por polo;
l_{j2}	Comprimento médio da coroa do rotor por polo;
m	Inteiro positivo;
NCP	Número de caminhos paralelos;
N_f	Número de espiras em série por fase;
n	Inteiro positivo;
n_s	Velocidade síncrona;
P	Número de pares de pólos;
P_1	Potência ativa monofásica;
P_{ag}	Potência transferida ao rotor através do entreferro;
P_{ent}	Potência elétrica de entrada;
P_{sai}	Potência mecânica de saída;
P_{conv}	Potência convertida para a forma mecânica;
P_{fe}	Perdas magnéticas no núcleo;
$P_{atr+vent}$	Perdas por atrito e ventilação;
P_{supl}	Perda suplementar;
P_n	Potência de saída nominal do motor;
P_{tot}	Potência ativa total medida nos ensaios;
Q_1	Potência reativa monofásica;
Q_1	Potência reativa calculada através dos ensaios;

R_1	Resistência do estator por fase;
R_2'	Resistência do rotor refletida ao estator por fase;
R_{fe}	Resistência correspondente às perdas do núcleo por fase;
R_{TH}	Resistência equivalente de Thevenin
rpm	Velocidade do motor medida nos ensaios;
rt	Relação de transformação entre primário e secundário do motor;
S	Seção do condutor;
s	escorregamento;
s_{max}	Escorregamento para a condição de conjugado máximo;
t	Inclinação da barra em número de passo da ranhura do rotor;
V	Tensão elétrica aplicada a um meio qualquer;
\dot{V}_a	Tensão monofásica aplicada ao enrolamento da fase A do estator;
\dot{V}_1	Tensão monofásica aplicada ao enrolamento do motor;
V_f	Tensão monofásica;
V_{j1}	Força magnetomotriz média na coroa do estator;
V_{j2}	Força magnetomotriz média na coroa do rotor;
V_{linha}	Tensão medida entre fases;
V_m	Força magnetomotriz no entreferro;
V_{me}	Tensão medida média;
V_{TH}	Tensão equivalente de Thevenin
V_{z1}	Força magnetomotriz média no dente do estator;

V_{z2}	Força magnetomotriz média no dente do rotor;
X_1	Reatância de dispersão do estator por fase;
X_2'	Reatância de dispersão do rotor refletida ao estator por fase;
X_{dr1}	Reatância de dispersão da ranhura do estator;
X_{dr2}'	Reatância de dispersão da ranhura do rotor refletida ao estator;
X_e	Reatância de dispersão da cabeça da bobina do enrolamento do estator;
X_{ks1}	Reatância de dispersão do estator devido à inclinação das barras do rotor;
X_{ks2}	Reatância de dispersão do rotor devido à inclinação das suas barras;
X_m	Reatância de magnetização por fase;
X_{TH}	Reatância equivalente de Thevenin
X_{zig1}	Reatância de dispersão Zig-Zag do estator;
X_{zig2}	Reatância de dispersão Zig-Zag do rotor;
Z_1	Número de ranhuras do estator;
Z_2	Número de ranhuras do rotor;
Z_{eq}	Impedância equivalente.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O motor elétrico é o último elemento de uma cadeia de equipamentos elétricos que se inicia na geração de energia elétrica, passa pela transmissão e distribuição até chegar a sua utilização final no consumidor. Dentro desta ótica, é comum se pensar no motor elétrico como um grande consumidor de energia elétrica, entretanto, aprofundando-se no fluxo de energia, percebe-se que este equipamento é um transdutor de energia, recebendo energia elétrica e transformando-a em energia mecânica para acionar um outro equipamento, desta vez mecânico, que interage com o processo onde realmente ocorre o uso final da energia. Logo, percebe-se que a energia demandada pelo motor é o resultado final de um somatório de vários componentes no qual o motor contribui somente com as suas perdas. O motor de indução trifásico é o tipo dominante no mercado de motor elétrico, e participa com mais de 97% das unidades vendidas anualmente. Segundo dados do PROCEL - PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, a energia elétrica total consumida no país no ano de 2001 foi de 283.798 GWh. O perfil de distribuição desta energia consumida é mostrado na figura I.1-1 a seguir:

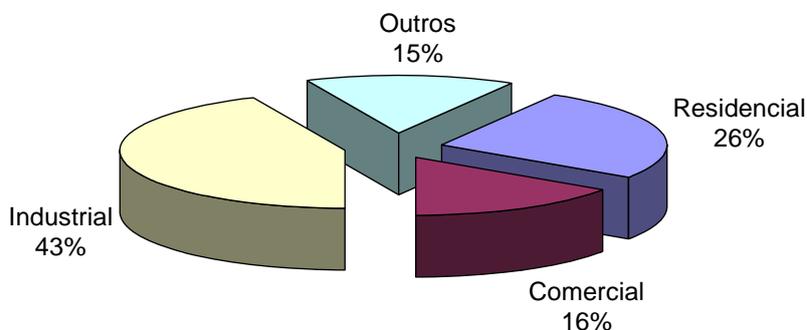
Consumo de Energia Elétrica por Setor - Ano 2001

Figura I.1-1: Perfil do consumo de energia elétrica por setor no Brasil – Ano 2001

[www.eletrobras.gov.br/procel].

Aos motores de indução trifásicos cabe uma parcela importante do total da energia elétrica consumida no Brasil, cerca de 25% deste total, sendo uma carga representativa tanto no setor industrial com 49% referente à força motriz, segundo dados do PROCEL, como no setor comercial. Portanto, ações de conservação de energia nestes equipamentos revelam-se de grande importância.

O governo brasileiro, através do PROCEL, realizou uma avaliação dos motores de indução trifásicos nacionais de 1988 a 1990 [1] e sugeriu que os projetos destes motores fossem aperfeiçoados. O CEPTEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica patrocinado pelo PROCEL/ELETROBRÁS abriu uma linha de pesquisa de tecnologia para motores eficientes e desenvolveu uma série de projetos nesta área. Tais projetos ajudaram a estabelecer um novo patamar em termos de rendimentos dos motores elétricos.

Outra forma de ação adotada pelo governo brasileiro consiste do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) de Motores Elétricos, coordenado pelo Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial e em parceria com o PROCEL e o CEPEL, no qual tem promovido ações para efficientização dos motores de indução junto aos fabricantes. No PBE, os motores são certificados quanto ao rendimento e o fator de potência declarados de acordo com a NBR 7094 [2], culminando com a premiação anual do Selo PROCEL/INMETRO de Desempenho para os motores que atinjam aos valores mínimos de rendimento acordados.

É importante mencionar que até o ano de 2002 os ganhos obtidos nos rendimentos dos motores com o PBE, desde a sua implementação em 1994, são frutos de participações voluntárias por parte dos fabricantes de motores nacionais.

Recentemente, em 17 de outubro de 2001, foi sancionada a lei número 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e prevê o estabelecimento de índices mínimos de eficiência energética ou níveis máximos de consumo específico de energia para máquinas e aparelhos consumidores de energia, fabricados e comercializados no país.

O motor elétrico de indução trifásico foi selecionado como o primeiro aparelho consumidor de energia a ser regulamentado e, esta regulamentação, foi baseada na experiência acumulada com o PBE. O ponto de partida dos níveis de rendimentos mínimos estabelecidos foi o dos níveis praticados em 2002 pelo PBE, consolidando os ganhos obtidos de forma voluntária. A regulamentação dos motores elétricos de indução trifásicos rotor gaiola de esquilo foi assinada, como Decreto 4.058, pelo governo federal em 11 de dezembro de 2002.

I.1 Motivação e Importância do Trabalho.

Em 1998, o trabalho intitulado “Nova Técnica de Projetos de Motores de Indução e sua Consolidação Prática” [3] indicou como caminho para revisão da modelagem clássica do motor, o uso do método de elementos finitos aplicado ao motor de indução trifásico para determinação dos parâmetros do circuito equivalente monofásico, evitando assim o emprego de diversos fatores práticos e formulação empírica para a obtenção dos mesmos.

A importância deste trabalho se fundamenta pela discussão de uma ferramenta útil aos projetistas de motores em substituição às metodologias clássicas para calcular o desempenho do motor em regime permanente de forma rápida e precisa, conseqüentemente, para a elevação do rendimento destes equipamentos.

I.2 Objetivos do Trabalho.

O objetivo deste trabalho é determinar os parâmetros do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico com rotor de gaiola utilizando o método dos elementos finitos, possibilitando calcular o desempenho do motor com maior precisão. E ainda, avaliar esta metodologia, comparando-a com a metodologia clássica e com os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais.

I.3 Estrutura do Trabalho.

O sumário de cada capítulo é apresentado a seguir, permitindo uma visualização geral do trabalho.

No capítulo I é apresentado, o enfoque das pesquisas deste trabalho, bem como a motivação, a importância e o objetivo principal do mesmo.

No capítulo II é detalhada a modelagem do motor de indução trifásico através do seu circuito equivalente monofásico e é apresentada a metodologia de cálculo do

desempenho do motor em regime permanente a partir do referido circuito equivalente. E ainda, são discutidos o emprego da metodologia clássica e o uso de ensaios normalizados.

No capítulo III é realizada uma revisão bibliográfica sobre a aplicação do método de elementos finitos aos motores de indução e é apresentada a metodologia proposta nesta dissertação, a qual consiste na aplicação do método de elementos finitos ao motor de indução trifásico para obter os parâmetros do seu circuito equivalente, permitindo o cálculo do desempenho do motor para regime permanente.

No capítulo IV é apresentado o motor de indução trifásico utilizado na implementação deste trabalho. Além disso, comenta-se sobre o pacote computacional utilizado, descrevendo-se suas principais características.

No capítulo V é apresentada uma análise dos resultados obtidos através de utilização da técnica de elementos finitos, comparando-os com os resultados obtidos a partir da metodologia clássica e, principalmente, comparando-os com os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais realizados no CEPEL. E ainda neste capítulo, comenta-se sobre a utilização do pacote computacional.

As conclusões bem como as sugestões são apresentadas no capítulo VI.

O trabalho é complementado pela lista de referências bibliográficas e pelos anexos. O anexo 1 apresenta as características técnicas da geometria e do material magnético tanto do estator quanto do rotor do motor utilizado. O anexo 2 mostra o estudo para determinação da reatância de dispersão do estator através da técnica de elementos finitos aplicado ao motor com o rotor removido e sua validação é feita comparando-a com uma metodologia de cálculo analítico. O anexo 3 apresenta a formulação clássica da metodologia analítica para determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor e os seus resultados, incluindo o cálculo do desempenho

energético do motor obtido através destes parâmetros. O anexo 4 apresenta os ensaios laboratoriais realizados no motor para determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor e os seus resultados, incluindo o cálculo do desempenho energético do motor obtido através destes parâmetros. O anexo 5 apresenta a listagem das rotinas implementadas no programa ANSYS, contendo as descrições macros de cada etapa.

Finalmente, espera-se que este trabalho desenvolvido seja uma contribuição, principalmente, para os projetistas de motores, para calcular os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução de forma rápida e precisa para avaliação do desempenho do motor em regime permanente.

CAPÍTULO II

MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Este capítulo aborda a utilização do circuito equivalente monofásico para representar um motor de indução trifásico, possibilitando, a partir deste circuito, calcular o desempenho do motor. Inicialmente, comenta-se sobre o uso de formulação empírica e de fatores de correção no projeto do motor, explicitando a necessidade de se avaliá-lo antes da construção propriamente dita. Assim, aponta-se para o circuito equivalente do motor para realização desta avaliação. Além disso, comenta-se sobre as metodologias clássicas para determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor através de cálculos analíticos e ensaios realizados no motor.

II.1 Introdução.

No projeto do motor são utilizadas formulações empíricas e, ainda, diversos fatores ajustados de acordo com a experiência dos projetistas devido à difícil representação analítica dos variados fenômenos que ocorrem no motor, como a distribuição não – uniforme do campo magnético, os diversos caminhos dos fluxos de dispersão, entre outros. O projeto tradicional de motores de indução trifásicos, referente às partes elétrica e magnética, baseia-se nos seguintes conceitos básicos para avaliação e orientação dos projetos:

- Carregamento Elétrico Específico, definido como a corrente total na ranhura do estator dividido pelo passo da ranhura;
- Carregamento Magnético Específico, definido como a densidade média do fluxo magnético no entreferro por pólo;
- Coeficiente de Saída, no qual relaciona características de desempenho (potência mecânica, velocidade síncrona, rendimento e fator de potência) às principais dimensões da máquina (diâmetro interno do estator "D" e comprimento do pacote magnético "L").

Basicamente, as etapas principais de um projeto clássico [4,5] de motores de indução trifásicos de pequenas potências e baixa tensão, por ser a faixa mais representativa em termos de consumo de energia elétrica [1], podem ser agrupadas conforme o fluxograma na figura II.1-1.

Devido à utilização destas formulações empíricas e de diversos fatores de correção mencionados, os projetistas de motores necessitam de algum meio para certificar seus projetos. Por esta razão, os projetistas utilizam o circuito equivalente monofásico do motor para avaliar o desempenho do motor projetado de uma maneira rápida e simples. Através desta avaliação preliminar é possível propor modificações, ainda na fase do projeto, visando atender determinadas especificações técnicas, como dimensões, volume e características de desempenho, pelo fato do motor ser extremamente normalizado [2,6].

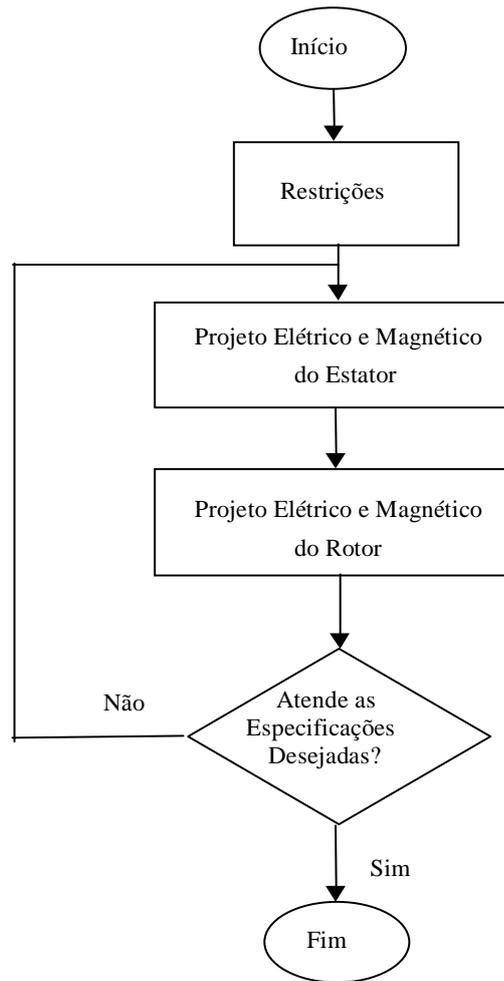


Figura II.1-1: Fluxograma básico do projeto de motores de indução trifásicos.

Portanto, o propósito e o grande valor do circuito equivalente monofásico do motor de indução é representar um dispositivo eletromagnético com um arranjo complicado de circuitos elétricos e magnéticos interligados por um circuito elétrico de simples entendimento.

A operação de um motor de indução trifásico é baseada na indução de tensões e correntes no circuito do rotor através de uma alimentação no circuito do estator, ou seja, através de uma ação semelhante ao transformador. Portanto, o circuito equivalente de um motor de indução trifásico será muito similar ao circuito equivalente monofásico de um transformador. A diferença essencial entre o circuito equivalente monofásico de um

transformador e do motor em questão, refere-se à representação do circuito do rotor devido à variação da frequência do rotor em função da velocidade de rotação do motor.

II.2 Circuito Equivalente Monofásico do Motor de Indução Trifásico em Regime Permanente.

Em regime estacionado o motor de indução é meramente um transformador curto – circuitado com enlace de fluxo relativamente pobre entre o enrolamento do estator e as barras do rotor devido ao entreferro. Neste caso, há potência elétrica transferida entre estator e rotor, no qual é dissipada pelas perdas nas barras do rotor e no ferro. Entretanto, o campo magnético girante no entreferro, resultante da interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor, produz conjugado e, se este for suficiente para mover a carga no eixo, então resulta em rotação. Sob esta circunstância, a potência elétrica transferida pelo estator que atravessa o entreferro é dissipada em perda joule do rotor e na potência de saída mecânica. Ou seja, no motor há conversão de energia elétrica em energia mecânica mais as perdas.

Estes vários fenômenos e interações podem ser identificados, representados e quantificados pelo simples circuito equivalente monofásico de 6 (seis) elementos, conforme apresentado na figura II.2-1:

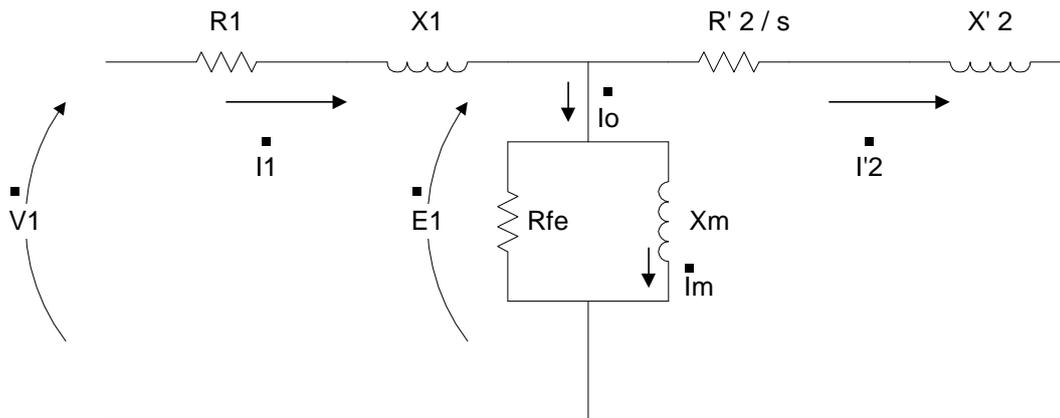


Figura II.2-1: Circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico.

Referindo-se a figura, tem-se:

R_1 - resistência do estator por fase;

X_1 - reatância de dispersão do estator por fase;

R_{fe} - resistência correspondente às perdas do núcleo por fase;

X_m - reatância de magnetização por fase;

R'_2 - resistência do rotor refletida ao estator por fase;

X'_2 - reatância de dispersão do rotor refletida ao estator por fase;

s - escorregamento;

\dot{I}_1 - corrente de fase do estator;

\dot{I}'_2 - corrente de fase do rotor refletida ao estator;

\dot{I}_m - corrente de magnetização por fase;

\dot{E}_1 - força eletromotriz induzida refletida ao estator;

\dot{V}_1 - tensão monofásica aplicada ao enrolamento do estator.

II.3 Descrição dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor.

Os parâmetros descritos nesta seção representam os fenômenos físicos mencionados na seção anterior.

II.3.1 Resistência do Estator (R_1).

Esta componente é denominada de resistência do enrolamento do estator por fase e representa as perdas joule (I^2R) do enrolamento do estator.

II.3.2 Resistência do Rotor refletida ao Estator (R'_2).

Esta componente denominada resistência do rotor refletida ao estator por fase representa a parcela das perdas joules (I^2R) das barras curto – circuitadas do rotor.

II.3.3 Reatância de Dispersão do Estator (X_1).

A componente denominada reatância de dispersão do estator por fase, representa a parcela referente aos fluxos que enlaçam totalmente ou parcialmente os enrolamentos do estator, entretanto, não contribuem para o fluxo útil do motor, ou seja, fluxo mútuo entre estator e rotor. Esta parcela de dispersão pode ser decomposta em diversos tipos, tais como:

- reatância de dispersão da ranhura do estator, cuja parcela é responsável pelo fluxo que atravessa a ranhura do estator, mas não chega ao entreferro;
- reatância de dispersão *zig – zag*, cuja parcela é referente ao fluxo do estator que faz uma trajetória *zig – zag* pelo entreferro entre os dentes do estator e do rotor, devido às componentes harmônicas no entreferro;
- reatância de dispersão devido à inclinação das barras do rotor (rotor *skew*), cuja parcela está associada ao fluxo, que embora atravesse o entreferro, não contribui para a indução de tensão nas barras do rotor;

- reatância de dispersão de cabeça de bobina, cuja parcela é referente ao fluxo disperso devido ao efeito de ponta, ou seja, fluxo produzido quando a corrente passa pelas terminações.
- outras (periférica, de cinto, etc...).

II.3.4 Reatância de Dispersão do Rotor refletida ao Estator (X'_2).

A componente denominada reatância de dispersão do rotor por fase, representa a parcela referente aos fluxos que enlaçam totalmente ou parcialmente as barras do rotor, entretanto, da mesma maneira no caso do estator, não contribuem para o fluxo útil do motor. Esta parcela de dispersão pode ser decomposta pelos mesmos tipos observados na reatância de dispersão do estator, com a ressalva de que são fluxos dispersos no rotor.

II.3.5 Reatância de Magnetização (X_m).

A componente denominada reatância de magnetização por fase, representa a parcela do fluxo útil no motor, ou seja, aquele fluxo mútuo entre o estator e o rotor, que provoca a indução de tensão nas barras do rotor.

II.3.6 Resistência do Núcleo (R_{fe}).

Este parâmetro representa as perdas magnéticas no núcleo por fase do motor devido as correntes parasitas e ao fenômeno de histerese, que são, respectivamente, perdas por correntes induzidas nas chapas do motor (implicando na laminação das chapas) e perdas devido às densidades de fluxo.

II.4 Cálculo do Desempenho do Motor.

A partir do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico é possível calcular o desempenho do motor, neste caso, em regime permanente.

A relação entre a potência elétrica de entrada e a potência mecânica de saída do motor de indução é conforme o diagrama do fluxo de potência apresentado na figura II.4-1 a seguir:

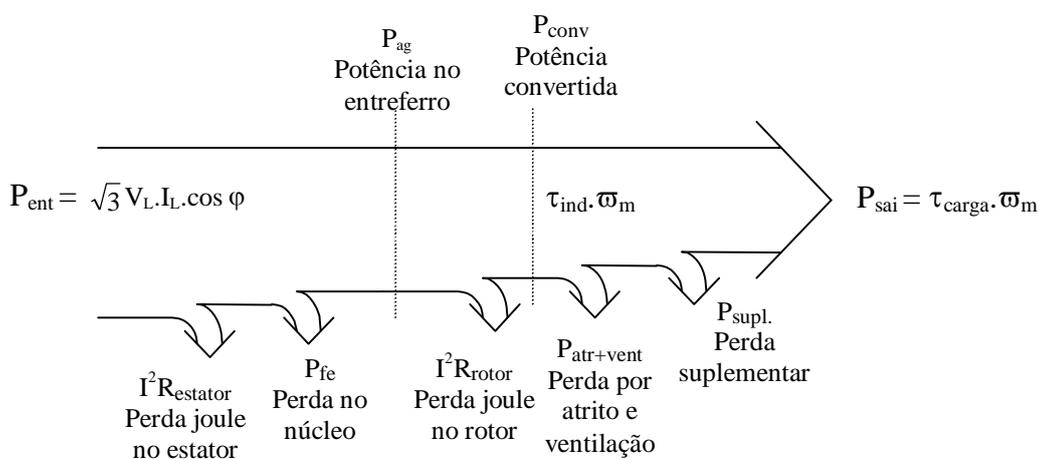


Figura II.4-1: Diagrama do fluxo de potência do motor de indução trifásico.

A potência elétrica de entrada (P_{ent}) em um motor de indução é composta de tensões e correntes trifásicas. As primeiras perdas que ocorrem no motor são as perdas joule do estator ($I^2 R_{estator}$). Uma parte da potência é perdida através das correntes parasitas e do fenômeno de histerese no núcleo do estator (P_{fe}). A potência remanescente neste ponto é transferida do circuito do estator para o circuito do rotor através do entreferro (P_{ag}). Após a potência ser transferida ao rotor, parte dela é dissipada através das perdas joule do rotor ($I^2 R_{rotor}$) e o restante é convertido para a forma mecânica (P_{conv}). Finalmente, as perdas por atrito e ventilação ($P_{atr+vent}$) e as perdas suplementares ($P_{supl.}$) são subtraídas, restando a potência líquida denominada de

potência mecânica de saída do motor (P_{sai}). Considerando o motor de indução operando na região considerada normal, próximo à velocidade síncrona, as perdas no núcleo do rotor são desprezíveis em relação às perdas no núcleo do estator devido à baixa frequência do rotor ($f_r = s.f_1$). Por esta razão, as perdas no núcleo são associadas apenas ao estator.

A solução do circuito equivalente monofásico representado na figura II.2-1 permite calcular o desempenho energético do motor [7], tal como, as seguintes grandezas de interesse:

- potência elétrica de entrada;
- parcelas referentes às perdas do motor;
- potência mecânica de saída;
- rendimento do motor;
- fator de potência;
- conjugados nominal e máximo;
- corrente nominal;
- outras.

A seguir, são descritos os principais passos para se avaliar o desempenho energético do motor.

A corrente de entrada nominal de uma fase do motor pode ser calculada dividindo a tensão de alimentação pela impedância equivalente do circuito:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{Z_{\text{eq}}} \quad (\text{II-1})$$

onde:

$$Z_{eq} = R_1 + j \cdot X_1 + \frac{1}{\frac{R_{fe} + j \cdot X_m}{j \cdot R_{fe} \cdot X_m} + \frac{1}{\left(\frac{R'_2}{s}\right) + j \cdot X'_2}} \quad (\text{II-2})$$

Assim, as perdas do estator, do núcleo e do rotor podem ser calculadas, conforme visto a seguir:

- Perdas trifásicas do estator:

$$I^2 R_{\text{estator}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (\text{II-3})$$

- Perdas trifásicas no núcleo:

$$P_{fe} = \frac{3 \cdot E_1^2}{R_{fe}} \quad (\text{II-4})$$

onde:

$$\dot{E}_1 = \dot{V}_1 - \dot{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_1) \quad (\text{II-5})$$

- Potência no entreferro:

$$P_{ag} = P_{\text{ent}} - I^2 R_{\text{estator}} - P_{fe} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R'_2}{s} \quad (\text{II-6})$$

- Perdas trifásicas do rotor:

$$I^2 R_{\text{rotor}} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R'_2 \quad (\text{II-7})$$

- Potência convertida em mecânica:

$$P_{\text{conv}} = P_{\text{ag}} - I^2 R_{\text{rotor}} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) = (1-s) \cdot P_{\text{ag}} \quad (\text{II-8})$$

Finalmente, a potência mecânica de saída é dada por:

$$P_{\text{sai}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{atr+vent}} - P_{\text{supl}} \quad (\text{II-9})$$

Neste trabalho, o modelo do motor utilizado representado pelo seu circuito equivalente monofásico, não considera as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares.

O rendimento do motor é dado pela relação entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada, conforme visto a seguir:

$$\eta = \frac{P_{\text{sai}}}{P_{\text{ent}}} \quad (\text{II-10})$$

O fator de potência é dado pelo cosseno do ângulo de defasagem entre a corrente nominal e a tensão de alimentação.

O conjugado desenvolvido em um motor é definido como o conjugado associado à potência interna convertida da forma elétrica para a forma mecânica, como visto a seguir:

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} = \frac{P_{\text{ag}}}{\omega_s} \quad (\text{II-11})$$

Considerando a velocidade síncrona constante e determinando-se a corrente do rotor refletida ao estator (I_2'), pode-se calcular a potência no entreferro (P_{ag}) e, conseqüentemente, obter o conjugado induzido, através da expressão II-11.

Existem várias maneiras de solucionar o circuito equivalente em relação à corrente I'_2 , provavelmente, a maneira mais simples é utilizar o equivalente obtido através do teorema de Thevenin, no qual qualquer circuito linear que possa ser separado por dois terminais do resto do sistema, pode ser substituído por uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente, como visto na figura II.4-2:

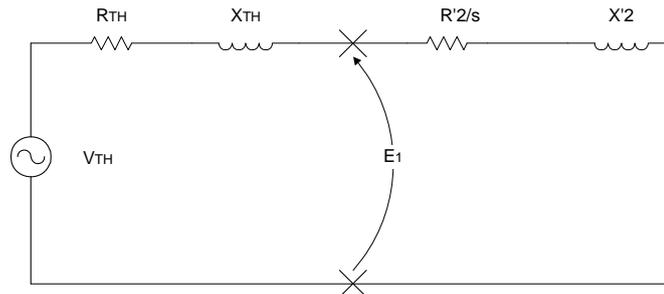


Figura II.4-2: Circuito equivalente do motor utilizando o teorema de Thevenin.

Referindo-se à equação II-11, pode-se deduzir a seguinte equação para o conjugado induzido no rotor:

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot R'_2 / s}{\omega_s \cdot [(R_{TH} + R'_2 / s)^2 + (X_{TH} + X'_2)^2]} \quad (II-12)$$

onde:

$$V_{TH} = V_1 \cdot \frac{R_{fe} \cdot X_m}{\sqrt{(R_1 \cdot R_{fe} - X_1 \cdot X_m)^2 + (R_1 \cdot X_m + R_{fe} \cdot X_1 + R_{fe} \cdot X_m)^2}} \quad (II-13)$$

$$R_{TH} = \frac{-(R_{fe} \cdot X_1 \cdot X_m) \cdot (R_1 \cdot R_{fe} - X_1 \cdot X_m) + (R_1 \cdot R_{fe} \cdot X_m) \cdot (R_1 \cdot X_m + R_{fe} \cdot X_1 + R_{fe} \cdot X_m)}{(R_1 \cdot R_{fe} - X_1 \cdot X_m)^2 + (R_1 \cdot X_m + R_{fe} \cdot X_1 + R_{fe} \cdot X_m)^2} \quad (II-14)$$

$$X_{TH} = \frac{(R_1 \cdot R_{fe} \cdot X_m) \cdot (R_1 \cdot R_{fe} - X_1 \cdot X_m) + (R_{fe} \cdot X_1 \cdot X_m) \cdot (R_1 \cdot X_m + R_{fe} \cdot X_1 + R_{fe} \cdot X_m)}{(R_1 \cdot R_{fe} - X_1 \cdot X_m)^2 + (R_1 \cdot X_m + R_{fe} \cdot X_1 + R_{fe} \cdot X_m)^2} \quad (II-15)$$

No caso de utilizar uma simplificação no circuito equivalente, onde se desconsidera a componente da resistência referente às perdas no núcleo (R_{fe}), o equivalente de Thevenin, neste caso, resume-se as seguintes equações:

$$V_{TH} = V_1 \cdot \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \quad (II-16)$$

$$R_{TH} = \frac{R_1 \cdot X_m^2}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} \quad (II-17)$$

$$X_{TH} = \frac{X_m \cdot [R_1^2 + X_1 \cdot (X_1 + X_m)]}{R_1 + (X_1 + X_m)^2} \quad (II-18)$$

Lembrando que na condição de partida o escorregamento é unitário ($s=1$), logo é possível determinar o conjugado de partida através da equação abaixo:

$$\tau_{partida} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot R'_2}{\omega_s \cdot [(R_{TH} + R'_2)^2 + (X_{TH} + X'_2)^2]} \quad (II-19)$$

Utilizando-se o teorema da máxima transferência de potência, no qual a máxima potência é transferida à carga, neste caso sobre a resistência R'_2 / s , quando o valor da carga for igual à magnitude da impedância da fonte, ou seja, conforme a equação a seguir:

$$\frac{R'_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X'_2)^2} \quad (\text{II-20})$$

Desta forma, aplica-se a equação obtida para o escorregamento no qual ocorre a máxima transferência de potência e, conseqüentemente, determina-se o conjugado máximo, através da seguinte equação:

$$\tau_{\max} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2}{2 \cdot \omega_s \cdot \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X'_2)^2} \right]} \quad (\text{II-21})$$

II.5 Metodologia de Cálculos Analíticos para Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor.

Diversas metodologias analíticas foram desenvolvidas, motivadas pela necessidade de se obter o modelo do motor para avaliação do seu desempenho.

Em [3], foi estabelecida e, principalmente, validada através de ensaios experimentais, a formulação clássica de cálculo dos parâmetros do circuito equivalente baseada na escola americana representada por [8,9,10,11]. A principal diferença que resultou nesta escolha refere-se à formulação de cálculo das reatâncias de dispersão do estator e do rotor, que retrata de maneira mais próxima à realidade dos fenômenos físicos e, portanto, apresentam resultados mais precisos conforme verificação através dos ensaios.

Como o enfoque principal deste trabalho é obter os parâmetros do motor através do uso de elementos finitos, a referida formulação sintetizada, bem como, os resultados dos parâmetros do circuito equivalente e do desempenho do motor, calculado a partir destes parâmetros, são apresentados no anexo 3.

II.6 Metodologia de Ensaio para Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor.

Além das metodologias analíticas, alguns ensaios foram propostos para a obtenção dos parâmetros do motor.

A norma brasileira que trata de ensaios no motor de indução [6], baseada na norma americana IEEE-112:1991 (*IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators*), indica apenas os ensaios nas condições de operação em vazio e com o rotor bloqueado para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico.

O ensaio em vazio indicado inclui as perdas por atrito e ventilação que são significativas para pequenos motores e número de pólos. Um dos pontos-chaves neste cálculo é a divisão do valor da reatância de dispersão total, encontrado no ensaio de rotor bloqueado, entre as reatâncias de dispersão do rotor e estator. A relação indicada na norma não condizia com o esperado para o motor ensaiado. Logo, ensaios especiais, como o ensaio de rotor removido, e o cálculo teórico da reatância do vazio proveniente da remoção do rotor foram necessários, portanto, utilizados em [3] para esta determinação.

Relembrando que o enfoque principal deste trabalho é obter os parâmetros do motor através do uso de elementos finitos, a descrição sintetizada dos ensaios utilizados, bem como os resultados dos parâmetros do circuito equivalente e do desempenho do motor, calculado a partir destes parâmetros, são apresentados no anexo 4.

II.7 Conclusões.

Os projetistas de motores de indução trifásicos são habituados a trabalhar com o circuito equivalente monofásico do motor para avaliar, entre outras coisas, o desempenho do motor. Ao longo dos anos diversas metodologias foram propostas com o intuito de se determinar os parâmetros deste modelo.

Alguns ensaios foram propostos, como os normalizados [6] com o motor nas condições em vazio e com o rotor bloqueado. Mais recentemente outros ensaios foram propostos, como o de resposta em frequência para determinação dos parâmetros do motor, conforme utilizado em [12]. Além disso, diversas metodologias de cálculos analíticos foram desenvolvidas, onde são empregados diversas formulações empíricas e fatores de correções adquiridos da experiência dos projetistas.

CAPÍTULO III

ELEMENTOS FINITOS APLICADOS AO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Este capítulo aborda a utilização de métodos dos elementos finitos aplicados ao motor de indução trifásico. Inicialmente, comenta-se sobre a necessidade de se obter os resultados mais confiáveis dos parâmetros do circuito equivalente do motor frente às análises pelas metodologias tradicionais como os ensaios laboratoriais e os cálculos analíticos. A seguir, uma revisão bibliográfica sobre o emprego da técnica de elementos finitos para este fim é apresentada e comentada. Por fim, situa-se a proposição deste trabalho dentro do contexto da revisão bibliográfica.

III.1 Introdução.

A necessidade de se obter os parâmetros do circuito equivalente monofásico associados ao motor de indução trifásico com uma precisão maior em relação aos resultados obtidos através das metodologias tradicionais, como os ensaios laboratoriais e os cálculos analíticos, foi discutida no capítulo anterior. Em virtude desta necessidade, nos últimos 15 anos, uma outra técnica tem sido amplamente utilizada na análise de máquinas de indução, permitindo modelar mais fielmente as relações entre fluxos magnéticos e corrente no motor e levando em consideração efeitos de saturação magnética e corrente induzida nas barras do rotor. Conseqüentemente, esta técnica

possibilita obter resultados mais próximos da realidade física e é conhecida como método de elementos finitos, o qual utiliza métodos numéricos para resolver as equações não – lineares associadas.

Devido à complexidade de uma máquina elétrica, no seu modelo são embutidas diversas aproximações que são baseadas no profundo conhecimento do comportamento físico do elemento a ser modelado. Nos métodos de elementos finitos aplicados ao motor de indução, a maior aproximação é o fato de modelar em uma seção bidimensional (2D), pois para o modelo tridimensional (3D) requer uma maior capacidade computacional, como tempo de processamento e memória. Quando se utiliza esta aproximação em 2D, surgem algumas questões para representar uma máquina real que são inerentes de uma natureza 3D, tais como:

- cabeça de bobina do estator;
- anéis de curto do rotor;
- rotor de barras inclinadas (se presente);
- dutos de ventilação radial (se presente);
- correntes entre barras.

Uma das aplicações do modelo em 3D é estudar fenômenos específicos em parte de uma máquina, como alguns dos fenômenos descritos acima.

Apesar da necessidade de se fazer aproximações, é importante ter em mente que para um modelo ser considerado ideal, deve incorporar num mesmo modelo, as seguintes características:

- propriedades magnéticas não - lineares;
- meios para calcular perdas no ferro (incluindo perdas de altas frequências);

- meios para representar efeito pelicular nas barras do rotor e no enrolamento do estator (apenas motores grandes, pois motores pequenos possuem fio fino);
- meios para atualizar as propriedades dos materiais como resultado de mudanças de temperatura local;
- meios para permitir variações axiais nas propriedades magnéticas como resultado do efeito *skew*, causado pelas barras inclinadas do rotor (se presente).

De acordo com um conjunto de aproximações escolhidas para ser aplicado ao elemento a ser analisado, diversas metodologias podem ser implementadas, conforme discutidas no item a seguir. Entretanto, vale ressaltar que a escolha de uma metodologia é fundamentada num balanço entre este conjunto de aproximações.

III.2 Revisão Bibliográfica.

WILLIAMSON [13] fez uma descrição detalhada das diversas técnicas utilizando elementos finitos para modelar motores de indução, as quais podem ser divididas da seguinte maneira, conforme figura III.2-1:

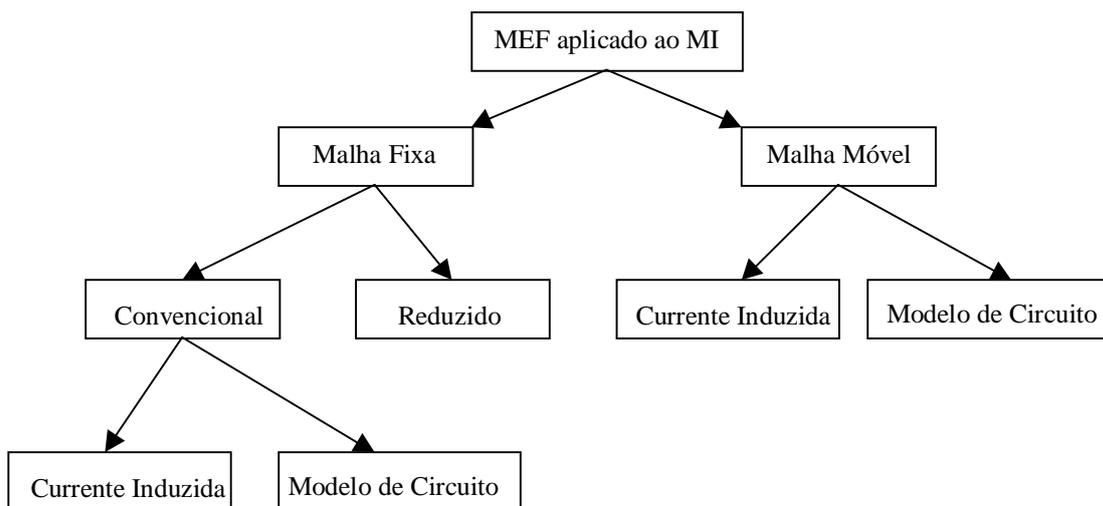


Figura III.2-1: Divisão entre as diversas técnicas de elementos finitos aplicadas em motores de indução.

III.2.1 Modelos de Malha Fixa.

O modelo de malha fixa assume uma variação senoidal no tempo das correntes e dos campos, desta maneira, variáveis complexas são utilizadas, tornando a solução deste método muito mais rápida em relação aos modelos de malha móvel.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) = -\bar{J} \quad (\text{III-1})$$

Entretanto, o modelo de malha fixa não leva em consideração o movimento relativo entre as ranhuras do rotor e do estator. Assim, a saturação magnética, quando considerada, é calculada para uso local de valores médios de relutância no tempo. E ainda, os efeitos da rotação do rotor são considerados através da frequência de escorregamento. Existem, basicamente, dois tipos de modelos de malha fixa, que são conhecidos por modelos malha fixa convencional e malha fixa reduzido.

- **Convencional**

Neste modelo, ambos estator e rotor são malhados para um setor e depois são reproduzidos até o número de pólos completo desejado, usualmente, um passo polar. Possui duas variações devido à forma como a corrente no rotor é calculada, são elas: Modelo de Corrente Induzida e Modelo de Circuito:

a) Modelo de Corrente Induzida [14,15,16,17,18,19]

A solução do campo é levada para fora da referência do rotor no qual todas as quantidades são assumidas variar na frequência de escorregamento ($s\omega$). A corrente induzida no rotor relaciona-se com o potencial vetor magnético (\vec{A}) da seguinte maneira:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} = -js\omega\sigma\vec{A} \quad (\text{III-2})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) - js\omega\sigma\vec{A} = 0 \quad \{J_s = 0 \text{ (não há fonte externa)}\} \quad (\text{III-3})$$

Vantagens sobre o Modelo de Circuito:

- o modelo de campo automaticamente incorpora o efeito pelicular nas barras do rotor;
- o desempenho do motor é calculado através de uma única iteração.

Desvantagens:

- assume que todas as correntes do rotor são de única frequência (não é adequado para máquinas com alto teor de harmônicas na força magnetomotriz e em condições de alimentação não – balanceada);
- o efeito da inclinação das barras rotor não é levado em conta, pois esta consideração acarreta em aumento significativo no tempo de simulação e nos requisitos de memória utilizada.

b) Modelo de Circuito [20,21]

Neste modelo as correntes do estator e rotor são calculadas fora da solução de campo, através de equações de circuito. Assim, o método de elementos finitos é utilizado para calcular os parâmetros e checar a compatibilidade dos resultados.

Vantagens sobre o Modelo de Corrente Induzida:

- em máquinas com distribuições de harmônicas de corrente não desprezíveis o efeito de barras profundas é melhor representado;
 - permite representar o efeito das correntes harmônicas no caso de rotor de barras inclinadas.
-
- **Reduzido** [22,23,24,25,26,27]

Neste modelo apenas uma parte da máquina é malhada com grande refinamento, o rotor é representado por um passo de ranhura, enquanto o estator é representado por um cinto de fase. Este modelo é utilizado para calcular os parâmetros do circuito equivalente, entretanto, são utilizadas simulações separadas tanto para o modelo do estator quanto para o modelo do rotor.

Vantagens:

- uso de malhas refinadas;
- baseado no circuito equivalente monofásico cria uma melhor interface com os modelos industriais correntes.

Desvantagens:

- limitado às máquinas balanceadas;
- característica assimétrica estrutural não pode ser representada.

III.2.2 Modelos de Malha Móvel.

No modelo de malha móvel, a malha do rotor é deslocada em relação à malha do estator como parte de um processo iterativo ao longo do tempo. Ou seja, permite considerar a saturação local de uma maneira mais realista.

Vantagens:

- saturação no ferro local pode ser representado de uma maneira mais realística;
- efeitos da variação da permeância do entreferro pelo movimento dos dentes do rotor ao passarem pelos dentes do estator são incluídos no modelo de campo;
- condições de alimentação não-senoidal (conversores) podem ser representados;
- operação dinâmica pode facilmente ser modelada incorporando as equações de movimento no procedimento iterativo (passo a passo) no tempo.

Desvantagens:

- tempo de processamento e tamanho de memória.

Assim como o modelo de malha fixa, normalmente, é necessário malhar apenas um pólo da máquina e usar condição de simetria. A equação do campo, neste caso, é com valores instantâneos ao invés de valores complexos usados no caso de malha fixa. Existem dois métodos de solução para o modelo de malha móvel, no qual diferem apenas o termo de excitação (J) que são Modelo de Corrente Induzida e Modelo de Circuito.

a) Modelo de Corrente Induzida [28,29]

Como vantagem, apresenta a característica de incluir efeitos peliculares transientes nas barras do rotor, entretanto, como característica de desvantagem, não considera o efeito do rotor de barras inclinadas.

b) Modelo de Circuito [24,30]

Como vantagem sobre o modelo de corrente induzida pode-se mencionar que o efeito de inclinação das barras do rotor é considerado. E ainda, as equações de circuito variam passo a passo no tempo, sendo a solução do campo necessita ser obtida apenas quando houver uma variação considerável na saturação. Assim como no caso de malha fixa, o efeito pelicular não é considerado. Logo, é necessário utilizar expressões analíticas para ser levado em conta.

III.2.3 Comentários Adicionais.

Alguns dos trabalhos mencionados, cujo objetivo foi calcular os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução usando métodos de elementos finitos, são descritos e comentados em seguida.

Robinson [22,23] baseado, principalmente em [25], desenvolveu uma técnica na qual utiliza o método de elementos finitos através de modelos reduzidos, do estator e do rotor separados, em conjunto com o modelo convencional (analítico) do circuito equivalente para determinar os parâmetros atualizados do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico. Basicamente, esta metodologia consiste em calcular os parâmetros do circuito equivalente pelo método tradicional (analítico). Em seguida o circuito é resolvido para se determinar as correntes do estator (I_1) e do rotor

refletida ao estator (I'_2). De posse das correntes calculadas, estas são usadas como fontes de correntes nos modelos de elementos finitos do estator e do rotor, no qual permitem que novos parâmetros sejam obtidos, levando em consideração a saturação magnética e o efeito de barra profunda. Desta forma, o circuito equivalente com os parâmetros atualizados é resolvido e novos valores de correntes I_1 e I'_2 são determinados e comparados com os valores calculados anteriormente. Este processo iterativo é repetido até que a convergência desejada, entre os valores de correntes, seja alcançada. Vale mencionar que o efeito do rotor de barras inclinadas é considerado através de fator de correção analítico.

Em [15], a técnica utilizada foi a Convencional através do modelo de corrente induzida no rotor. Neste caso, a metodologia consiste basicamente em calcular os parâmetros do circuito equivalente do motor usando elementos finitos através da simulação dos ensaios nas condições em vazio e com o rotor bloqueado. Observou-se que a reatância de dispersão do estator foi ignorada no ensaio em vazio, considerando apenas a parcela referente à reatância de magnetização. No ensaio com o rotor bloqueado, a parcela da reatância de dispersão obtida foi considerada única, ou seja, engloba as dispersões do estator e do rotor. Além disso, a componente referente às perdas no ferro foi ignorada.

Em [16], a técnica utilizada foi de análises através da simulação dos ensaios sob as condições em vazio, em carga e com o rotor bloqueado. Entretanto, foi adicionado o cálculo dos efeitos de ponta utilizando modelos de elementos finitos em 2D e em 3D. As conclusões obtidas sobre a consideração dos efeitos de ponta foram as seguintes:

- no ensaio em vazio, a influência é abaixo de 5% do valor da impedância do circuito;

- no ensaio em carga, o parâmetro mais importante é o efeito de ponta na resistência do anel de curto – circuito do rotor. O efeito na reatância de dispersão na cabeça da bobina tem pouca influência e o efeito na reatância de dispersão do anel pode ser desprezado, principalmente, nos motores com ranhuras do rotor fechadas devido à componente de dispersão na região do ferro entre a ranhura e o entreferro (denominada de ponte).

Mais recentemente em [14], foram implementadas três metodologias distintas para o cálculo dos parâmetros do motor, todas elas baseadas na magnetodinâmica complexa, que permite a indução de corrente.

- a primeira, conhecida por método dos dois ensaios, em vazio e com rotor bloqueado, calcula os parâmetros em apenas dois pontos de escorregamento da máquina. Assim como mencionado em [15], desprezou a reatância de dispersão do estator frente à reatância de magnetização. No ensaio em carga, considerou a reatância de dispersão obtida igualmente dividida entre as reatâncias de dispersão do estator e do rotor refletida ao estator. Igualmente [15], desconsiderou a componente referente às perdas no ferro.
- a segunda metodologia, denominada método da impedância total, calcula os parâmetros variando com o escorregamento. Entretanto, requer uma complexidade maior de cálculo para solucionar duas equações não – lineares para cálculo dos parâmetros da impedância do rotor. Além disso, o circuito equivalente adotado para resolução destas referidas equações considera a parcela de resistência referente às perdas no ferro em série com a reatância de magnetização, o que não é considerado no circuito equivalente monofásico

tradicional por entender-se que esta parcela independente, fisicamente, da corrente de magnetização.

- o terceiro método proposto é através do diagrama vetorial e permite determinar os parâmetros do circuito equivalente variando com o escorregamento, conhecendo-se tanto as correntes, quanto as potências ativa e reativa do motor em módulo e em fase, calculadas por elementos finitos.

III.3 Metodologia Proposta.

Com o objetivo de determinar os parâmetros do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico de maneira simples e rápida, optou-se por utilizar o método dos elementos finitos através da malha fixa convencional para a simulação dos ensaios que são executados no motor. Os ensaios propostos neste trabalho são os seguintes:

- Ensaio com rotor removido;
- Ensaio em vazio;
- Ensaio com rotor bloqueado.

III.3.1 Ensaio com Rotor Removido.

No ensaio com o rotor removido o objetivo é determinar a reatância de dispersão do estator, neste caso, representada pela parcela de dispersão da ranhura. Este ensaio faz com que esta metodologia proposta difira dos demais métodos conhecidos como método dos dois ensaios (em vazio e rotor bloqueado) para determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor. Pois, neste caso, a prática normalmente empregada é ignorar a reatância de dispersão do estator frente à reatância de magnetização no ensaio

em vazio e, além disso, considerar determinadas relações entre as reatâncias de dispersão do estator e dispersão do rotor no ensaio com rotor bloqueado. A validação deste ensaio proposto é verificada no anexo 1.

A solução utilizada neste ensaio é a magnetostática, conforme visto a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) = -\bar{J}_s \quad (\text{III-4})$$

III.3.2 Ensaio em Vazio.

No ensaio em vazio, considera-se a situação ideal onde o motor está girando à velocidade síncrona, ou seja, não há indução à frequência fundamental no circuito do rotor. Neste caso, o circuito equivalente é aproximado conforme a figura III.3-1:

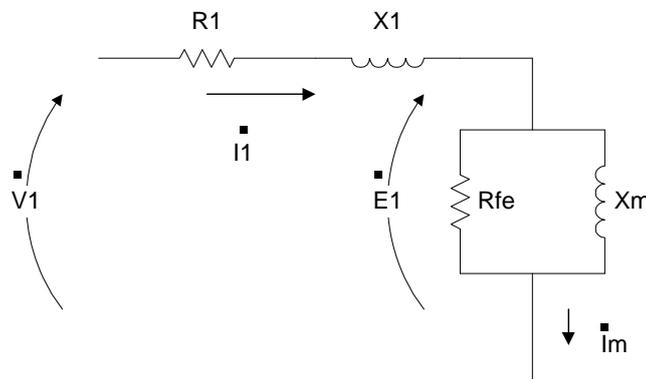


Figura III.3-1: Circuito equivalente aproximado na condição de ensaio em vazio.

Com o resultado deste ensaio é possível determinar tanto a reatância de magnetização (X_m) quanto o componente que representa as perdas no ferro (R_{fe}).

Uma das componentes de perdas no ferro mais significativas é a perda no núcleo à frequência fundamental, a qual é resultante de dois efeitos diferentes, as correntes parasitas induzidas nas lâminas do aço e o efeito de histerese. Esta perda pode ser

calculada através do método dos elementos finitos usando a curva de perda total específica por densidade de fluxo magnético fornecida pelo fabricante do aço. A perda total específica é o somatório das perdas por histerese e correntes parasitas induzidas nas lâminas.

Vale mencionar que assim como no ensaio com o rotor removido, onde não há correntes induzidas, o ensaio em vazio utiliza a solução magnetostática.

III.3.3 Ensaio com Rotor Bloqueado.

No ensaio com o rotor bloqueado ($s=1$) considera-se que a impedância do rotor é muito menor que a impedância do ramo de magnetização, assim o circuito equivalente do motor aproximado para esta condição é representado conforme a figura III.3-2:

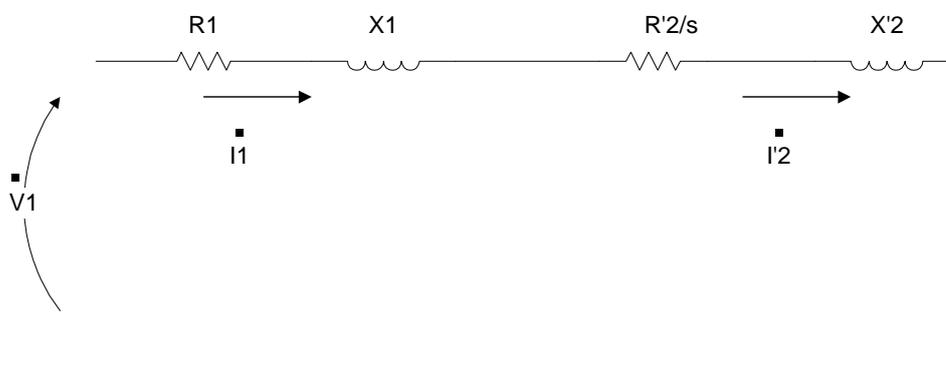


Figura III.3-2: Circuito equivalente aproximado na condição de rotor bloqueado.

Portanto, com o resultado deste ensaio é possível determinar tanto a reatância de dispersão quanto à resistência do circuito do rotor. Desta maneira, a parcela referente à dispersão *zig-zag* que aparece neste ensaio é considerada como parte da reatância de dispersão do rotor. Além desta, outra parcela encontrada é a dispersão da ranhura do rotor.

Vale ressaltar que na condição de rotor bloqueado a frequência no rotor (f_r) é igual à frequência do estator (f_1) devido o escorregamento unitário. Entretanto, esta condição não representa a frequência do rotor na região de operação normal do motor, onde o escorregamento varia de 2% a 4%. Desta maneira, para obter valores de R'_2 mais próximos da condição normal de operação, realiza-se o ensaio a uma frequência reduzida, em torno de 25% da frequência nominal, conforme recomendado na norma [6]. Como a reatância de dispersão do rotor refletida ao estator no circuito equivalente é determinada a 60 Hz, deve-se corrigir o valor da reatância encontrado no ensaio em rotor bloqueado, multiplicando-se este valor pela relação entre a frequência nominal e a frequência de ensaio.

A solução utilizada neste ensaio é denominada magnetodinâmica e utiliza a equação da difusão na forma harmônica no tempo em regime permanente, pois há indução de correntes nas barras do rotor curto - circuitadas, conforme visto a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) = +js\omega\sigma\bar{A} - \bar{J}_s \quad (\text{III-5})$$

A solução harmônica calcula o efeito da corrente alternada (CA) no dispositivo eletromagnético e nos condutores, incluindo os efeitos de correntes induzidas, efeito pelicular, entre outros. A principal desvantagem deste tipo de solução é o fato da análise ser linear, logo os efeitos de histerese e saturação magnética são desconsiderados. Para contornar esta desvantagem faz-se necessário uma iteração entre a solução harmônica e a solução estática, a qual a análise é não –linear [25].

Tendo em vista que os motores brasileiros, em particular o motor avaliado, são construídos com as barras do rotor inclinadas com o objetivo de reduzir as perdas

devido as componentes harmônicas do dente e da ranhura devido à variação da relutância e que a solução por correntes induzidas não considera este tipo de rotor, optou-se em corrigir os parâmetros do rotor analiticamente através do fator *skew* (k_{sk}), conforme [6] observado a seguir:

$$X'_2 = X'_2 \cdot \left(\frac{1}{k_{sk}} \right)^2 + X_m \cdot \left[\frac{1}{(k_{sk})^2} - 1 \right] \quad (\text{III-6})$$

$$R'_2 = \frac{R'_2}{(k_{sk})^2} \quad (\text{III-7})$$

Onde:

$$k_{sk} = \frac{\sin\left(\frac{\theta_{sk}}{2}\right)}{\frac{\theta_{sk}}{2}} \quad (\text{III-8})$$

Neste método proposto, devido à aproximação do modelo em 2D, onde é considerado que o comprimento do pacote magnético é muito maior que as demais dimensões envolvidas, os efeitos de ponta são calculados analiticamente,. Desta maneira, a reatância de dispersão da cabeça de bobina do estator e a resistência do anel de curto circuito do rotor são calculados pelas seguintes equações, respectivamente, conforme apresentado no Anexo 3.

$$X_e = \frac{4,6 \cdot N_{fa} \cdot f \cdot N^2 \cdot N_c^2 \cdot D_1}{10^8 \cdot P^2} \left\{ \begin{array}{l} \tan(\alpha_b) \cdot \left(\frac{p \cdot \pi - \text{sen}(p \cdot \pi)}{\pi} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{0,8 \cdot D_2}{D_1} \right)^P \right] + \\ 0,93 \cdot \varepsilon^2 \cdot \left(\log \frac{1,4 \cdot D_1}{2 \cdot h_1} - \frac{D}{D_1} \cdot \log \frac{0,54 \cdot D}{R} \right) \end{array} \right\} \quad (\text{III-9})$$

$$R_{\text{anel}} = r_t \cdot \rho_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{am}}{A_2 \cdot Z_2 \cdot 2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \quad (\text{III-10})$$

III.4 Conclusões.

O emprego da técnica de elementos finitos para determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução tem o objetivo principal de calcular parâmetros de forma mais precisa que os métodos tradicionais, devido a maior precisão obtida na representação da distribuição não – uniforme do campo magnético, dos diversos caminhos dos fluxos magnéticos no motor e das correntes induzidas no rotor.

Desta forma, esta técnica vem contribuir nos processos de fabricação [31] e, principalmente, otimização de motores de indução trifásicos.

CAPÍTULO IV

ESCOLHA DO MOTOR E DO PROGRAMA COMPUTACIONAL UTILIZADOS

Este capítulo aborda a escolha do motor de indução trifásico utilizado neste trabalho, apresenta suas características técnicas e, além disso, comenta-se sobre o programa computacional utilizado para a implementação da análise pelo método de elementos finitos.

IV.1 Introdução.

O motor escolhido é o motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo com potência nominal de 5 cv por representar, aproximadamente, a potência média do motor brasileiro [1], além de ser um dos tipos comercialmente mais vendidos, conforme informações colhidas junto aos fabricantes em [3].

Quanto ao programa computacional, foi utilizado o ANSYS adotado nos diversos programas da COPPE.

A seguir serão apresentadas as principais características, tanto do motor, quanto do programa utilizados neste trabalho.

IV.2 Descrição das Características do Motor Utilizado.

Além dos dados de placa de motor, algumas informações importantes para a construção e análise do modelo do motor foram obtidas junto ao fabricante, conforme listado a seguir:

- Potência nominal: 5 cv;
- Tensão nominal: 380 / 220 V;
- Corrente nominal: 8,3 / 14,3 A;
- Número de Pólos: 4;
- Rotação nominal: 1730;
- Categoria: N;
- Número de ranhuras do estator: 36;
- Número de ranhuras do rotor: 44;
- Entreferro: 0,37 mm;
- Número de espiras em série por bobina: 13;
- Número de camadas do enrolamento do estator em série: 2
- Bobina de passo pleno
- Comprimento do pacote magnético (L): 13 cm.

As demais informações relevantes, como as dimensões envolvidas tanto no estator, quanto no rotor, assim como, a característica magnética do aço utilizado são apresentadas no Anexo 1. A figura IV.2-1 mostra o motor utilizado.



Figura IV.2-1: Motor de indução trifásico de 5 cv

IV.3 Descrição das Características do Programa Computacional Utilizado.

Como todo programa computacional para aplicação do método de elementos finitos, este programa utiliza métodos computacionais para cálculo de campos eletromagnéticos baseados nas equações de Maxwell e nas relações constitutivas que descrevem o comportamento de materiais eletromagnéticos, apresentadas a seguir:

- Equações de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{IV-1})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{IV-2})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{IV-3})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{IV-4})$$

- Relações Constitutivas:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{IV-5})$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{IV-6})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{IV-7})$$

Basicamente o programa é composto de três etapas, conforme apresentado na figura IV.3-1 a seguir:

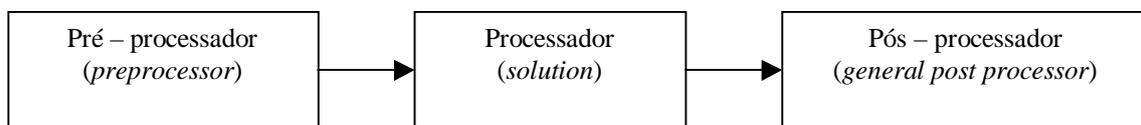


Figura IV.3-1: Etapas do programa computacional

IV.3.1 Pré - Processador.

No pré - processador cria-se o ambiente físico, ou seja, constrói - se o modelo a ser analisado através da entrada de dados de sua geometria; estabelece as propriedades dos materiais; associa-se os materiais à sua geometria e gera-se a malha.

As características ferromagnéticas dos materiais utilizados são fornecidas através da permeabilidade magnética relativa (μ_r) para os casos lineares ou através da curva de magnetização (B x H) para os materiais não-lineares.

Inicialmente, na construção do modelo, foi criada uma seção do motor correspondente a um passo da ranhura tanto do estator quanto do rotor, conforme figura IV.3-2. Em seguida, esta seção foi mapeada com grande refinamento (figuras IV.3-3 e IV.3-4) e, finalmente, foi gerada a quantidade de vezes necessária para a obtenção do modelo completo, conforme a figura IV.3-5.

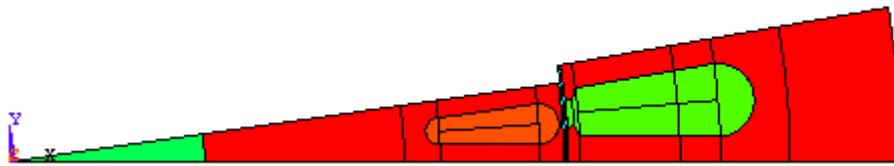


Figura IV.3-2: Seção do motor correspondente a um passo da ranhura do estator e do rotor para construção do modelo.

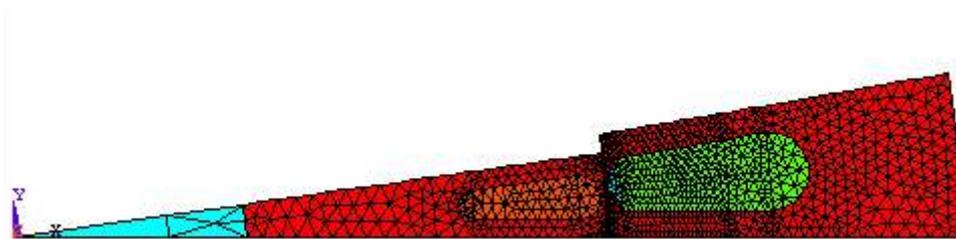


Figura IV.3-3: Malha de elementos da seção do motor utilizada para construção do modelo.

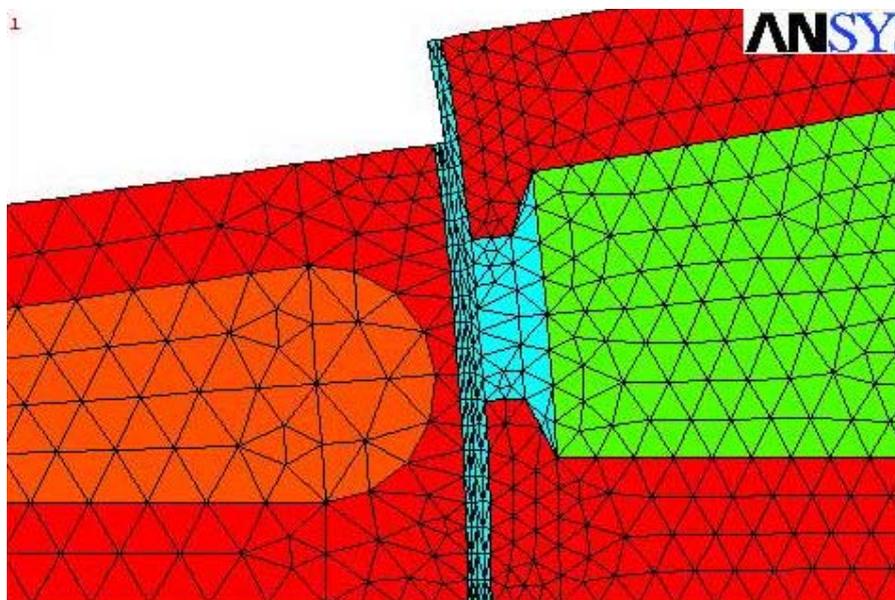


Figura IV.3-4: Detalhe da malha de elementos no região do entreferro.

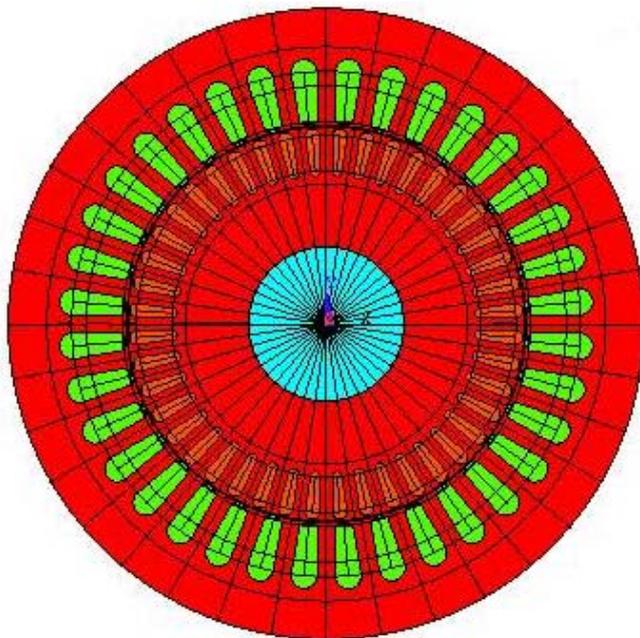


Figura IV.3-5: Modelo completo.

IV.3.2 Processador.

No processador aplica-se às condições de contorno e carga, além disso, define-se o tipo de análise. Em seguida, o sistema de equações é resolvido e, então, obtém-se o potencial vetor magnético nos nós dos elementos da malha gerada.

Em problemas bidimensionais (2D) as linhas de fluxo magnético são paralelas as linhas equipotenciais do potencial vetor magnético (\vec{A}), conforme demonstrado em [32]. Quando as linhas de fluxo são consideradas paralelas ao contorno, ou seja, assumindo que todo o fluxo esteja confinado no pacote magnético do motor, a condição de contorno é conhecida por Dirichlet (normalmente $\vec{A} = 0$). No caso de considerar a simetria do modelo para redução do tempo da solução, as linhas de fluxo serão perpendiculares à fronteira e a condição de contorno, neste caso, é conhecida por Neumann.

A alimentação, ou seja, a aplicação de carga ao modelo do motor, pode ser feita através de densidades de correntes uniformemente distribuídas entre os elementos ou através de tensão.

Os tipos de análises disponíveis no processador para o modelo em interesse, ou seja, em regime permanente, são definidos de acordo com a alimentação e podem ser:

- estática (CC);
- harmônica (CA em regime permanente).

E ainda, deve-se escolher o método numérico utilizado na solução do sistema de equações, o qual no caso deste modelo ser bidimensional, deve-se utilizar o método recomendado para soluções em 2D (*default*) conhecido por *Frontal Direct Equation Solver*, conforme mencionado no manual do programa.

IV.3.3 Pós - Processador.

No pós - processador calcula-se as grandezas de interesse derivadas do potencial vetor magnético, tais como:

- densidade de fluxo magnético;
- indutância;
- resistência;
- outras.

Através da interface gráfica é possível analisar a distribuição das linhas equipotenciais tanto do potencial vetor magnético quanto do fluxo magnético e, além disso, analisar a distribuição da densidade de fluxo magnético em qualquer região do modelo.

Os resultados obtidos e suas análises serão vistos no próximo capítulo.

IV.4 Conclusões.

Neste capítulo apresentou-se às principais características tanto do motor escolhido, quanto do programa computacional utilizados neste trabalho.

É importante mencionar que devido às inúmeras opções disponíveis no programa computacional ANSYS, ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sentiu-se dificuldades em sua implementação, apesar dos guias e manuais disponíveis na opção

de ajuda do programa. Neste sentido, o trabalho desenvolvido por Bessa [33], apesar de ser em uma linha de aplicação diferente (mancais magnéticos), teve uma importante contribuição no início da implementação devido, principalmente, a listagem das rotinas do programa ser fortemente comentada.

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pela aplicação do método dos elementos finitos ao modelo do motor de indução trifásico para determinação dos parâmetros do seu circuito equivalente monofásico. Em seguida, apresenta os resultados do desempenho energético do motor, calculados a partir do circuito equivalente obtido. Finalmente, todos os resultados são comparados com os resultados obtidos através da metodologia clássica de cálculos analíticos e ensaios laboratoriais.

V.1 Introdução.

Conforme apresentado no capítulo 3, a metodologia utilizada neste trabalho compreende a simulação através dos elementos finitos dos ensaios do motor sob as condições rotor removido, em vazio e rotor bloqueado.

V.2 Ensaio Rotor Removido.

A densidade de corrente foi aplicada com valor proporcional à corrente de 4,1 A, obtida no ensaio com o rotor removido (vide anexo 4). A simulação deste ensaio foi realizada de duas maneiras, compreendidas por:

- injeção da densidade de corrente em apenas uma fase;

- injeção da densidade de corrente nas três fases defasadas de 120°.

Em ambos os casos o valor obtido para a indutância por fase do estator foi o mesmo (vide tabela V-1). Vale ressaltar que, a indutância por fase considera a contribuição das parcelas própria e mútua, conforme deduzido nas expressões a seguir:

$$\dot{V}_a = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_a \cdot \dot{I}_a + L_{ab} \cdot \dot{I}_b + L_{ac} \cdot \dot{I}_c) \quad (V-1)$$

Onde:

\dot{V}_a = tensão monofásica aplicada ao enrolamento da fase A do estator;

\dot{I}_a = corrente da fase A do estator;

\dot{I}_b = corrente da fase B do estator;

\dot{I}_c = corrente da fase C do estator;

L_a = indutância própria da fase A do estator;

L_{ab} = indutância mútua entre as fases A e B do estator;

L_{ac} = indutância mútua entre as fases A e C do estator;

f = frequência.

Como: $L_{ab} = L_{ac}$

$$\dot{V}_a = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a \cdot \dot{I}_a + j \cdot \omega \cdot L_{ab} \cdot (\dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (V-2)$$

$$\dot{V}_a = \dot{I}_a \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_a - L_{ab}) \quad (V-3)$$

Assim: $L_1 = L_a - L_{ab}$

Onde:

L_1 = indutância total por fase do estator.

Logo, as equações utilizadas para calcular as parcelas própria e mútua da indutância por fase são apresentadas a seguir:

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = \frac{N \cdot \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}}{I_a} \quad (V-4)$$

$$L_{ab} = \frac{\lambda_a}{I_b} \quad (V-5)$$

Tabela V-1: Resultados do ensaio rotor removido

	Injeção em 1 fase	Injeção em 3 fases
L_1 (mH)	5,95 [5,1617-(-0,7885)]	5,95
X_1 (Ω)	2,24	2,24

É importante mencionar que, deve-se acrescentar a parcela referente à cabeça de bobina cujo valor é obtido através de cálculo analítico.

As figuras V.2-1 e V.2-2 mostram, respectivamente, o fluxo magnético e a densidade de fluxo resultantes da simulação do ensaio rotor removido com injeção de corrente nas três fases.

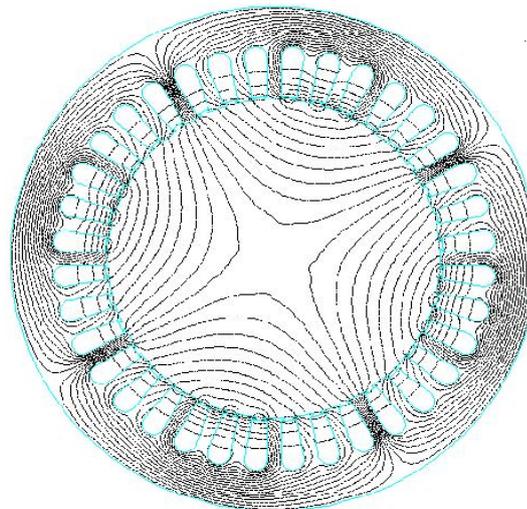


Figura V.2-1: Fluxo no ensaio rotor removido com injeção de corrente nas três fases.

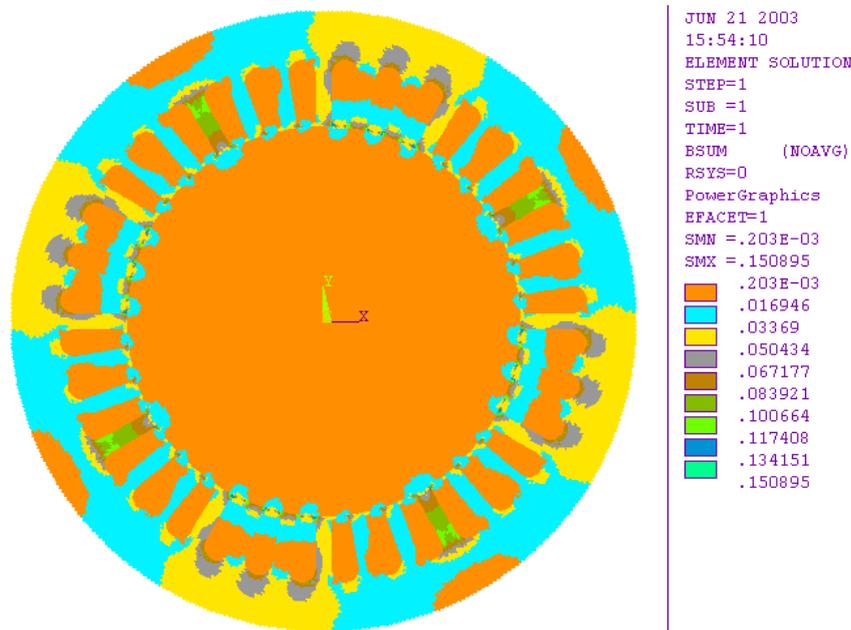


Figura V.2-1: Densidade de fluxo magnético no ensaio rotor removido com injeção de corrente nas três fases.

V.3 Ensaio em Vazio.

A densidade de corrente foi aplicada com valor proporcional à corrente de 4,3 A, obtida no ensaio do motor em vazio (vide anexo 4). A simulação deste ensaio foi realizada de duas maneiras, compreendidas por:

- análise estática (CC);
- análise harmônica (CA).

A realização deste ensaio através da análise harmônica (CA) foi apenas com a finalidade de comparar os resultados entre as análises estática e harmônica. Os resultados são apresentados na tabela V-2 a seguir.

Tabela V-2: Resultados do ensaio em vazio

	Análise Estática (valor médio)	Análise Harmônica (valor médio)
$L_1 + L_m$ (mH)	175,30	183,43
$X_1 + X_m$ (Ω)	66,09	69,15
L_m (mH)	169,35	177,48
X_m (Ω)	63,85	66,91

O valor adotado neste trabalho é o obtido na análise estática (não-linear), conforme a metodologia proposta. O valor da indutância de magnetização é obtido pela subtração da parcela referente à indutância total por fase calculada no ensaio com o rotor removido ($L_1=5,95\text{mH}$). Deve-se ressaltar ainda, que em vazio ocorre saturação magnética nas regiões onde a densidade de fluxo magnético é superior a 1,4T (de acordo com a curva característica de magnetização mostrada no Anexo 1), conforme observado na figura V.3-1 e comprovados pelo ensaio realizado no motor (Anexo 4). Por esta razão, a solução harmônica (linear) leva a uma indutância superior (4,8%), pois não considera a não - linearidade do material ferro - magnético.

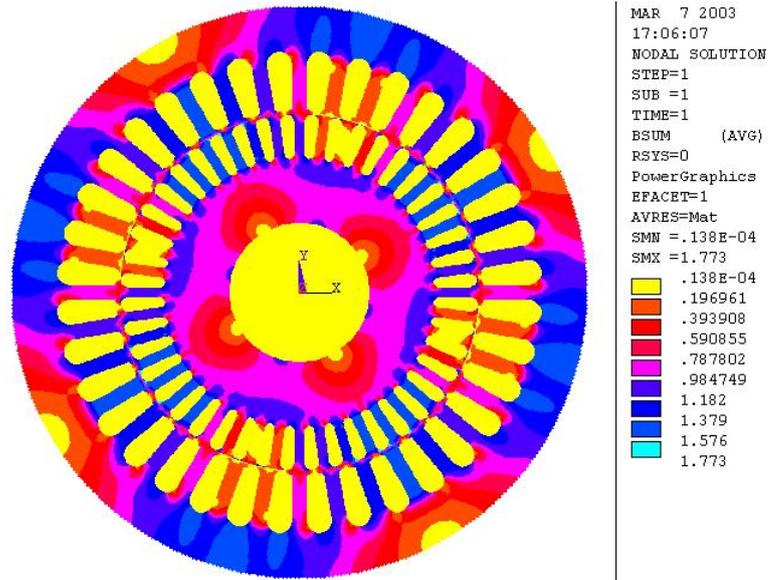


Figura V.3-1: Densidade de fluxo obtido no ensaio em vazio através da solução estática

Na figura V.3-2 observa-se que as linhas de fluxo resultantes da simulação do ensaio em vazio penetram intensamente no rotor.

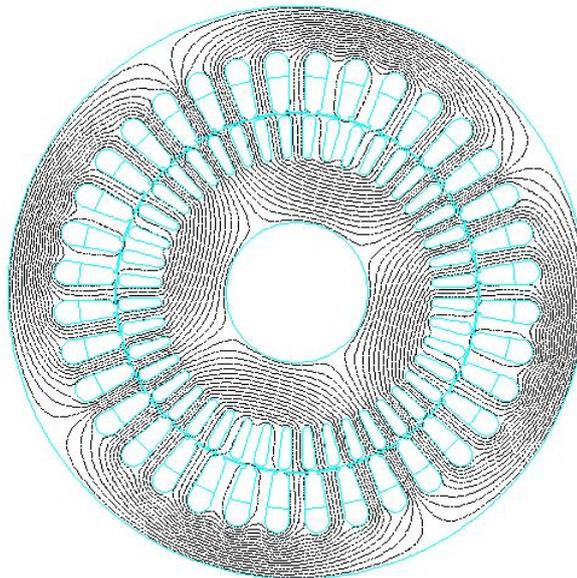


Figura V.3-2: Fluxo magnético no ensaio em vazio

V.3.1 Perdas Magnéticas em vazio

A perda magnética foi calculada em função da curva de perdas magnética em função da densidade de fluxo magnético disponível. Portanto, a partir da densidade de fluxo obtida para cada elemento é possível determinar a perda magnética da seguinte maneira:

$$P_{fe} = \sum [P_{fe}(B)_{elemento} \cdot \rho \cdot Area_{elemento} \cdot L] \quad (V-6)$$

Porém deve-se ressaltar que a curva representa apenas a faixa de densidade de fluxo a partir de 0,6T até 1,8T. Logo, a função ajustada para esta faixa não é satisfatória para valores de densidade de fluxo abaixo de 0,6T, levando a valores subdimensionados de perdas, principalmente, abaixo de 0,2T que acarreta em valores negativos e foram desconsiderados. Para minimizar este fato, foi ajustada uma curva utilizando interpolação *cubic spline* para a faixa de 0 T a 0,6T, conforme mostrado no Anexo 1

De posse das perdas magnéticas é possível calcular a componente referente à perda no ferro de acordo com a equação a seguir e visualizar o resultado na tabela V-3.

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot E^2}{P_{fe}} \quad (V-7)$$

Tabela V-3: Perdas Magnéticas

P_{fe} (W)	39,45
R_{fe} (Ω)	3.353,69

V.4 Ensaio Rotor Bloqueado.

Este ensaio é realizado injetando densidade de corrente nominal e defasada de 120° entre as fases, com o objetivo de reproduzir o ensaio físico que é realizado com tensão reduzida até atingir a corrente nominal. Além disso, o ensaio foi realizado com frequência reduzida (15 Hz) para obter valor da resistência do rotor, R'_2 , mais próximo da condição normal de operação. E ainda, foi realizado o ensaio à frequência de 60 Hz com o objetivo de observar a pouca penetração das linhas de fluxo sob esta condição [34].

Para combinar ambas influências de correntes induzidas e saturação magnética, um processo iterativo usando ambas soluções harmônica (linear) e estática (não – linear) foi utilizado [16]. A solução harmônica é usada para obter as correntes induzidas nas barras do rotor. A partir desta solução as partes real e imaginária das correntes tanto do estator quanto do rotor são extraídas e usadas como alimentação da solução estática não – linear. A partir desta solução estática a permeabilidade relativa de cada elemento é determinada e aplicada como propriedade do material de cada elemento das chapas magnéticas do estator e do rotor. Assim uma nova solução harmônica é realizada até o processo convergir. Neste trabalho a convergência ocorreu em cinco iterações e os resultados foram considerados satisfatórios, conforme [16].

De acordo com o circuito equivalente aproximado deste ensaio descrito no capítulo 3, os parâmetros são calculados conforme as expressões seguintes e apresentados na tabela V-4.

$$R_1 + R'_2 = \frac{P_1}{I^2} \quad (V-8)$$

$$X_1 + X'_2 = \frac{Q_1}{I^2} \quad (V-9)$$

Onde:

$$P_1 = V_f \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (V-10)$$

$$Q_1 = V_f \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (V-11)$$

Tabela V-4: Resultados do ensaio rotor bloqueado

$R_1 + R'_2 (\Omega)$	1,927
$(X_1 + X'_2)_{60\text{ Hz}} (\Omega)$	4,9997
$R'_2 (\Omega)$	0,656
$X'_2 (\Omega)$	2,7597

De acordo com a metodologia proposta, utiliza-se o fator *skew* para corrigir o efeito de dispersão causado pela inclinação das barras nos parâmetros do rotor, conforme [22] e apresentado na tabela V-5.

Tabela V-5: Parâmetros do rotor corrigido pelo fator *skew*

$R'_2 (\Omega)$	0,660
$X'_2 (\Omega)$	3,2143

Observa-se na figura V.4-1 que o fluxo pouco penetra no rotor sob esta condição de rotor bloqueado devido ao fluxo contrário produzido pelas correntes induzidas nas barras do rotor.

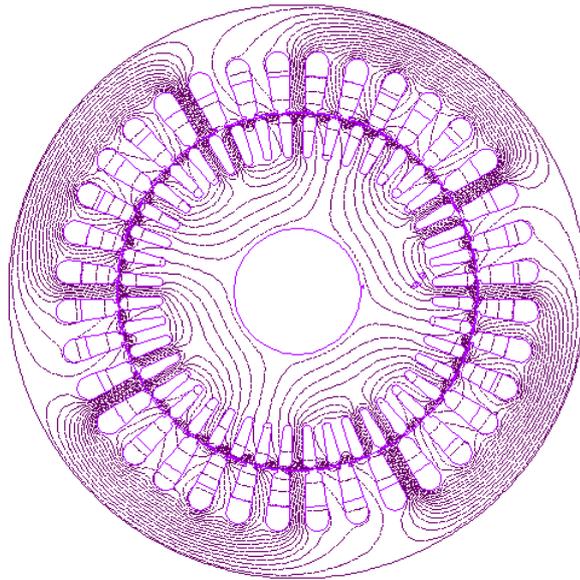


Figura V.4-1: Fluxo no ensaio rotor bloqueado para solução harmônica a 15 Hz.

Observa-se também que o fluxo da solução estática é igual ao fluxo da solução harmônica devido a iteração entre as soluções, conforme a figura V.4-2 a seguir:

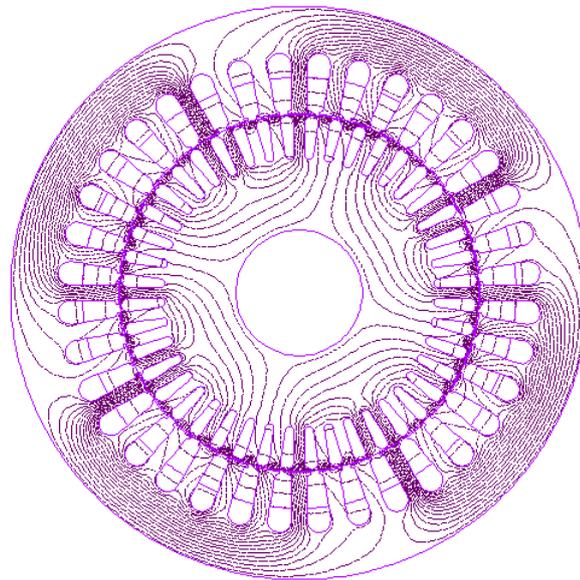


Figura V.4-2: Fluxo no ensaio rotor bloqueado para solução estática, em iteração com solução harmônica à frequência de 15 Hz.

Além disso, pode-se observar nas figuras V.4-3 e V.4-4 que o fluxo penetra menos ainda quando o ensaio de rotor bloqueado é realizado à frequência de 60 Hz.

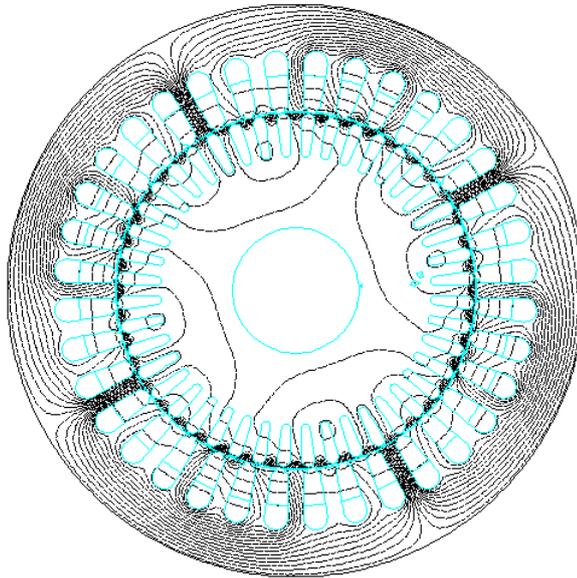


Figura V.4-3: Fluxo no ensaio rotor bloqueado para solução harmônica a 60 Hz

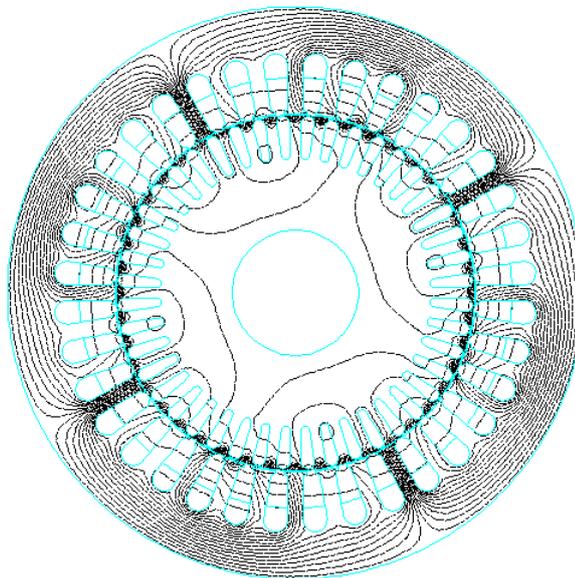


Figura V.4-4: Fluxo no ensaio rotor bloqueado para solução estática, em iteração com solução harmônica à frequência de 60 Hz.

A figura V.4-5 mostra tanto a distribuição da densidade de corrente injetada no estator, quanto à distribuição da densidade de corrente induzida no rotor, onde é possível observar ao efeito pelicular nas barras do rotor.

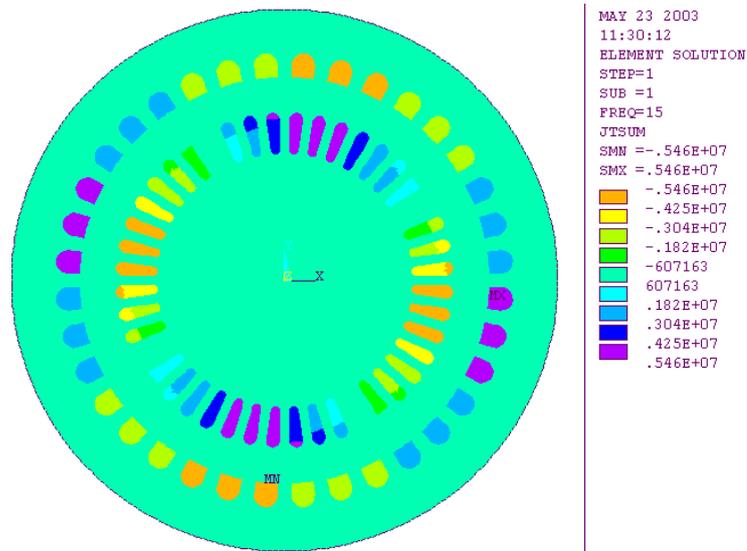


Figura V.4-5: Densidade de corrente no ensaio rotor bloqueado (solução harmônica a 15Hz)

A saturação magnética devido às ranhuras fechadas do rotor, pode ser observada nas regiões onde a densidade de fluxo é superior a 1,4T conforme a figura V.4-6.

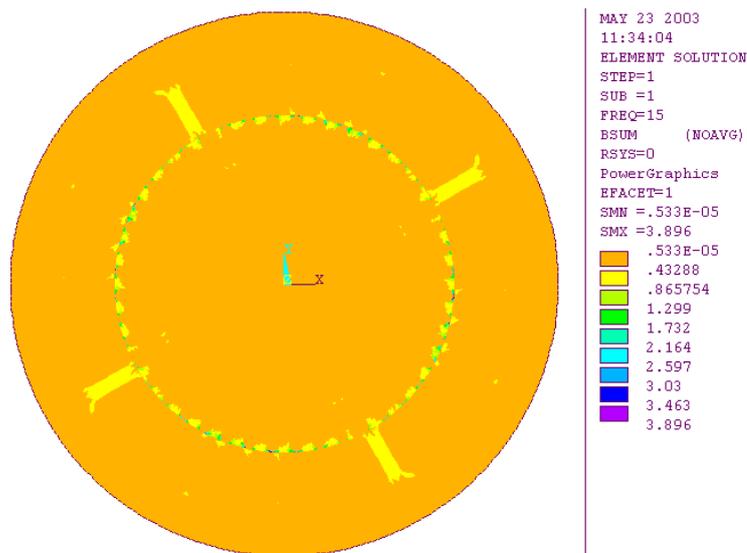


Figura V.4-6: Densidade de fluxo no ensaio rotor bloqueado (solução harmônica 15 Hz)

Na figura V.4-7 a região de saturação é observada com maior detalhamento. O ensaio físico no motor na condição de rotor bloqueado comprova a existência de saturação magnética, conforme Anexo 4.

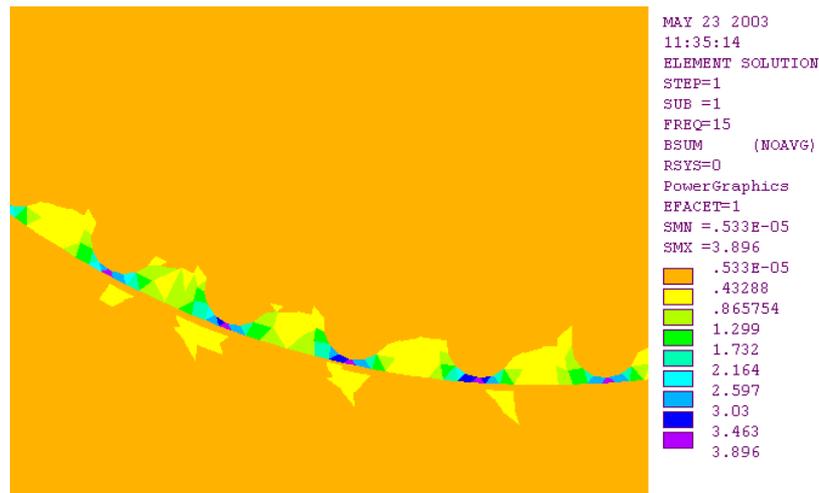


Figura V.4-7: Detalhe da densidade de fluxo no ensaio rotor bloqueado na região que ocorre saturação magnética (solução harmônica 15 Hz).

V.5 Resultados Finais.

A tabela V-6 apresentada a seguir é comparativa entre os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, corrigidos analiticamente devido às parcelas referentes à cabeça de bobina do estator e ao anel de curto do rotor, e os resultados obtidos pelas metodologias de cálculo analítico e de ensaios para obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do motor.

Tabela V-6: Tabela comparativa dos resultados

Grandezas	MEF	Ensaio	Analítico
$R_1 (\Omega)$	1,271	1,341	1,264
$R_2' (\Omega)$	1,123 [0,660 (R_{barra}) + 0,463 (R_{anel})]	1,20	1,217
$X_1 (\Omega)$	2,887 [2,24 + 0,647 (X_{end})]	2,5	2,133
$X_2' (\Omega)$	3,861 [3,214 + 0,647 (X_{end})]	2,8	2,138
$X_m (\Omega)$	63,85	51,37	48,83
$R_{fe} (\Omega)$	3353,69	1048	1072,12

A partir dos parâmetros do circuito equivalente pode-se avaliar o desempenho energético do motor de acordo com a metodologia proposta no capítulo 2. Os resultados são apresentados na tabela V-7 e na figura V.5-1.

Tabela V-7: Avaliação do desempenho energético do motor

Grandezas	MEF	Ensaio	Analítico
Perdas no estator (W)	241,05	257,15	245,56
Perdas no rotor (W)	158,24	150,12	151,58
Perdas no núcleo (W)	37,59	120,40	120,75
Rendimento (%)	89,9	87,5	87,8
Conjugado (N.m)	21,53	20,42	20,62
Conjugado de partida (N.m)	16,02	25,40	36,75
Conjugado máximo (N.m)	44,52	53,13	63,81

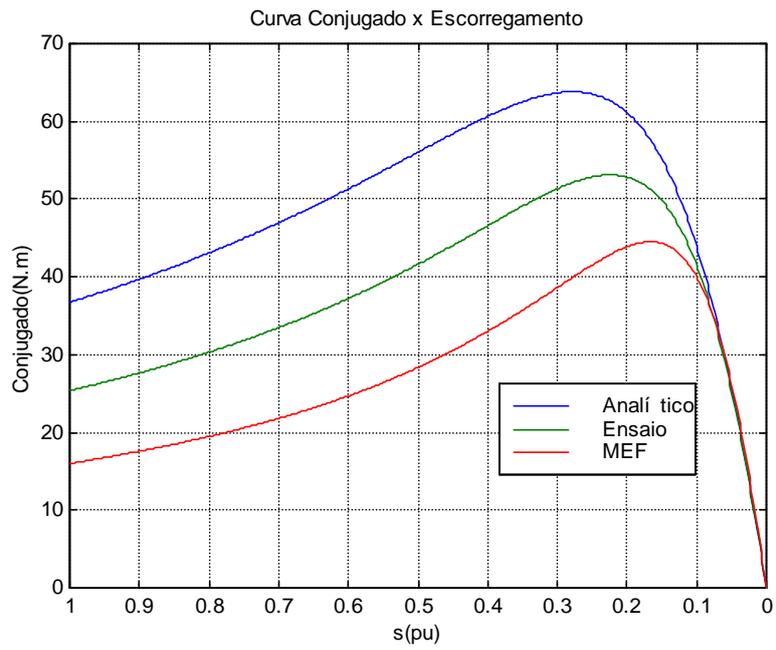


Figura V.5-1: Curva Conjugado x Escorregamento

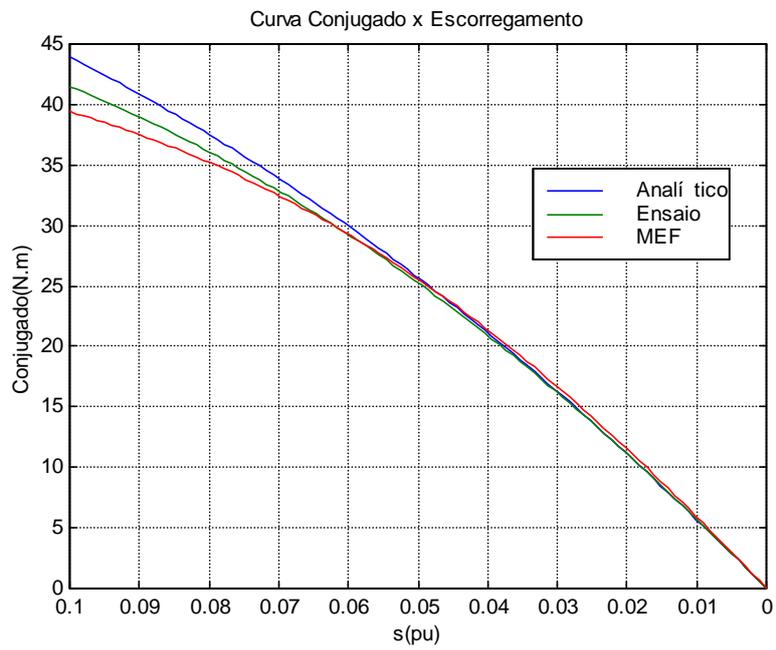


Figura V.5-2: Curva Conjugado x Escorregamento apenas na região normal de operação
($s_{nominal} = 0,039$)

Lembrando que este modelo determinado do motor representa a região de operação em regime permanente, a figura V.5-2 mostra que nesta região de operação os resultados são bastante convergentes.

Como a determinação da componente referente às perdas do núcleo não está consistente, a tabela V-8 apresenta a análise do desempenho do motor desconsiderando-se a parcela em questão, conforme [15,14].

Tabela V-8: Avaliação do desempenho energético do motor ignorando R_{fe}

Grandezas	MEF	Ensaio	Analítico
Perdas no estator (W)	238,15	247,76	236,78
Perdas no rotor (W)	158,45	150,75	152,20
Rendimento (%)	90,8	90,3	90,6
Conjugado (N.m)	21,55	20,51	20,70
Conjugado de partida (N.m)	16,02	25,42	36,79
Conjugado máximo (N.m)	44,52	53,24	63,93

V.6 Conclusões.

Os parâmetros obtidos para o circuito equivalente representam o motor de indução trifásico em regime permanente e foram considerados satisfatórios, excetuando a componente referente às perdas no ferro (R_{fe}).

Importante destacar a iteração entre as soluções harmônica e estática para representar com maior precisão o ensaio do motor com o rotor bloqueado devido à indução de corrente e, também, devido à saturação magnética. Esta saturação é devida às ranhuras do rotor serem do tipo fechadas e pode ser comprovada através do resultado do ensaio realizado no motor sob esta condição no Anexo 4.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho de tese cumpre seu papel, no sentido de apresentar uma metodologia através do uso do método dos elementos finitos para determinar os parâmetros do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico. Este circuito é correntemente utilizado por projetistas de motores, pois permite uma avaliação do desempenho do motor em regime permanente.

VI.1 Conclusões.

Um ponto forte deste trabalho, motivado em [3], é que os resultados dos parâmetros do motor obtidos pelo método dos elementos finitos são confrontados com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados no CEPEL e, também, com os resultados obtidos através de cálculos analíticos da metodologia clássica, escolhidos de forma criteriosa em [3].

Outro ponto que merece destaque neste trabalho refere-se ao fato de calcular a reatância de dispersão do estator através do ensaio com o rotor removido, pois na maioria dos estudos anteriores, considera-se relações estimadas entre as reatâncias de dispersão do estator e do rotor. Este ensaio de rotor removido é um diferencial entre os

estudos referentes à determinação dos parâmetros do circuito do motor através do método dos dois ensaios (vazio e rotor bloqueado). E ainda, vale mencionar o fato de levar em consideração o cálculo das perdas magnéticas no núcleo, pois alguns estudos desprezam a componente referente a estas perdas (R_{fe}). Entretanto, o valor obtido é divergente por não considerar as componentes de perdas de alta frequência.

Fica evidenciado o grande potencial da aplicação de elementos finitos para determinar os parâmetros do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico permitindo prever de maneira satisfatória, o desempenho do motor ainda em fase de projeto, possibilitando ajustes em dimensões e materiais, contribuindo como parte de uma otimização dos projetos dos motores.

VI.2 Sugestões.

Para validar o modelo apresentado neste trabalho, deve-se corrigir a componente referente às perdas no ferro. Para isso, sugere-se utilizar a técnica para cálculo das perdas no ferro através do método dos elementos finitos aplicada em [35,36], a qual apresentou resultados consistentes com valores obtidos em medições [36]. As componentes de perdas por correntes parasitas e por histerese são calculadas em função da densidade de fluxo magnético e da frequência utilizando dados relativos às perdas no ferro fornecidas pelos fabricantes (conforme curva de perdas magnéticas do Anexo 1). A simulação em elementos finitos através da análise estática é realizada e as componentes radiais e azimutais da densidade de fluxo são obtidas para cada elemento do ferro. Os cálculos de perdas no ferro são realizados efetuando-se a decomposição harmônica da densidade de fluxo para cada elemento de ferro da máquina através do uso de série de Fourier. O valor total da perda no ferro é dado pelo somatório dos

produtos entre as perdas por unidade de massa de cada elemento e a respectiva massa. Nesta análise são consideradas as perdas devido às altas frequências, incluindo as perdas no ferro do rotor.

Para os passos seguintes, sugere-se aplicar a técnica de elementos finitos em motores de indução trifásicos acionados por conversores de frequência e comparar com os resultados obtidos em ensaios e cálculos analíticos. O circuito equivalente monofásico para representar o conjunto motor e acionamento eletrônico é modificado [34] em relação ao circuito equivalente para representar apenas o motor utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PROCEL / ELETROBRÁS, *Relatório final do Projeto de Avaliação de Motores Trifásicos*. Rio de Janeiro, RJ, 1989.
- [2] NBR 7094, *Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução – Especificação*. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.
- [3] SOARES, G. A., *Nova Técnica de Projeto de Motores de Indução e sua Consolidação Prática*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- [4] KUHLMANN, J. H., *Design of Electrical Apparatus*. Chapman & Hall, New York, 1940.
- [5] SAY, M. G., *Alternating Current Machines*. Pitman Publishing Limited, 1978.
- [6] NBR 5383 - Parte 1, *Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos – Ensaíos*. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.
- [7] CHAPMAN, S. J., *Electric Machinery Fundamentals, 2nd edition*. McGraw-Hill, 1991.
- [8] ALGER, P. L., *The Nature of Polyphase Induction Machines*. John Wiley & Sons, 1951.
- [9] VEINOTT, C. G., *Theory and Design of Small Induction Motors*. Mc Graw-Hill, 1991.
- [10] EPRI, *Optimization of Induction Motor Efficiency*. Project EPRI EL-4152-CCM, Vol. 1, University of Colorado, 1985.

- [11] LIWSCHITZ - GARIK, M., WHIPPLE, C. C., *Electrical Machinery: Volume 2 – AC Machines*. D. Van Nostrand, 1946.
- [12] MELLO, A. J. de C., *Ensaio de Resposta em Freqüência em Motores de Indução*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- [13] WILLIAMSON, S., “Induction Motor Modelling Using Finite Elements”. Cambridge University Engineering Department, RGE – N° 8, September, 1994.
- [14] KREUTZFELD, S., *Cálculo dos Parâmetros do Circuito Equivalente da Máquina de Indução pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica / UFSC , Santa Catarina, SC, Brasil, 2001.
- [15] BELMANS, R., FINDLAY, R. D., GEYSEN, W., “A Circuit Approach to Finite Element Analysis of a Double Squirrel Cage Induction Motor”. *IEEE Transactions on Energy Conservation*, Vol. 5, N° 4, pp. 719-724, December 1990.
- [16] De WEERDT, R., TUINMAN, E., et al., “Finite Element Analysis of Steady State Behavior of Squirrel Cage Induction Motors Compared with Measurements”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, N° 2, pp. 2093-2096, March 1997.
- [17] HONSINGER, V. B., “Sizing Equations for Electrical Machinery”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 2, N° 1, pp. 116-121, March 1997.
- [18] ITO, M., et al., “Analytical Model for Magnetic Field Analysis of Induction Motor Performance”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. 100, N° 11, pp. 4582-4590, November 1981.
- [19] BRULE, S., TOUNZI, A., PIRIOU, F., “Comparison of Induction Machine Park’s Models Using Parameters Issue from FEM and from Experimental Tests”. In:

- International Conference on Electrical Machines*, Vol. 1, pp. 308-313, Istanbul, Turkey, September 1998.
- [20] WILLIAMSON, S., RALPH, J. W., “Finite – Element Analysis of an Induction Motor Fed from a Constant – Voltage Source”. *IEE Proceedings*, Vol. 130, N° 1, pp. 18-24, January 1983.
- [21] DZIWNIEL, P., et al., “A Time – Stepped 2D – 3D Finite Element Method for Induction Motors with Skewed Slot Modeling”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, N° 3, pp. 1262-1265, May 1999.
- [22] ROBINSON, M. J., *Finite Element Calculation of Equivalent Circuit Parameters for Induction Motors*. Thesis of PhD in the Faculty of Engineering University of London, 1988.
- [23] WILLIAMSON, S., ROBINSON, M. J., “Calculation of Cage Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Using Finite Elements”. *IEE Proceedings B*, Vol. 138, N° 5, pp. 264-276, September 1991.
- [24] WILLIAMSON, S., LIM, L. H., ROBINSON, M. J., “Finite Element Models for Cage Induction Motor Analysis”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 26, N° 6, pp. 1007-1017, November/December 1990.
- [25] WILLIAMSON, S., BEGG, M. C., “Calculation of the Bar Resistance and Leakage Reactance of Cage Rotors with Closet Slots”. *IEE Proceedings*, Vol. 132, N° 3, pp. 125-132, May 1985.
- [26] WILLIAMSON, S., BEGG, M. C., “Calculation of the Resistance of Induction Motor End Rings”. *IEE Proceedings*, Vol. 133, Part B, N° 2, pp. 54-60, March 1986.

- [27] CHIRICOZZI, E., DI NAPOLI, A., “Time Analysis of Leakage Flux of a Slot-Bar and Computation of Equivalent Network Parameters”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 13, N^o 5, pp. 1131-1133, September 1977.
- [28] SALON, S. J., PALMA, R., HWANG, C. C., “Dynamic Modelling of an Induction Motor Connected to an Adjustable Speed Drive”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, N^o 4, pp. 3061-3063, July 1989.
- [29] YAMAZAKI, K., “Comparison of Induction Motor Characteristics Calculated from Electromagnetic Field and Equivalent Circuit Determined by 3D FEM”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, N^o 4, pp. 1881-1885, July 2000.
- [30] DEMERDASH, N. A. , BALDASSARI, p., “A Combined Finite Element – State Space Modeling Environment for Induction Motor in the ABC Frame of Reference: The No – Load Conditions”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, N^o 4, pp. 710-720, December 1992.
- [31] CHABU, I. E., CARDOSO, J. R., “Projeto de Motores Elétricos pelo Método dos Elementos Finitos: Comparação Analítica / Numérica / Experimental”. *Publicação da Escola Politécnica da USP*, Departamento de Energia e Automação Elétricas. USP/SP, pp.83-99, 1991.
- [32] SALON, S. J., *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Kluwer Academic Publishers, New York, 1995.
- [33] BESSA, M. F., *Cálculo de Forças em Mancais Magnéticos através do Mapeamento de Campo por Elementos Finitos*. Tese de M.Sc., PGMEC/UFF, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.

- [34] ENGELMANN, R. H., MIDDENDORF, W. H., *Handbook of Electric Motors*. Marcel Dekker, Inc., 1995.
- [35] SOTELO, G. G., *Armazenador Cinético de Energia Utilizando Máquinas de Relutância Variável*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [36] ATALLAH, K., ZHU, Z., HOWE, H., “The Prediction of Iron Losses in Brushless Permanent Magnet D.C. Motor”. *International Conference on Electrical Machines*, pp. 814-818, 1992.

ANEXO 1

PROPRIEDADES DA GEOMETRIA DE DOS MATERIAIS DO MOTOR

Este anexo resume informações da geometria e do aço silício utilizado no motor. Em relação ao aço silício, apresenta as curvas de magnetização, permeabilidade e perdas magnéticas, bem como a sua representação matemática.

1.1. Características Geométricas do Motor.

Nesta seção são apresentadas as dimensões envolvidas tanto do estator quanto do rotor adquiridas com o fabricante do motor.

1.1.1. Estator.

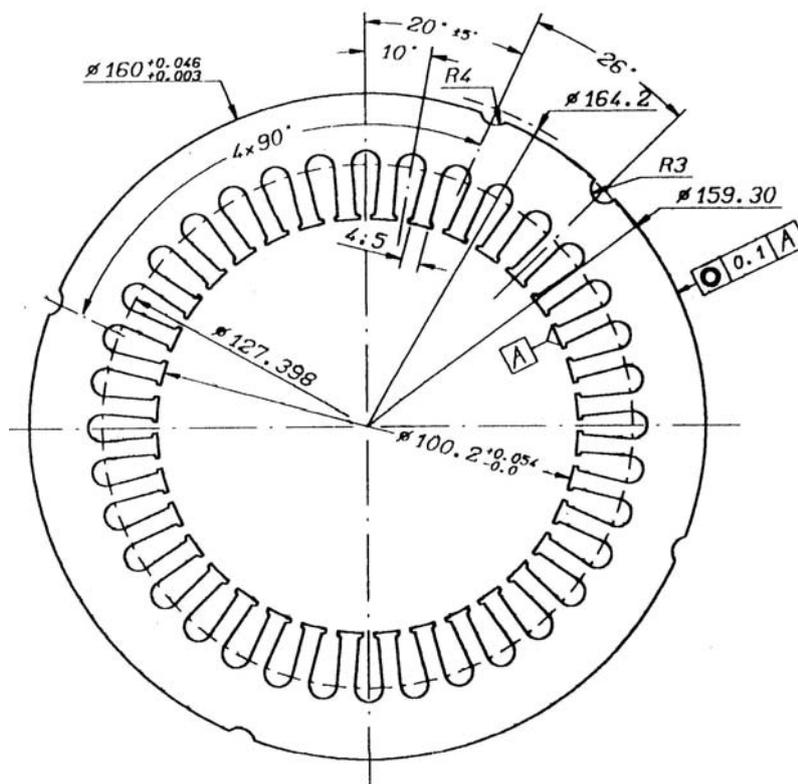


Figura 1.1-1: Dados da geometria da chapa do estator.

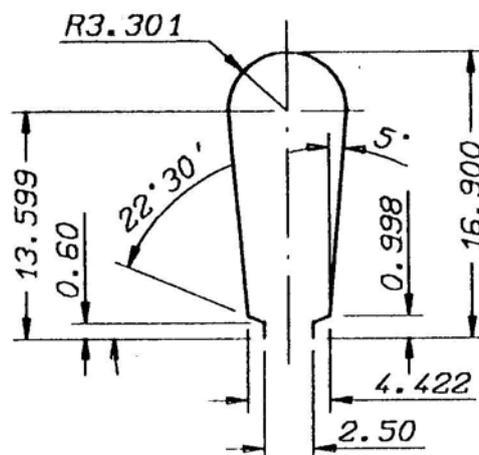


Figura 1.1-2: Detalhe na geometria da ranhura do estator.

1.1.2. Rotor.

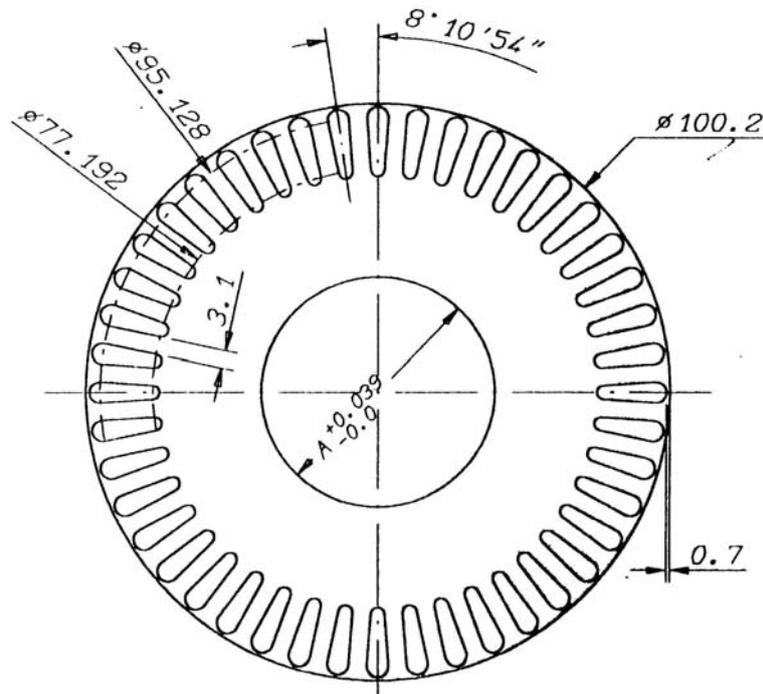


Figura 1.1-3: Dados da geometria da chapa do rotor.

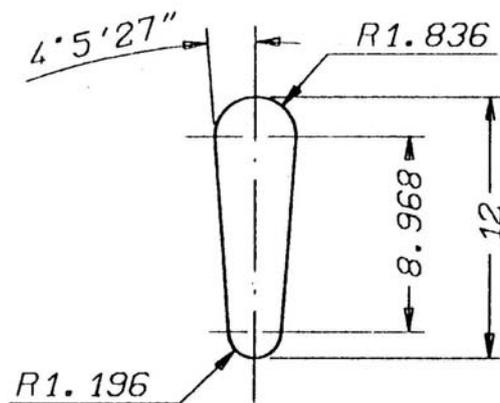


Figura 1.1-4: Detalhe na geometria da ranhura do estator.

1.1.3. Complementares.

Para complementar as informações são fornecidas os seguintes dados do motor:

- área da ranhura do estator: $89,8 \text{ mm}^2$;
- área da ranhura do rotor: $34,8 \text{ mm}^2$;
- diâmetro do condutor do enrolamento: 0,95;
- espiras de 2 fios condutores.

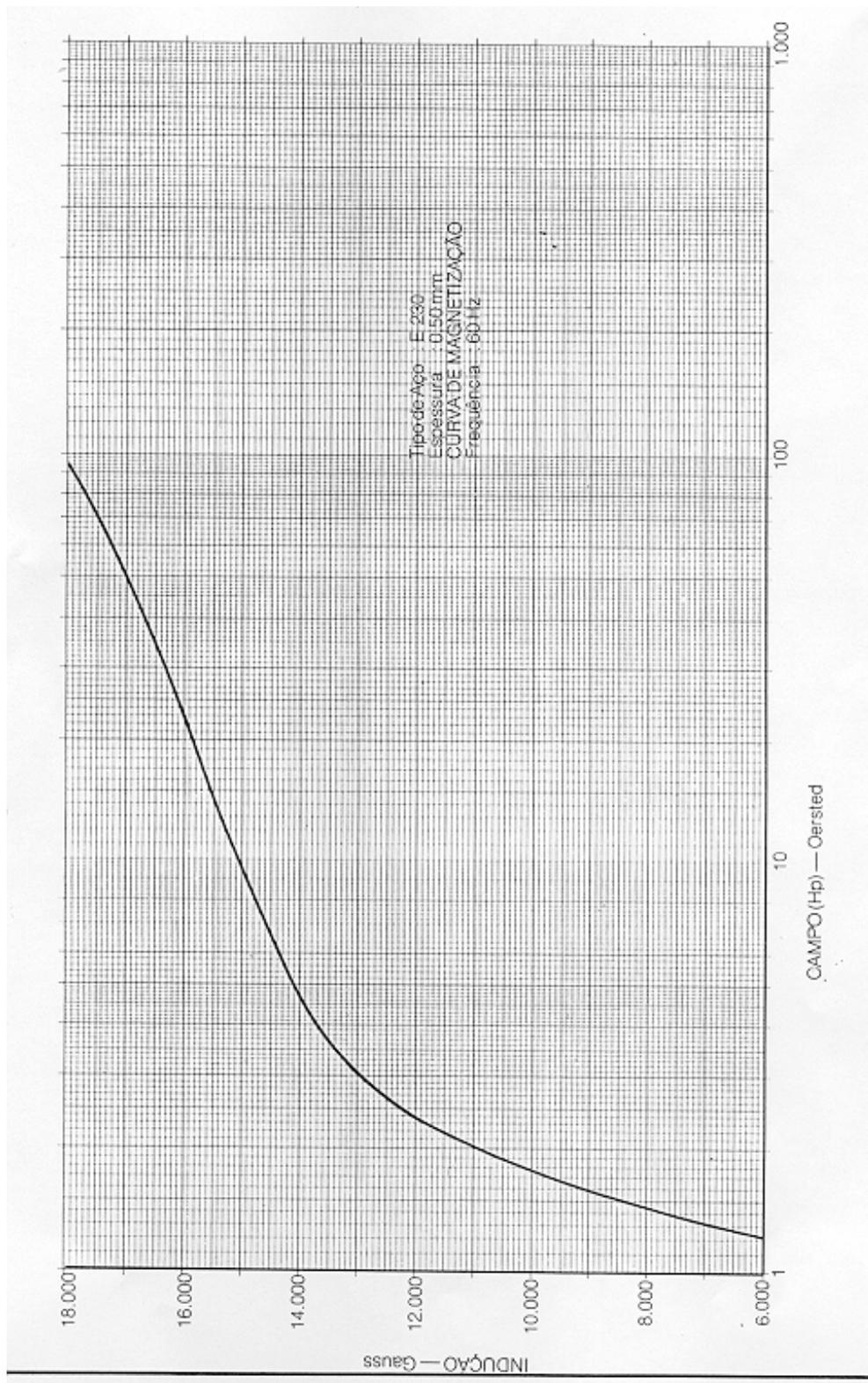
1.2 Curvas do Aço Silício E - 230 - Acesita.

Figura 1.3-1: Curva de magnetização

Tabela 1.2-1: Pontos obtidos da Curva de magnetização

B (Wb/m ²)	H (oersted)	H (A.esp/m)
0,6	1,22	96,83
0,8	1,45	115,08
1,0	1,76	139,68
1,2	2,36	187,3
1,3	3,05	242,06
1,4	4,7	373,02
1,5	9,6	761,90
1,6	23	1.825,4
1,7	50	3.968,25
1,8	95	7.539,68

Nota 1: 1 Wb/m² = 1 tesla = 10.000 gauss.

Nota 2: 1 A.esp/m = 0,0126 oersted.

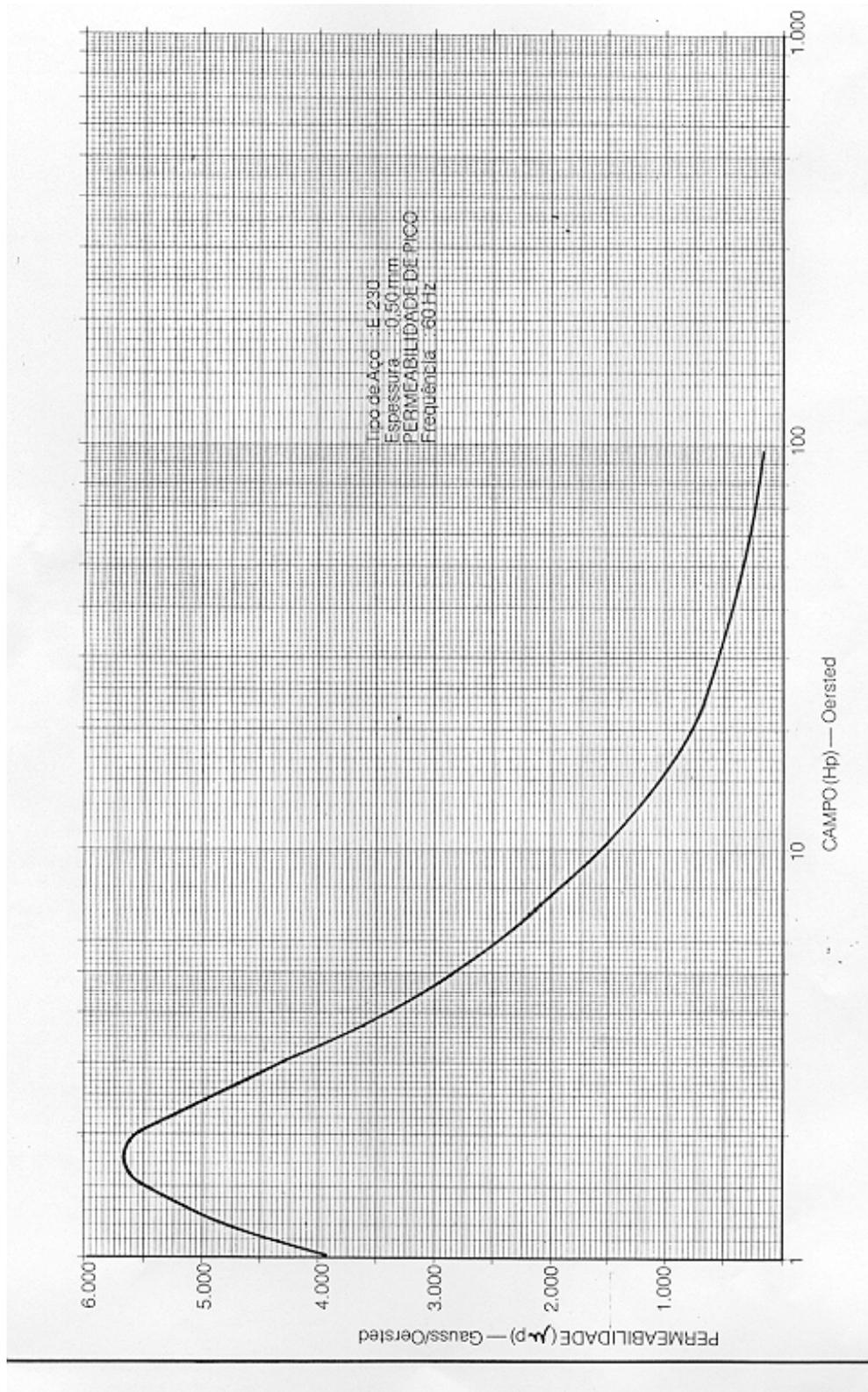


Figura 1.3-2: Curva de permeabilidade.

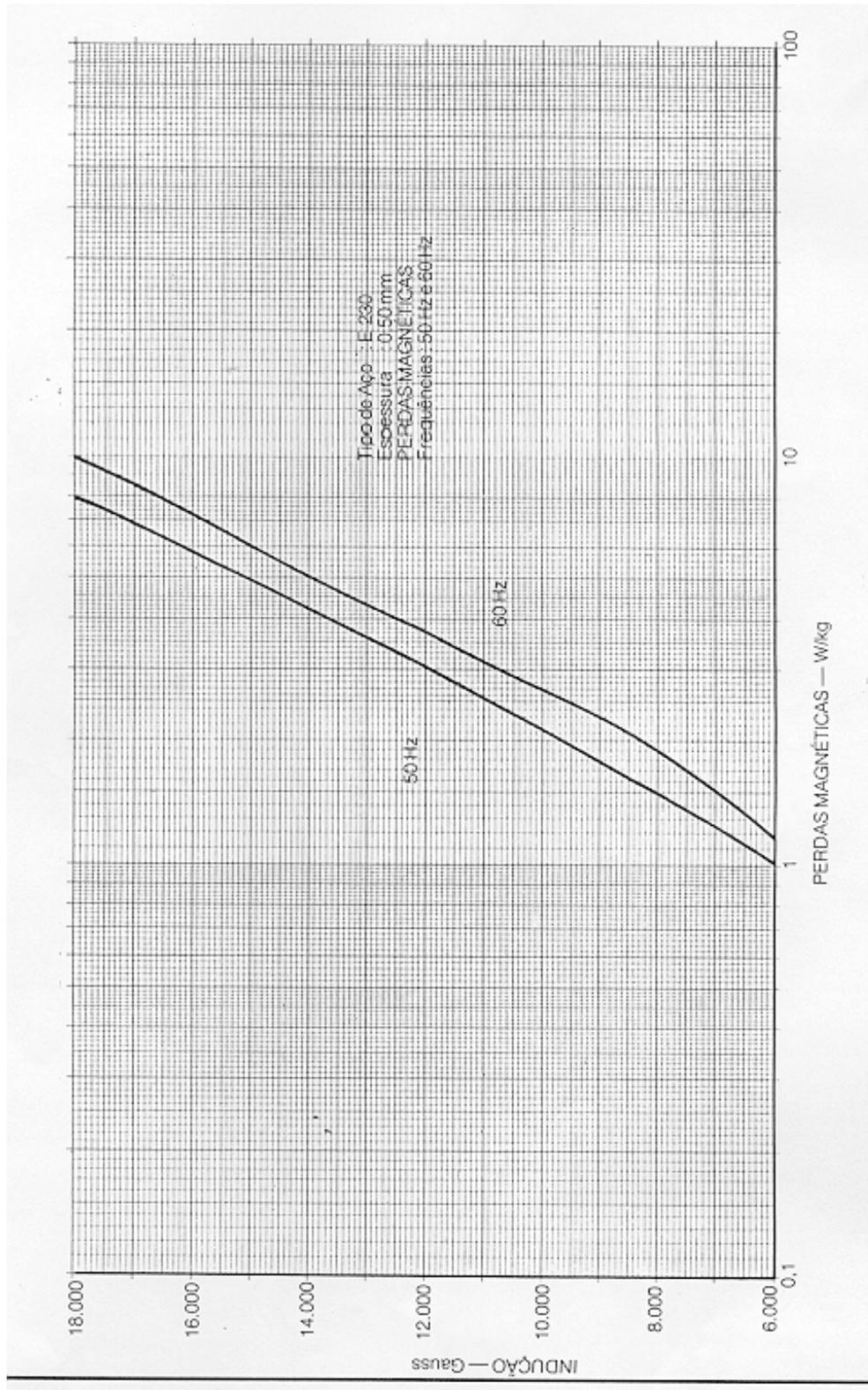


Figura 1.3-3: Curva de perdas.

Representação matemática da curva de perdas magnéticas à frequência de 60 Hz

Programa MATHCAD (0,6T a 1,8T):

$$\text{Perdas}(B_{[0,6-1,8]}) = -3,737 + 13,292 \cdot B - 11,396 \cdot B^2 + 4,56 \cdot B^3$$

O erro médio é -0,036 % com desvio padrão de 1,73%.

Vale ressaltar que a representação matemática acima se refere à faixa de densidade de fluxo magnético de 0,6T a 1,8T. Foi verificada a necessidade de ajustar uma nova equação matemática para representar mais precisamente à faixa de 0T a 0,6T, conforme observado na figura 1.3-4. Para esta faixa de densidade de fluxo magnético a representação matemática é dada pelo polinômio ajustado após interpolação com *cubic spline*, dada por:

$$\text{Perdas}(B_{[0-0,6]}) = -0,6626 \cdot B - 0,1306 \cdot B^2$$

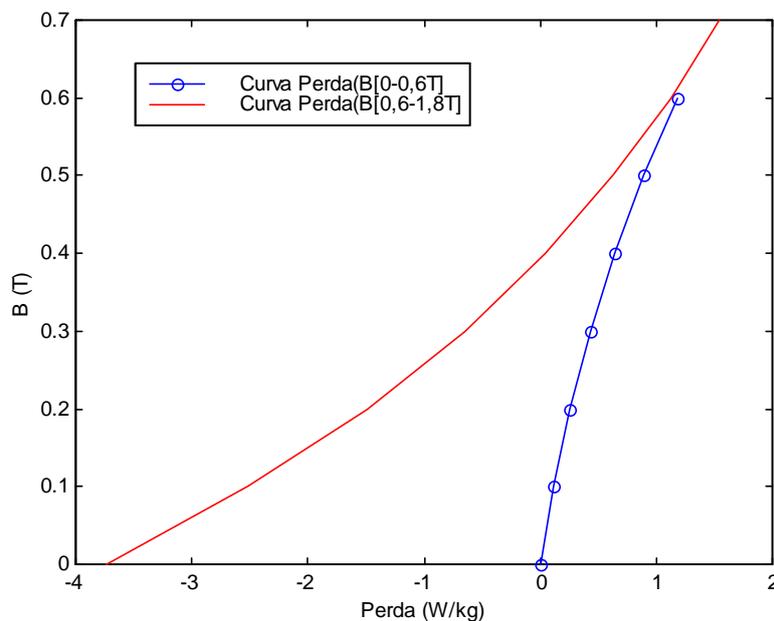


Figura 1.3-4: Comparação entre as curvas de perdas magnéticas ajustadas por representações matemáticas aplicadas à faixa de 0T a 0,6T.

ANEXO 2

VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DE X_1 COM O ROTOR REMOVIDO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este anexo apresenta o estudo para determinação da reatância de dispersão do estator através da técnica de elementos finitos aplicado ao motor com o rotor removido. Sua validação é feita comparando o resultado com uma metodologia de cálculo analítico. Este estudo foi realizado durante a disciplina COE 894 – Elementos Finitos Aplicados às Máquinas Elétricas no presente curso de mestrado em engenharia elétrica da COPPE/UFRJ ministrado pelos professores Alquindar S. Pedroso e Antônio C. Ferreira. Os autores do trabalho são Luciano Moraes de Souza e Reinaldo Shindo.

CÁLCULO DE INDUTÂNCIA UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS.

Introdução:

A aplicação do método de elementos finitos (MEF) às máquinas elétricas tem por objetivos principais as determinações dos parâmetros dos circuitos equivalentes correspondentes, das características de desempenho e das forças eletromagnéticas.

O MEF é um método de solução numérica de equações diferenciais de campo magnético expressa através do potencial vetor magnético (\vec{A}).

Na aplicação às máquinas elétricas considera-se que o comprimento da mesma predomina sobre as demais dimensões, permitindo-se o cálculo da distribuição de densidade de fluxo em um plano bidimensional, ou seja, 2D. Neste estudo, considera-se que não há correntes induzidas, ou seja, caso magnetostático.

$$\frac{\partial}{\partial x} v \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v \frac{\partial A}{\partial y} = -J_s$$

O objetivo do trabalho consiste em calcular a indutância por fase de um motor de indução trifásico de 5 cv, 2 pólos, com o rotor removido através do MEF e comparar este resultado com o valor calculado analiticamente pelo método proposto pelo professor Alquindar Pedroso.

Desenvolvimento:

O programa utilizado foi o ANSYS ED 5.2 . Esta versão de avaliação possui limites de 500 nós e 250 elementos.

O programa é composto de 3 etapas:

- Pré – processador

No pré - processamento constrói - se o modelo através da entrada de dados de sua geometria; estabelece a propriedade dos materiais; associa - se os materiais à sua geometria e gera - se a malha.

- Processador

No processamento aplica - se cargas e condições de contorno, em seguida, resolve - se o sistema de equações e obtém - se o potencial vetor nos nós dos elementos da malha gerada.

- Pós - processador

No pós - processamento calculada - se as grandezas derivadas do potencial vetor e faz - se a análise dos resultados.

Para construção do modelo os seguintes dados foram fornecidos:

- Motor de indução trifásico, 5 cv, 220 V ligado em Δ ;
- 2 pólos;
- 24 ranhuras;
- 30 condutores por ranhura;
- Comprimento do estator de 10 cm;
- Raio interno do estator de 2,55 cm.

Adotou-se que o ferro possui permeabilidade relativa infinita (o programa limita em 10^8), ou seja, não há saturação (caso linear) e o raio externo do estator de 3,55 cm. E ainda, a ranhura é feita a partir de um anel cujo raio interno é igual ao raio interno do estator e o raio externo é de 2,65 cm. Como o passo angular é de 15° adotou-se que o anel da ranhura possui largura de 3° .

De acordo com os limites do programa mencionados anteriormente, foram criados anéis nas áreas, tanto no ferro como do ar (rotor removido) para que fosse possível refinar a malha nas regiões de maior necessidade e deixar menos refina as regiões menos desejadas.

A escolha das regiões de maior interesse foi de acordo com a maior concentração das linhas de fluxo, ou seja, em torno dos condutores.

Devido as limitações do programa a maior dificuldade encontrada nesta etapa foi gerar uma malha com uma qualidade de refinamento satisfatória. A definição do tipo de elemento como Plano 13 é devido ao número de nós ser muito menor que o Plano 53, apesar do Plano 53 ser um elemento de ordem superior, o que permitiu um refinamento melhor da malha.

Como o motor é de dois pólos, o posicionamento das ranhuras por fase foi escolhido de forma a se obter simetria com um dos eixos (eixo "x"). Desta forma as de fluxo geradas

a partir da injeção de corrente nos condutores da fase são perpendiculares ao eixo de simetria e paralelas ao eixo "y" e ao contorno do estator, que corresponde as condições de fronteira Neumann (linhas perpendiculares) e Dirichlet (linhas paralelas), conforme mostrado na figura 1.

A seguir é mostrada a divisão em segmentos das linhas que compõem a geometria do modelo para confecção da malha refinada (final) utilizada para solução do problema.

Tabela 1 – Divisão dos segmentos associados à geometria

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
2	2	3	9	5	6	3	16	16	3	2

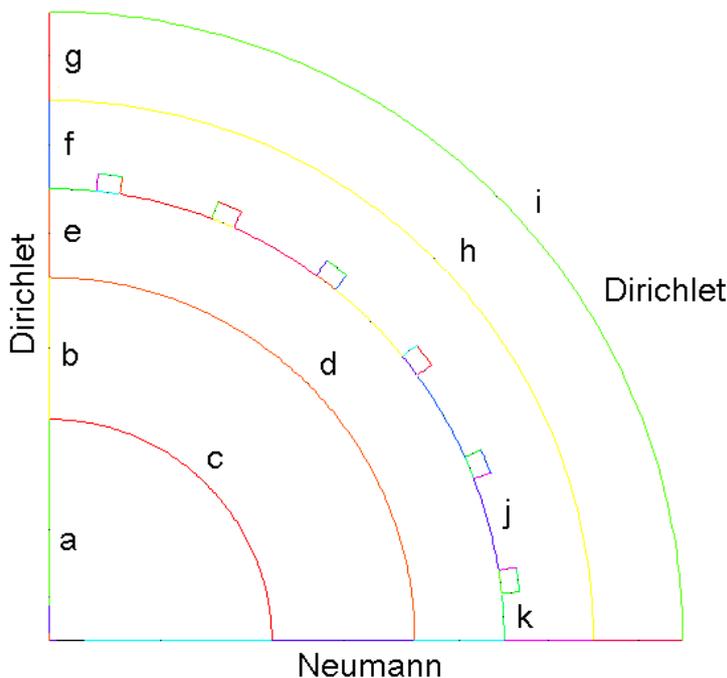


Figura 1 - Identificação dos segmentos e das condições de contorno

Na etapa do processamento é necessário aplicar a carga, neste caso, é dada pela densidade de corrente (J). Como o caso em estudo é linear, o cálculo da indutância independe da corrente, mas optou-se por aplicar uma densidade de corrente real para o motor em estudo.

$$J = \frac{I}{A}$$

Onde:

I = corrente do motor utilizado, em vazio, seu valor é de 7,25 A.

A área da ranhura do condutor corresponde a área de um anel e é dada da seguinte forma:

$$A = (\pi \cdot r_1^2 - \pi \cdot r_2^2) \cdot \frac{3^\circ}{360^\circ} = 1,228 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Onde:

r_1 = raio externo da ranhura;

r_2 = raio interno da ranhura, ou seja, raio interno do estator.

Logo a densidade de corrente utilizada é de $5,9 \times 10^6 \text{ A/m}^2$.

Uma das formas de executar o programa é através de uma listagem de comando com extensão .log . Esta listagem está comentada e será mostrada a seguir:

!Indução.log

```
/BATCH
/COM,ANSYS REVISION 5.2      UP020996      09:24:06      09/22/1999
/TITLE,motor de inducao
/FILNAM,inducao
SAVE,inducao,db,..\
!*
KEYW,PR_SET,1                !Define tipo de análise
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_ELMAG,1              !Eletromagnetismo
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/PMETH,OFF
!*
/PREP7                        !Pré-processamento
                                !Construção do modelo
                                !Cria áreas por anéis
CYL4,0,0,0,0,0,0.0125,90
CYL4,0,0,0,0,0,0.0205,90
CYL4,0,0,0,0,0,0.0255,90
CYL4,0,0,0,0,0,0.0305,90
CYL4,0,0,0,0,0,0.0355,90
CYL4,0,0,0.0255,6,0.0265,9
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
AOVLAP,P51X                  !Faz a interseção das áreas

CSYS,1                        !Troca de coordenadas cartesianas para
                                cilíndricas
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,9
AGEN,6,P51X, , , ,15, , ,0  !Copia a ranhura com espessamento de 15°
                                (passo angular da ranhura)

FLST,2,11,5,ORDE,2
```

```

FITEM,2,1
FITEM,2,-11
AOVLAP,P51X                                !Faz nova interseção das áreas

NUMCMP,AREA                                !Comprime as áreas criadas
NUMCMP,LINE                                !Comprime as linhas criadas
NUMCMP,KP                                  !Comprime as pontos criados

/PNUM,KP,0                                  !Define a visualização por áreas
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT

ET,1,PLANE13                                !Configuração dos parâmetros
ESIZE,0.0025,0                             !Define tipo de elemento
MOPT,EXPND,1,
MOPT,TRANS,2,
MOPT,IESZ,0,

!Especificação das propriedades dos
materiais
UIMP,1,EX, , , ,
UIMP,1,DENS, , , ,
UIMP,1,ALPX, , , ,
UIMP,1,REFT, , , ,
UIMP,1,NUXY, , , 0.3,
UIMP,1,GXY, , , ,
UIMP,1,MU, , , ,
UIMP,1,DAMP, , , ,
UIMP,1,KXX, , , ,
UIMP,1,C, , , ,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , , 1,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,MURX, , , 1,
1
UIMP,1,MGXX, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,

UIMP,2,EX, , , ,
UIMP,2,DENS, , , ,
UIMP,2,ALPX, , , ,
UIMP,2,REFT, , , ,
UIMP,2,NUXY, , , 0.3,
UIMP,2,GXY, , , ,
UIMP,2,MU, , , ,
UIMP,2,DAMP, , , ,
UIMP,2,KXX, , , ,
UIMP,2,C, , , ,
UIMP,2,ENTH, , , ,
UIMP,2,HF, , , ,
UIMP,2,EMIS, , , 1,

```

!Define permeabilidade relativa igual a

```
UIMP,2,QRATE, , , ,
UIMP,2,MURX, , ,1,      !Define permeabilidade relativa igual a
1
UIMP,2,MGXX, , , ,
UIMP,2,RSVX, , , ,
UIMP,2,PERX, , , ,
UIMP,2,VISC, , , ,
UIMP,2,SONC, , , ,

UIMP,3,EX, , , ,
UIMP,3,DENS, , , ,
UIMP,3,ALPX, , , ,
UIMP,3,REFT, , , ,
UIMP,3,NUXY, , ,0.3,
UIMP,3,GXY, , , ,
UIMP,3,MU, , , ,
UIMP,3,DAMP, , , ,
UIMP,3,KXX, , , ,
UIMP,3,C, , , ,
UIMP,3,ENTH, , , ,
UIMP,3,HF, , , ,
UIMP,3,EMIS, , ,1,
UIMP,3,QRATE, , , ,
UIMP,3,MURX, , ,1,      !Define permeabilidade relativa igual a
1
UIMP,3,MGXX, , , ,
UIMP,3,RSVX, , , ,
UIMP,3,PERX, , , ,
UIMP,3,VISC, , , ,
UIMP,3,SONC, , , ,

UIMP,4,EX, , , ,
UIMP,4,DENS, , , ,
UIMP,4,ALPX, , , ,
UIMP,4,REFT, , , ,
UIMP,4,NUXY, , ,0.3,
UIMP,4,GXY, , , ,
UIMP,4,MU, , , ,
UIMP,4,DAMP, , , ,
UIMP,4,KXX, , , ,
UIMP,4,C, , , ,
UIMP,4,ENTH, , , ,
UIMP,4,HF, , , ,
UIMP,4,EMIS, , ,1,
UIMP,4,QRATE, , , ,
UIMP,4,MURX, , ,100000000, !Define permeabilidade relativa igual a
108
UIMP,4,MGXX, , , ,
UIMP,4,RSVX, , , ,
UIMP,4,PERX, , , ,
UIMP,4,VISC, , , ,
UIMP,4,SONC, , , ,

!Atribuição das propriedades dos
materiais às áreas selecionadas
!Visualização por linhas

LPLOT
FLST,5,3,5,ORDE,3
FITEM,5,1
FITEM,5,7
FITEM,5,10
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
```

```
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,1,1,1,0,          !Define as propriedades do material 1
para
CMSEL,S,_Y            as áreas selecionadas (ar)
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*

FLST,5,4,5,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,-6
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,2,1,1,0,          !Define as propriedades do material 2
para
CMSEL,S,_Y            as áreas selecionadas (ranhura com
condutor sem
CMDELE,_Y             corrente aplicada)
CMDELE,_Y1
!*

FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,9
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,3,1,1,0,          !Define as propriedades do material 3
para
CMSEL,S,_Y            as áreas selecionadas (ranhura com
condutor com
CMDELE,_Y             corrente aplicada)
CMDELE,_Y1
!*

FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,8
FITEM,5,11
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,1,1,0,          !Define as propriedades do material 4
para
CMSEL,S,_Y            as áreas selecionadas (ferro)
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*

/PNUM,KP,0             !Define a visualização por áreas
```

```
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,MAT,0
/REPLOT
!*
APLOT
LPLOT                                !Visualização por linhas

                                !Divisão das linhas em segmentos para criação
                                da malha
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,-3
LESIZE,P51X, , ,2,1,                !Divide a linha "a" em 2 segmentos

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,20
FITEM,2,-21
LESIZE,P51X, , ,2,1,                !Divide a linha "b" em 2 segmentos

FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
LESIZE,P51X, , ,3,1,                !Divide a linha "c" em 3 segmentos

FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,4
LESIZE,P51X, , ,9,1,                !Divide a linha "d" em 9 segmentos

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,25
FITEM,2,-26
LESIZE,P51X, , ,5,1,                !Divide a linha "e" em 5 segmentos

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,28
FITEM,2,-29
LESIZE,P51X, , ,6,1,                !Divide a linha "f" em 6 segmentos

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,22
FITEM,2,-23
LESIZE,P51X, , ,3,1,                !Divide a linha "g" em 2 segmentos

FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,10
LESIZE,P51X, , ,16,1,               !Divide a linha "h" em 16 segmentos

FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,13
LESIZE,P51X, , ,16,1,               !Divide a linha "i" em 16 segmentos

FLST,2,5,4,ORDE,3
FITEM,2,40
FITEM,2,42
FITEM,2,-45
LESIZE,P51X, , ,3,1,                !Divide a linha "j" em 3 segmentos
```

```

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,27
FITEM,2,41
LESIZE,P51X, , ,2,1,          !Divide a linha "k" em 2 segmentos

FLST,2,11,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-11
AMESH,P51X                    !Cria a malha

/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,MAT,1                    !Define a visualização das áreas por
propriedades                  dos materiais
/REPLOT                          !Visualização dos elementos da malha
criada
EPLLOT                          !Processamento

/SOLU
FINISH
/SOLU
FLST,2,2,2,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,85
BFE,P51X,JS,1, , ,5900000, , !Aplica densidade de corrente (J) nos
condutores                    selecionados

FLST,2,6,4
FITEM,2,13
FITEM,2,23
FITEM,2,29
FITEM,2,26
FITEM,2,21
FITEM,2,2
DL,P51X, ,ASYM                !Define as condições de contorno

/STAT,SOLU
SOLVE

/POST1                          !Pós - processamento
FINISH
/POST1
SRCS,120, , ,1,              !Cálculo da indutância

```

Observa-se que o cálculo da indutância é realizado através do comando srcs, o qual é uma função macro do programa. Para fins de identificação do método utilizado pelo programa para cálculo da indutância é mostrado parte desta macro:

```

ETABLE,_VOLU,VOLU              ! store volume
ETABLE,_AC,A,Z                 ! store average centroidal vector potential

```

```

ETABLE,_JSE,SMISC,1                                ! store source current density
_PI=4*ATAN(1)
*IF,_dimn,eq,2,THEN                                ! planar case
  ETABLE,_AREA,VOLU
  SMULT,_AMPS,_JSE,_AREA
/out,scratch
SSUM
/out
*GET,_TOTI,SSUM,,ITEM,_AMPS                        ! total "element" current
_TOTI=_TOTI*ARG4                                    ! multiply by planar symmetry factor
_N=ARG1                                              ! number of turns
IWIND=_TOTI/_N                                       ! current per turn
T_PI=2*_PI                                           ! 2 * _PI
_OM=ARG3                                             ! frequency in hertz
_OMR=_OM*T_PI                                       ! frequency in rad/sec
SMULT,_W,_AC,_JSE,.5
SMULT,_W,_W,_VOLU                                   ! Energy = 0.5*Ac*Jse*Volume
/out,scratch
SSUM
/out
*GET,WIN,SSUM,,ITEM,_W                             ! get input energy as a paramter
WIN=WIN*ARG4                                        ! multiply by planar symmetry factor
INDL=((WIN*2.)/(IWIND*IWIND))                       ! compute inductance

```

Pode-se observar que o método utilizado pelo programa para calcular a indutância é o método através da energia no campo magnético. Para o caso linear a energia é dada por:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \int_v B \cdot H \cdot dV$$

Onde a energia é calculada da seguinte forma:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \int_v (\nabla \times A) \cdot H \cdot dV$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \int_v J \cdot A \cdot dV$$

Como a corrente é uniformemente distribuída sobre a área do condutor, o potencial vetor pode ser tomado como potencial vetor médio sobre a área.

$$A_{médio} = \frac{1}{S} \iint_s A \cdot dS$$

Logo, a indutância vista nos terminais do enrolamento é calculada da seguinte maneira:

$$L = \frac{2 \cdot W}{I^2}$$

É importante ressaltar que este método utilizado pelo programa corresponde ao cálculo da indutância pelo método através da energia apresentado no livro texto [32].

Resultados obtidos do Ansys:

A figura 2 mostra a distribuição da densidade de fluxo magnético, o qual podemos notar que é mais intenso em torno dos condutores carregados e de baixa intensidade nas regiões onde as linhas de fluxo são menos concentradas, conforme a figura 3.

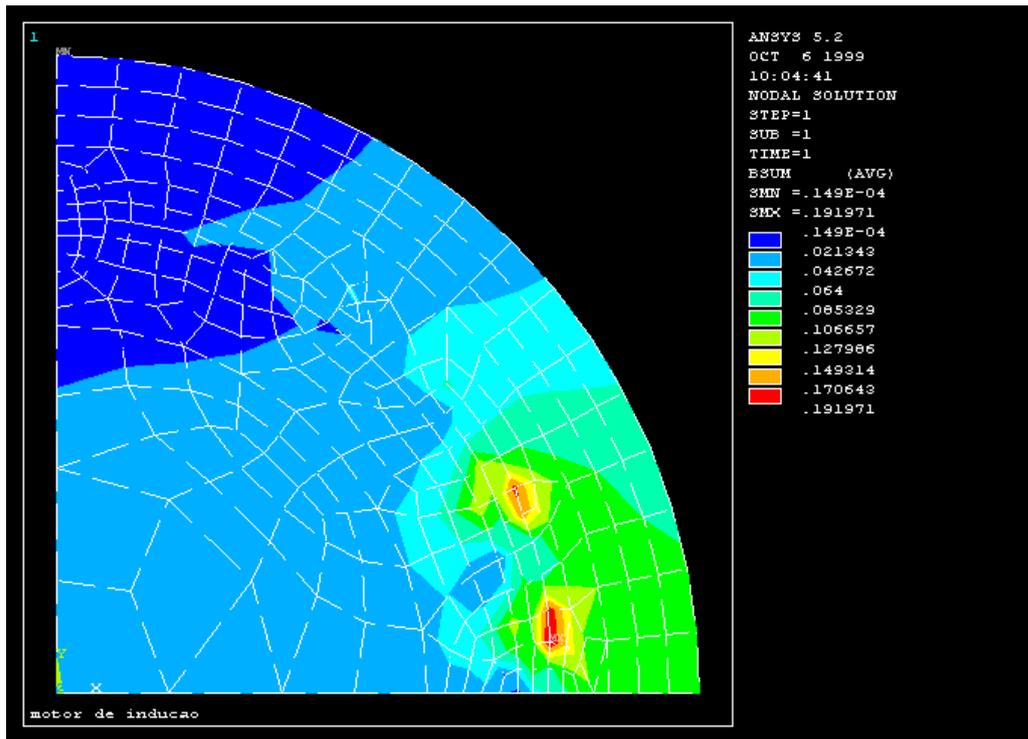


Figura 2 - Densidade de fluxo (B)

A figura 3 mostra as linhas de fluxo, onde podemos notar uma intensa concentração em torno dos condutores e uma baixa concentração distantes dos mesmos, conforme observado anteriormente. Nota-se também que algumas linhas se fecham em torno dos condutores, enquanto as demais atravessam a fronteira Neumann como esperado.

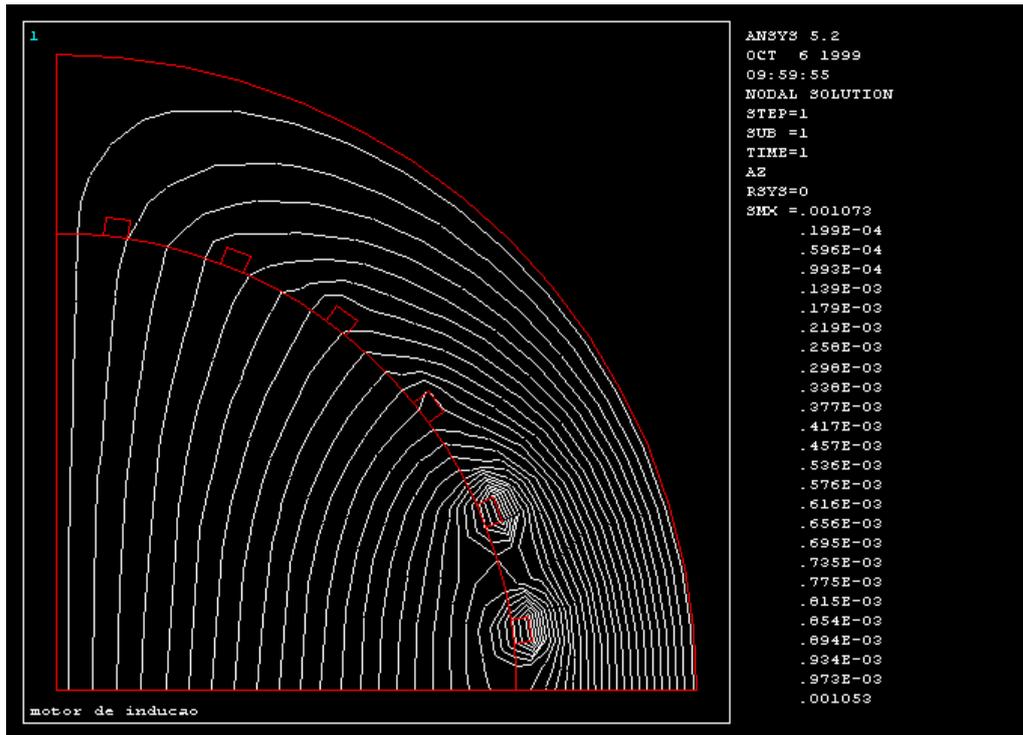


Figura 3 - Linhas de fluxo

A figura 4 mostra a distribuição dos elementos obtidos através da malha definida pela tabela de divisão dos segmentos associada a geometria, visto anteriormente.

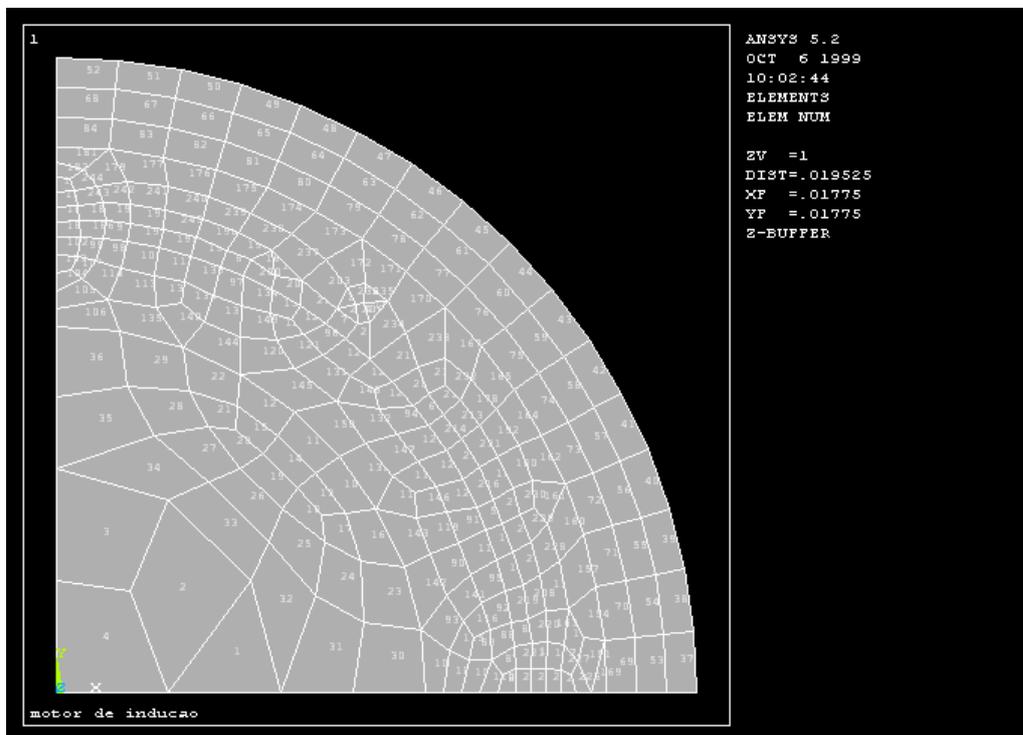


Figura 4 - Elementos da malha

A figura 5 mostra o quadro de resultados obtidos pelo Ansys através dos cálculos da função macro scrs. Esta função macro, além de calcular a indutância desejada, calcula também a energia de entrada, a corrente por espira e o fluxo enlaçado.

```

_____ Calculated coil terminal parameters _____
Planar symmetry factor = 1, Circumferential symmetry factor = 1.
Energy: Joules/m, Winding Inductance: Henries/m, VLTG: volts/m,
Current per turn: Amps, Flux linkage: Webers/m, Frequency: Hertz.

Energy input= .231149742, Winding inductance= 2.869011926E-02.
Current per turn= 4.01416784, Flux linkages= 9.597246182E-04.

Parameters defined for the coil: WIN (energy input), INDL (Winding
inductance), IWIND (Current per turn), FLNK (Flux linkage),
VLTG (Terminal voltage)
    
```

Figura 5 - Quadro de resultados

A figura 6 mostra um quadro resumo das informações do modelo, onde podemos observar que o número de elementos desta malha gerada é próximo ao limite permitido por esta versão do programa Ansys.

```

GLOBAL STATUS

ANSYS - Engineering Analysis System      Oct 06, 1999      09:57
Revision 5.2      ANSYS/Ed      PC 386/486  Version
For support call      Phone      Fax
Product(s) enabled: ANSYS/Ed

MODEL INFORMATION -----

Solid model summary:

          Largest   Number   Number
          Number   Defined   Selected
Keypoints . . . . . 35      35      35
Lines . . . . . 45      45      45
Areas . . . . . 11      11      11
Volumes . . . . . 0       0       0

Finite element model summary:

          Largest   Number   Number
          Number   Defined   Selected
Nodes . . . . . 268     268     268
Elements. . . . . 245     245     245
    
```

Figura 6 - Quadro de informações gerais do modelo

Estudo do cálculo analítico proposto pelo professor Alquindar S. Pedroso:

Segue abaixo o desenvolvimento matemático da metodologia utilizada no cálculo da indutância, as figuras e o detalhamento são vistos no anexo 1.

Calculo da expressão da permeabilidade no vazio do estator.

$$R_{LF} \operatorname{sen}(90 - \alpha) = r \operatorname{sen}(\alpha)$$

$$R_{LF} = r \frac{\operatorname{sen}(\alpha)}{\cos(\alpha)} = r \operatorname{tg}(\alpha)$$

Comprimento total da linha de força.

$$l_{LF} = 2\pi R_{LF} \frac{2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{2\pi} = 2r\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \operatorname{tg}(\alpha)$$

Permeância do caminho magnético total no vazio do estator.

$$p(\alpha) = \frac{\mu_0}{l_{LF}} = \frac{2\mu_0}{D_{\text{int}}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \operatorname{tg}(\alpha)}$$

Análise harmônica do enrolamento.

$$f(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \operatorname{sen}(k\theta) \quad \rightarrow \text{para } k \text{ ímpar.}$$

$$b_k = \frac{4N}{\pi} \int_x^{\frac{\pi}{2}} \operatorname{sen}(k\theta) d\theta = \frac{4N}{\pi} \left(-\frac{\cos(k\theta)}{k} \right)_x^{\frac{\pi}{2}}$$

$$b_k = -\frac{4N}{k\pi} \left[\cos\left(k \frac{\pi}{2}\right) - \cos(kx) \right]$$

$$b_k = \frac{4N}{k\pi} \cos(kx)$$

Voltando à nossa forma de onda relativa a função acúmulo de condutores.

$$b_1(1) = \frac{4N}{\pi} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

$$b_1(1) = N \frac{4}{\pi} \cos(7,5^\circ) = N \frac{4}{\pi} 0,9914 = 1,2623N$$

$$b_1(2) = \frac{4N}{\pi} \cos\left(\frac{3\gamma}{2}\right)$$

$$b_1(2) = N \frac{4}{\pi} \cos(22,5^\circ) = N \frac{4}{\pi} 0,9239 = 1,1763N$$

Daí.

$$N_1 = N \frac{4}{\pi} (0,9914 + 0,9239) = N \frac{4}{\pi} 1,9153$$

$$N_1 = N 2,4386$$

De um modo geral.

$$N(\alpha) = \frac{4N}{\pi} \left[\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\gamma}{2}\right) \right] \text{sen}(\alpha) + \frac{4N}{3\pi} \left[\cos\left(\frac{3\gamma}{2}\right) + \cos\left(\frac{9\gamma}{2}\right) \right] \text{sen}(3\alpha) + \\ + \frac{4N}{5\pi} \left[\cos\left(\frac{5\gamma}{2}\right) + \cos\left(\frac{15\gamma}{2}\right) \right] \text{sen}(5\alpha) + \dots$$

Distribuição de condutores.

$$N_\Sigma \cong \frac{4N}{\pi} (1,9153 \text{sen}(\alpha) + 0,4409 \text{sen}(3\alpha) + 0,0812 \text{sen}(5\alpha))$$

Distribuição de $B(\alpha)$.

$$B(\alpha) = FMM(\alpha) p(\alpha)$$

$$B(\alpha) = iN_\Sigma p(\alpha) \cong \frac{4}{\pi} Ni (1,9153 \text{sen}(\alpha) + 0,4409 \text{sen}(3\alpha) + 0,0812 \text{sen}(5\alpha)) \frac{\mu_0}{D_{\text{int}}} \frac{2}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \frac{1}{\text{tg}(\alpha)}$$

Tubo de fluxo elementar.

$$\delta\phi_\alpha = B(\alpha) \frac{D_{\text{int}}}{2} l_{\text{estator}} d\alpha$$

Este fluxo enlaça uma corrente.

$$i_\alpha = iN_\Sigma(\alpha)$$

Daí o produto.

$$i_{\alpha} \delta\phi_{\alpha} = \left(\frac{4}{\pi} Ni \right)^2 (1,9153 \text{sen}(\alpha) + 0,4409 \text{sen}(3\alpha) + 0,0812 \text{sen}(5\alpha))^2 \frac{\mu_0}{D_{\text{int}}} \frac{2}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} \frac{1}{\text{tg}(\alpha)} \frac{D_{\text{int}}}{2} l_{\text{estator}} d\alpha$$

O valor da indutância associada ao fluxo no vazio do estator pode ser então calculado:

$$L_{\text{vazio}_{\text{estator}}} = \frac{1}{i^2} \int_0^{2\pi} i_{\alpha} \delta\phi_{\alpha} = \frac{2}{i^2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} i_{\alpha} \delta\phi_{\alpha} = \frac{4}{i^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i_{\alpha} \delta\phi_{\alpha}$$

$$N = 30$$

$$l_{\text{estator}} = 10\text{cm} = 10^{-1}\text{m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

Expandindo.

$$\begin{aligned} (k_1 \text{sen}(\alpha) + k_2 \text{sen}(3\alpha) + k_3 \text{sen}(5\alpha))^2 &= k_1^2 \text{sen}^2(\alpha) + k_3^2 \text{sen}^2(3\alpha) + k_5^2 \text{sen}^2(5\alpha) + \\ &+ 2k_1k_3 \text{sen}(\alpha) \text{sen}(3\alpha) + 2k_1k_5 \text{sen}(\alpha) \text{sen}(5\alpha) + 2k_3k_5 \text{sen}(3\alpha) \text{sen}(5\alpha) \end{aligned}$$

Aproximando.

$$\cong k_1^2 \text{sen}^2(\alpha) + 2k_1k_3 \text{sen}(\alpha) \text{sen}(3\alpha) + 2k_1k_5 \text{sen}(\alpha) \text{sen}(5\alpha)$$

Calculo da indutância associada ao "vazio" do estator.

$$\begin{aligned} L_{\text{vazio}_{\text{estator}}} &= A \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1,9153)^2 \frac{\text{sen}^2(\alpha)}{\text{tg}(\alpha)} \frac{d\alpha}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} + A \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \times 1,9153 \times 0,4409 \frac{\text{sen}(\alpha) \text{sen}(3\alpha)}{\text{tg}(\alpha)} \frac{d\alpha}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} + \\ &+ A \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \times 1,9153 \times 0,0812 \frac{\text{sen}(\alpha) \text{sen}(5\alpha)}{\text{tg}(\alpha)} \frac{d\alpha}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} \end{aligned}$$

$$A = \left(\frac{4}{\pi} N \right)^2 4\mu_0 l_{\text{estator}} = 2 \times 36669,2989 \times 10^{-8}$$

$$J_1 = 3,6684 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\text{sen}^2(\alpha)}{\text{tg}(\alpha) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha$$

$$J_1 = 3,6684 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\text{sen}(\alpha)\cos(\alpha)}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha = 3,6684 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(2\alpha)}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha$$

$$\frac{\pi}{2} - \alpha = \beta \rightarrow d\alpha = -d\beta$$

$$\alpha = 0 \rightarrow \beta = \frac{\pi}{2}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \rightarrow \beta = 0$$

$$\text{sen}(2\alpha) = \text{sen}\left(2\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)\right) = \text{sen}(\pi - 2\beta) = \text{sen}(2\beta)$$

$$J_1 = -3,6684 \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(2\beta)}{\beta} d\beta = 3,6684 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(2\beta)}{\beta} d\beta$$

$$= 3,6684 \left\{ \frac{1}{2} \left[2\beta - \frac{2^3 \beta^3}{3 \times 3!} + \frac{2^5 \beta^5}{5 \times 5!} - \frac{2^7 \beta^7}{7 \times 7!} + \frac{2^9 \beta^9}{9 \times 9!} - \dots \right] \right\}$$

$$J_1 \cong 3,6684 \left\{ \frac{1}{2} \times 1,853 \right\} = 3,6684 \times 0,9265 = \mathbf{4,5949}$$

É importante mencionar que o valor em negrito está corrigido, conforme a revisão dos cálculos feito no matlab e mostrados a seguir.

$$J_2 = 1,6889 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\text{sen}(\alpha)\text{sen}(3\alpha)}{\text{tg}(\alpha) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha = 1,6889 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\alpha)\text{sen}(3\alpha) \frac{d\alpha}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}$$

$$\cos(\alpha)\text{sen}(3\alpha) = \frac{1}{2}\text{sen}(4\alpha) - \frac{1}{2}\text{sen}(-2\alpha) = \frac{1}{2}\text{sen}(4\alpha) + \frac{1}{2}\text{sen}(2\alpha)$$

$$J_2 = 1,6889 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(4\alpha)}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha + 1,6889 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(2\alpha)}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha$$

$$\frac{\pi}{2} - \alpha = \beta \rightarrow d\alpha = -d\beta$$

$$\alpha = 0 \rightarrow \beta = \frac{\pi}{2}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \rightarrow \beta = 0$$

$$\text{sen}\left(4\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)\right) = \text{sen}(2\pi - 4\beta) = -\text{sen}(4\beta)$$

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^0 \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(4\beta)}{\beta} d\beta = -\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(4\beta)}{\beta} d\beta = -0,709$$

$$J_2 = 1,6889 \times (-0,709) + 1,6889 \times 0,9265$$

$$J_2 = -1,1974 + 1,5648 = 0,3674$$

$$J_3 = 0,3110 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\text{sen}(\alpha) \text{sen}(5\alpha)}{\text{tg}(\alpha)} \frac{d\alpha}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} = 0,3110 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\alpha) \text{sen}(5\alpha) \frac{d\alpha}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}$$

$$\cos(\alpha) \text{sen}(5\alpha) = \frac{1}{2} \text{sen}(6\alpha) + \frac{1}{2} \text{sen}(4\alpha)$$

$$J_3 = 0,3110 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(6\alpha)}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha + 0,3110 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(4\alpha)}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(6\alpha)}{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} d\alpha = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(6\beta)}{\beta} d\beta = 0,837$$

$$J_3 = 0,3110(0,837 - 0,709) = 0,0400$$

$$L_{\text{vazio estator}} \cong 3,6669 \times 10^{-4} \times 2 \times [4,5949 + 0,3674 + 0,04]$$

$$L_{\text{vazio estator}} \cong 5,0023 \times 3,6669 \times 10^{-4} \times 2 = 2 \times 18,3429 \times 10^{-4} \text{ H}$$

$$X_{\text{vazio estator}} = 2 \times \pi \times f \times L = 2 \times 0,6915 = 1,3830 \Omega$$

Observa-se que a correção da parcela J1 mencionada anteriormente leva a um novo valor de indutância encontrado por esta metodologia, conforme revisão dos cálculos abaixo.

Revisão dos Cálculos usando o Matlab:

```

% Calculos
b11=(4/pi)*cos(pi/24);
b12=(4/pi)*cos(3*pi/24);
N1=b11+b12;
k1=cos(pi/24)+cos(3*pi/24);
k3=(1/3)*(cos(3*pi/24)+cos(3*3*pi/24));
k5=(1/5)*(cos(5*pi/24)+cos(5*3*pi/24));
A=((4/pi)*30)^2*4*pi*1e-7*0.1*4;
syms x;
J1a=int((sin(x))^2/(tan(x)*(pi/2-x)),0,pi/2);
J1=k1^2*J1a;
J3a=int((sin(x)*sin(3*x))/(tan(x)*(pi/2-x)),0,pi/2);
J3=2*k1*k3*J3a;
J5a=int((sin(x)*sin(5*x))/(tan(x)*(pi/2-x)),0,pi/2);
J5=2*k1*k5*J5a;
LP=A*10*(J1+J3+J5);

```

```

% Resultados
b11 = 1,2623
b12 = 1,1763
N1 = 2,4387
k1 = 1,9153
k3 = 0,4355
k5 = 0,0821
A = 7,3339e-004
J1a = 0,9260
J1 = 3,3969
J3a = 0,2169
J3 = 0,3618
J5a = 0,1283
J5 = 0,0404
LP = 0,0279

```

% Valor da indutância corrigida obtida através do cálculo do Pedroso.

% Valor da indutância corrigida obtida através da metodologia do Pedroso sem aproximar a expansão.

```

J2a=int((sin(3*x))^2/(tan(x)*(pi/2-x)),0,pi/2);
J2=k3^2*J2a;

```

```

J2a = 1,2712
J2 = 0,2411

```

$$\begin{aligned} J4a &= \text{int}((\sin(5*x))^2 / (\tan(x)*(pi/2-x)), 0, pi/2); & J4a &= 1,4334 \\ J4 &= k5^2 * J4a; & J4 &= 0,0097 \\ J6a &= \text{int}((\sin(3*x)*\sin(5*x)) / (\tan(x)*(pi/2-x)), 0, pi/2); & J6a &= 0,4365 \\ J6 &= 2*k3*k5*J6a; & J6 &= 0,0312 \\ L &= A*10*(J1+J3+J5+J2+J4+J6); & \mathbf{L} &= \mathbf{0,0299} \end{aligned}$$

% Valor da indutância obtida através da metodologia do Pedroso considerando a 7a harmônica.

$$\begin{aligned} k7 &= (1/7)*(\cos(7*pi/24)+\cos(7*3*pi/24)); & k7 &= -0,0450 \\ J7a &= \text{int}((\sin(7*x))^2 / (\tan(x)*(pi/2-x)), 0, pi/2); & J7a &= 1,5404 \\ J7 &= k7^2 * J7a; & J7 &= 0,0031 \\ J71a &= \text{int}((\sin(x)*\sin(7*x)) / (\tan(x)*(pi/2-x)), 0, pi/2); & J71a &= 0,0913 \\ J71 &= 2*k1*k7*J71a; & J71 &= -0,0157 \\ J73a &= \text{int}((\sin(3*x)*\sin(7*x)) / (\tan(x)*(pi/2-x)), 0, pi/2); & J73a &= 0,2905 \\ J73 &= 2*k3*k7*J73a; & J73 &= -0,0114 \\ J75a &= \text{int}((\sin(5*x)*\sin(7*x)) / (\tan(x)*(pi/2-x)), 0, pi/2); & J75a &= 0,5654 \\ J75 &= 2*k5*k7*J75a; & J75 &= -0,0042 \\ L7 &= A*10*(J1+J3+J5+J2+J4+J6+J7+J71+J73+J75); & \mathbf{L7} &= \mathbf{0,0297} \end{aligned}$$

Quadro Comparativo:

O quadro abaixo mostra os valores de indutância calculados pelo Ansys (L_{ANSYS} e $L_{ANSYS A. CARLOS}$), onde ambos os resultados foram obtidos através das malhas geradas pelo grupo e pelo Professor Antônio Carlos, respectivamente. O quadro mostra também os valores calculados através da metodologia utilizada pelo Professor Pedroso, apresentadas em sua forma original com valor corrigido ($L_{PEDROSO CORRIGIDO}$), sem considerar a aproximação da expansão feita pelo mesmo ($L_{PEDROSO SEM APROX.}$) e ainda considerando a 7ª harmônica que introduz uma parcela de redução ($L_{PEDROSO 7^a HARM.}$).

L_{ANSYS}	$L_{PEDROSO CORRIGIDO}$	$L_{PEDROSO SEM APROX.}$	$L_{PEDROSO 7^a HARM.}$	$L_{ANSYS A. CARLOS}$
2,87 mH	2,79 mH	2,99 mH	2,97 mH	2,93 mH

Conclusão:

Podemos observar que o valor encontrado pelo Ansys é praticamente igual ao calculado analiticamente, mesmo considerando às aproximações de ambos os métodos. Observa-se também que as limitações desta versão do programa impossibilitaram a criação de uma malha mais refinada, o que levaria a um valor de indutância com maior precisão.

Desta forma, comprova-se que o método de elementos finitos é uma ferramenta de grande potencial quando aplicado às máquinas elétricas, neste caso, utilizado para o cálculo da indutância.

Pode-se esperar que a diferença entre um valor de indutância experimental (valor medido) e o valor obtido pelo Ansys atribuí-se, principalmente, a indutância de dispersão da cabeça da bobina.

ANEXO 3

MÉTODOLOGIA DE CÁLCULO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR

Este anexo expõe a formulação matemática tida como clássica através de cálculos analíticos para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico. Em seguida, apresenta-se uma síntese dos resultados, bem como os dados necessários para a solução desta formulação. Seu desenvolvimento completo encontra-se descrito em [3].

3.1 Resistência do Estator (R_1).

O valor da resistência por fase do estator é dado pela expressão [10]:

$$R_1 = 2 \cdot P \cdot q \cdot \rho_{Cu} \cdot N \cdot N_c \cdot (2 \cdot L + 2 \cdot CBMA) \cdot \frac{FCA}{(A_1 \cdot NCP)}$$

Onde: ρ_{Cu} é a resistividade do cobre;

N é o número de espiras de uma bobina;

N_c é o número de camadas do enrolamento do estator;

P é o número de pares de polos;

q é o número de ranhuras por polo por fase;

L é o comprimento do pacote magnético;

NCP é o número de caminhos paralelos;

CBMA é comprimento da cabeça da bobina;

A₁ é a área da seção transversal do condutor;

FCA é o fator que leva em consideração o efeito da corrente alternada (1,05).

3.2 Resistência do Rotor Refletida ao Primário (R₂).

A resistência do rotor refletida ao estator formulada em [10] é dada por:

$$R_2' = r_t \cdot \rho_2 \cdot \left(\frac{L \cdot f_{kr}}{A_{b2}} + \frac{\pi \cdot D_{am}}{A_2 \cdot Z_2 \cdot 2 \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)$$

Onde ρ_2 é a resistividade do alumínio da gaiola;

A_{b2} é a área da barra;

f_{kr} é o fator de correção para a frequência de 60 Hz, usado no cálculo da corrente e do conjugado em rotor bloqueado;

A₂ é a área do anel;

Z₂ é o número de ranhuras do rotor;

α é o ângulo entre barras expresso em graus elétricos.

D_{am} é o diâmetro médio do anel;

r_t é a relação de transformação entre primário e secundário e é dada por:

$$r_t = \frac{4 \cdot N_{fa} \cdot (q \cdot N \cdot N_c \cdot P \cdot \varepsilon)^2}{Z_2 \cdot (f_{ksk})^2}$$

$$\text{Onde: } f_{ksk} = \frac{\text{sen}(t \cdot \alpha / 2)}{t \cdot \alpha / 2}$$

t é a inclinação da barra expressa em número de passos da ranhura do rotor;

Este parâmetro é corrigido com a temperatura do rotor advinda do circuito

térmico. Em rotor bloqueado, não se corrige a temperatura mas inclui-se o efeito da distribuição não uniforme das correntes da barra a 60 Hz através do fator (f_{kr}) [10]:

$$f_{kr} = \frac{\xi \cdot (\sinh(2 \cdot \xi) + \sin(2 \cdot \xi))}{\cosh(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}$$

$$\text{Onde: } \xi = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot h_2 \cdot \sqrt{\frac{f}{10 \cdot \rho_2}}$$

h_2 é altura da ranhura do rotor.

f é a frequência da fonte de alimentação.

3.3 Reatância de Dispersão do Estator (X_1).

A reatância de dispersão da ranhura dada em [10] é apresentada a seguir:

$$X_{dr1} = 4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot P \cdot f \cdot q \cdot (N \cdot N_c)^2 \cdot L \cdot \lambda_{r1}$$

Onde: μ_0 é a permeabilidade do ar;

λ_{r1} é a permeância da ranhura por unidade de comprimento, definida abaixo.

$$\lambda_{r1} = \frac{h_{41}}{a_{n1}} + \frac{2 \cdot h_{31}}{a_{n1} + a_{a1}} + \frac{h_1 - h_{41} - h_{31} - f_{dr1}}{3 \cdot a_{12}}$$

Os símbolos estão definidos na figura 3.3-1. Os valores adotados foram baseados no desenho da ranhura do fabricante e são $h_{41} = 0,6$ mm, $h_{31} = 0,398$ mm, $f_{dr1} = 6$ mm e $a_{a1} = 4,422$ mm

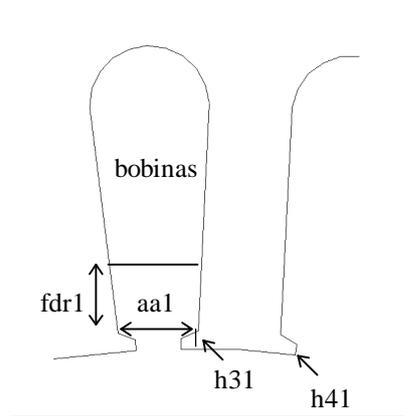


Figura 3-1: Grandezas utilizadas no cálculo da permeância da ranhura do estator

A reatância de dispersão Zig-Zag (X_{zig1}) dada em [8] é apresentada a seguir:

$$X_{zig1} = \frac{X_m \cdot \pi^2}{12} \cdot \left(\frac{2 \cdot P}{f_{kc1} \cdot Z_1} \right)^2$$

Onde: f_{kc1} é o fator de Carter do estator, definido na seção 3.6.1;

Z_1 é o número de ranhuras do estator.

A reatância de dispersão devido à inclinação da barra (X_{ks1}) é expressa como [8].

$$X_{sk1} = X_m \cdot (1 - f_{ksk})$$

A formulação da reatância de cabeça de bobina dada em [8] é apresentada a seguir:

$$X_e = \frac{4,6 \cdot N_{fa} \cdot f \cdot N^2 \cdot N_c^2 \cdot D_1}{10^8 \cdot P^2} \left\{ \tan(\alpha_b) \cdot \left(\frac{p \cdot \pi - \text{sen}(p \cdot \pi)}{\pi} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{0,8 \cdot D_2}{D_1} \right)^P \right] + \right. \\ \left. 0,93 \cdot \varepsilon^2 \cdot \left(\log \frac{1,4 \cdot D_1}{2 \cdot h_1} - \frac{D}{D_1} \cdot \log \frac{0,54 \cdot D}{R} \right) \right\}$$

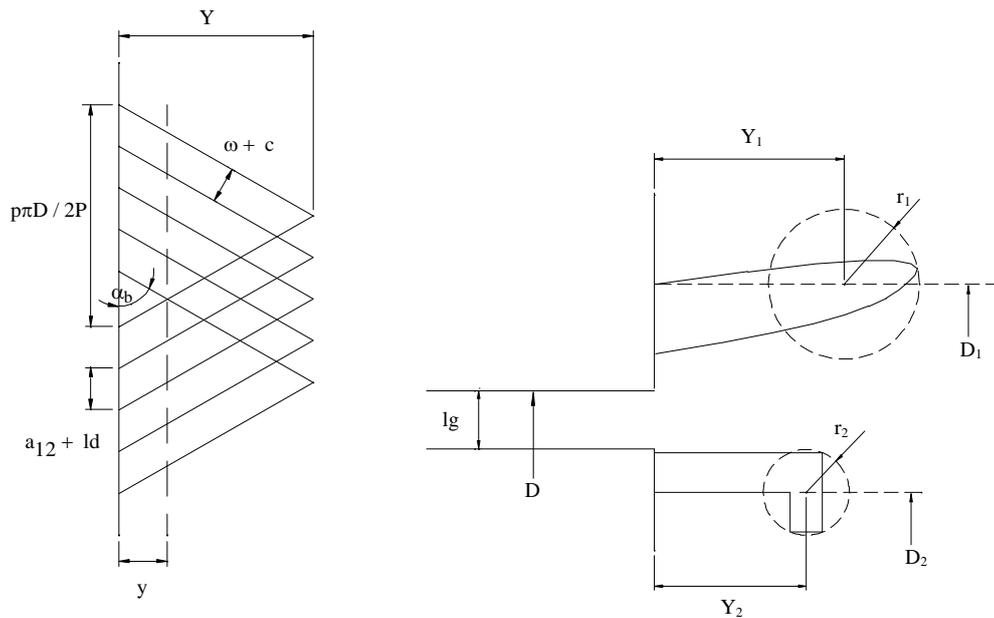


Figura 3-2: Estilização da cabeça da bobina para definição de variáveis.

Onde: r_1 , r_2 são os raios efetivos da distribuição de corrente periférica na cabeça de bobina e no anel da gaiola do rotor;

D_1 , D_2 são os diâmetros efetivos da cabeça da bobina e do anel do rotor;

Y_1 , Y_2 são os espaços axiais efetivos da corrente de cabeça de bobina periférica;

a_{12} é a largura da ranhura;

ld é a largura do dente;

c é espaço entre as cabeças de bobina;

α_b é o ângulo de inclinação da cabeça de bobina.

$$R = \sqrt{0,25 (D_1 + D_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$$

Logo, a reatância de dispersão do estator é dada pela expressão:

$$X_1 = X_{dr1} + X_{sk1} + X_{zig1} + X_e / 2.$$

3.4 Reatância de Dispersão do Rotor Refletida ao Estator(X_2).

Esta reatância de dispersão, como a do estator, foi dividida em quatro partes; a reatância de cabeça de bobina (X_e), a reatância de dispersão da ranhura (X_{dr2}'), a reatância de dispersão Zig-Zag (X_{zig2}) e a reatância de dispersão devido a inclinação da barra (X_{ks2}).

A reatância de dispersão da ranhura refletida ao estator é dada por [10]:

$$X_{dr2}' = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot r_t \cdot L \cdot \lambda_{r2} \cdot f_{kl}$$

$$f_{kl} = \frac{3 \cdot (\sinh(2 \cdot \xi) - \sin(2 \cdot \xi))}{2 \cdot \xi \cdot \cosh(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}$$

Onde: f_{kl} é o fator de correção para a frequência de 60 Hz, usado para condição de rotor bloqueado.

λ_{r2} é a permeância da ranhura do rotor por unidade de comprimento, definida abaixo.

$$\lambda_{r2} = \frac{h_2}{3 \cdot a_{22}} + \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{0,214 \cdot 10^{-3}}$$

A ranhura foi modelada como retangular e a saturação na parte do aço entre o topo da ranhura e o entreferro foi modelada como uma pseudo - abertura, as dimensões na fórmula estão em metros.

A reatância de dispersão Zig-Zag do rotor para o caso de ranhura fechada é dada por [8]:

$$X_{zig2} = \frac{X_m \cdot \pi^2}{12} \cdot \left(\frac{2 \cdot P}{Z_2}\right)^2$$

A reatância de dispersão devido à inclinação da barra é expressa por [8 ou 10]:

$$X_{sk2} = X_m \cdot (1 - f_{ksk})$$

Como a reatância de dispersão da cabeça de bobina é igualmente dividida entre rotor e estator, tem-se:

$$X_2' = X_{dr2}' + X_{sk2} + X_{zig2} + X_e/2$$

3.5 Resistência do Núcleo(R_{fe}).

O valor da resistência do núcleo é dado por:

$$R_{fe} = \frac{E_f^2}{P_{fed}}$$

$$P_{fed} = F_b \cdot P_c \cdot F_{ens}$$

Onde: P_{fed} é a perda no núcleo do estator;

F_b é o fator de perdas do aço, obtida das curvas do fabricante em w/kg, para a densidade de fluxo da densidade da coroa.

P_c é o peso do núcleo do estator, coroa e dentes;

F_{ens} é um fator empírico que ajusta as perdas no núcleo calculadas com relação às perdas medidas no ensaio em vazio.

3.6 Reatância de Magnetização(X_m).

O valor da reatância de magnetização é calculado pela expressão:

$$X_m = \frac{E_f}{I_m}$$

Onde: E_f é a força eletromotriz obtida através das dimensões e do fluxo

magnético. A sua formulação é discutida na seção 3.6.1.

I_m é a corrente de magnetização, que é função da intensidade de campo, entreferro e dos fatores de Leiman. A sua expressão é apresentada na seção 3.6.1.

3.6.1 Formulação do Cálculo do Circuito Magnético.

Nesta seção, apresentam-se as hipóteses e o procedimento de cálculo do circuito magnético do motor. Este cálculo se orienta no sentido da determinação de três grandezas importantes, a força eletromotriz induzida, a corrente de magnetização e a densidade de fluxo magnético na coroa do estator. Ressalta-se que esta modelagem incluiu uma condição de igualdade entre a força eletromotriz do enrolamento, calculada a partir das dimensões e fluxo, e a força eletromotriz calculada com o auxílio do circuito equivalente para a condição em vazio.

A força eletromotriz é determinada pela expressão:

$$E_f = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \alpha_i \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot q \cdot N \cdot N_c \cdot L \cdot D \cdot B_g$$

$$\alpha_i = \frac{0}{B_g \cdot \tau} \int_0^{\tau} B_x \cdot dx$$

onde: B_x é a densidade de fluxo para um ponto ao longo do entreferro;

α_i é o fator de enchimento do fluxo, obtido através da figura IV.2 -1;

τ é um passo polar;

ε é o fator de enrolamento;

σ é o fator de forma, obtido através da figura IV.2-1;

B_g é o valor máximo da densidade de fluxo para uma curva que supostamente representa a sua distribuição ao longo do entreferro. O comportamento desta curva com a saturação está representada na figura 3-3, através dos fatores de enchimento e forma.

O fator de saturação (K_s) é definido adiante.

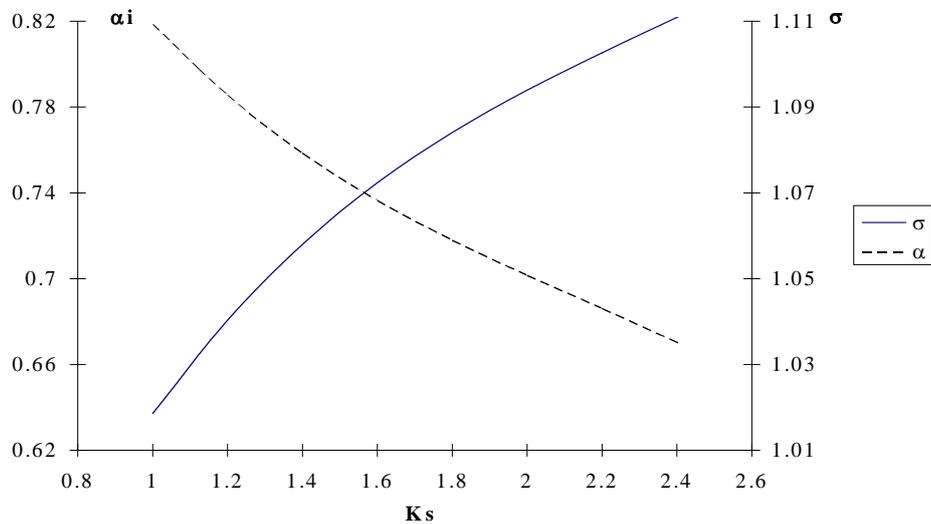


Figura 3-3: Variação do fator de enchimento e forma com o fator de saturação [10].

No cálculo da corrente de magnetização, as diversas parcelas das fmm's para as diferentes partes do circuito magnético devem ser quantificadas. A figura 3-4 identifica as diferentes quedas do potencial magnético ao longo da trajetória do fluxo principal.

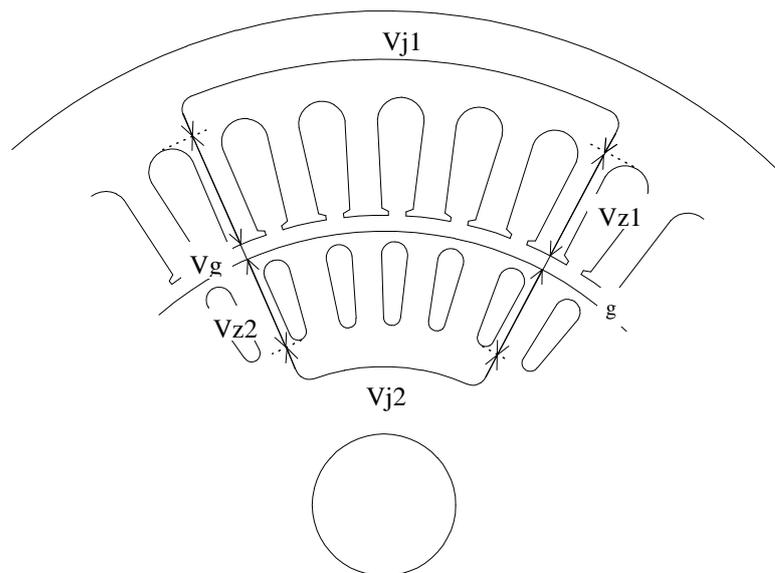


Figura 3-4: Trajetória para determinação da fmm do motor.

A força magnetomotriz total (V_m) é dada por:

$$V_m = 2 \cdot V_g + 2 \cdot V_{z1} + 2 \cdot V_{z2} + V_{j1} + V_{j2}$$

Onde V_g é a força magnetomotriz no entreferro;

V_{z1} é a força magnetomotriz no dente do estator;

V_{z2} é a força magnetomotriz no dente do rotor;

V_{j1} é a força magnetomotriz na coroa do estator;

V_{j2} é a força magnetomotriz na coroa do rotor.

* **Força magnetomotriz no entreferro (V_g).**

A força magnetomotriz no entreferro é obtida pelo produto da intensidade de campo no entreferro e o comprimento do entreferro. O entreferro é multiplicado pelo fator de Carter para incluir o efeito das ranhuras em termos de relutâncias ao longo do entreferro.

$$V_g = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot l_g c$$

$$l_g c = k_c \cdot l_g$$

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2}$$

$$k_{c1} = \frac{\pi \cdot D}{\pi \cdot D - \gamma_1 \cdot Z_1 \cdot l_g}$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_{n1}}{l_g}\right)^2}{5 + \frac{a_{n1}}{l_g}}$$

$$k_{c2} = \frac{\pi \cdot D}{\pi \cdot D - \gamma_2 \cdot Z_2 \cdot l_g}$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{an_2}{lg}\right)^2}{5 + \frac{an_2}{lg}}$$

A expressão final de V_g é

$$V_g = \frac{k_c \cdot lg}{\mu_o} \cdot B_g$$

Onde lg é o comprimento do entreferro;

lgc é o comprimento do entreferro corrigido;

an_1 é a abertura da ranhura do estator;

an_2 é a abertura da ranhura do rotor, para os motores industriais geralmente utiliza-se ranhuras fechadas no rotor.

k_c é o fator de Carter;

k_{c1} é o fator de Carter do estator;

k_{c2} é o fator de Carter do rotor, para ranhuras fechadas, seu valor é um.

* **Força magnetomotriz no dente do estator (V_{z1}).**

A densidade de fluxo no meio do dente do estator é expresso por:

$$B_{z1} = \frac{B_g \cdot D}{\left(D + h_1 - \frac{a_{12} \cdot Z_1}{\pi}\right) \cdot \phi_{fe1}}$$

Onde: B_{z1} é a densidade de fluxo no meio radial do dente do estator;

D é o diâmetro interno do estator;

h_1 é a altura da ranhura, considerada a mesma do dente;

a_{12} é a largura da ranhura;

Z_1 é o número de dentes do estator;

ϕ_{fe1} é o fator de empilhamento da chapa;

Com a densidade de fluxo, através da curva de magnetização do aço, obtém-se a intensidade de campo. A curva experimental e a sua aproximação matemática se encontram no anexo 2.

A força magnetomotriz é, então calculada como:

$$Vz_1 = Hz_1 \cdot h_1$$

Onde: Hz_1 é a intensidade de campo magnético no meio radial do dente;

* **Força magnetomotriz no dente do rotor (Vz_2).**

A densidade de fluxo no meio do dente do rotor é expresso por:

$$Bz_2 = \frac{B_g \cdot D}{\left(D + h_2 - \frac{a_{22} \cdot Z_2}{\pi} \right) \cdot \phi_{fe2}}$$

Onde: Bz_2 é a densidade de fluxo no meio radial do dente do rotor;

h_2 é a altura da ranhura, considerada a mesma do dente;

a_{22} é a largura da ranhura;

Z_2 é o número de dentes do rotor;

ϕ_{fe2} é o fator de empilhamento da chapa, no caso de motor de larga escala de produção, a chapa do rotor é a mesma do estator;

Como no estator, de posse da densidade de fluxo obtém-se a intensidade de campo.

A força magnetomotriz é, então calculada como:

$$Vz_2 = Hz_2 \cdot h_2$$

Onde: Hz_2 é a intensidade de campo magnético no meio radial do dente do rotor;

* **Força magnetomotriz na coroa do estator (V_{j1}).**

A expressão da densidade de fluxo no meio da coroa do estator;

$$B_{j1} = \frac{\Phi_f \cdot (1 + \tau_1)}{2 \cdot h_{j1} \cdot L \cdot \phi_{fe1}}$$

$$\Phi_f = \frac{\pi \cdot D \cdot B_g \cdot \alpha_i \cdot L}{2 \cdot P}$$

$$B_{j1} = \frac{\pi \cdot B_g \cdot D \cdot \alpha_i \cdot (1 + \tau_1)}{4 \cdot P \cdot h_{j1} \cdot \phi_{fe1}}$$

Onde: B_{j1} é a densidade de fluxo no meio da coroa do estator;

Φ_f é o fluxo magnético em um passo polar;

h_{j1} é a largura da coroa do estator

τ_1 é o coeficiente de dispersão do fluxo.

A fmm é, então, derivada da expressão:

$$V_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} \cdot \alpha_1$$

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_1 + h_{j1})}{2 \cdot P}$$

Onde: H_{j1} é a intensidade de campo magnético na coroa do estator, função de

B_{j1} e obtido das curva de magnetização do material.

l_{j1} é o comprimento médio da coroa do estator;

α_1 é o fator de Leiman para a coroa do estator, obtido através da figura IV.2-3

* **Força magnetomotriz na coroa do rotor (V_{j2}).**

A expressão da densidade de fluxo no meio da coroa do rotor;

$$B_{j2} = \frac{\Phi_f}{2 \cdot h_{j2} \cdot L \cdot \phi_{fe2}}$$

$$B_{j2} = \frac{\pi \cdot D \cdot B_g \cdot \alpha_i}{4 \cdot P \cdot \phi_{fe2} \cdot h_{j2}}$$

Onde: B_{j2} é a densidade de fluxo no meio da coroa do rotor;

h_{j2} é a altura da coroa do rotor

A fmm da coroa do rotor é, então, derivada da expressão:

$$V_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} \cdot \alpha_2$$

Onde: H_{j2} é a intensidade de campo magnético da coroa do rotor.

l_{j2} é o comprimento médio da coroa do rotor;

α_2 é o fator de Leiman para a coroa do rotor, obtido através da figura 3-5.

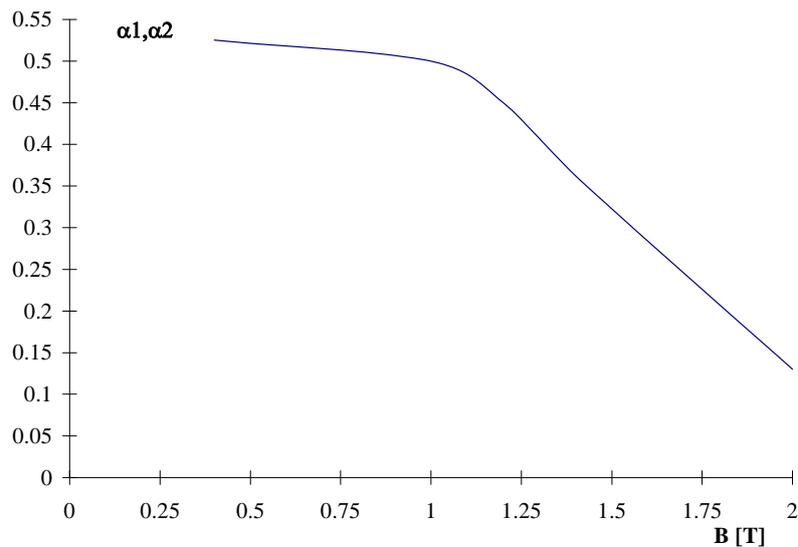


Figura 3-5: Fatores de Leiman em função da densidade de fluxo [10].

* **Fator de saturação (K_s).**

O fator de saturação é usado para obtenção dos fatores de enchimento e forma através da figura IV.2-1, e é definido como:

$$K_s = \frac{V_g + V_{z1} + V_{z2}}{V_g}$$

De posse das forças magnetomotrizes, utiliza-se a equação dada para determinar a força magnetomotriz total (V_m). O valor eficaz da corrente de magnetização é dado por:

$$I_m = \frac{\pi \cdot V_m}{4 \cdot \sqrt{2} \cdot N_{fa} \cdot q \cdot N \cdot N_c \cdot \varepsilon}$$

Neste momento, torna-se conveniente a exposição do procedimento de cálculo do circuito magnético. A seqüência deste cálculo é a seguinte :

1. Escolhe-se uma certa densidade de fluxo magnético máxima no entreferro (B_g);
 2. Calculam-se as densidades de fluxo dos dentes B_{z1} e B_{z2} ;
 3. Calculam-se as fmms no entreferro (V_g), no dente do estator (V_{z1}) e no dente do rotor (V_{z2});
 4. Calcula-se o fator de saturação(K_s);
 5. Calculam-se os fatores de enchimento (α_i) e de forma (σ);
 6. Calculam-se as densidades de fluxo nas coroas do estator (B_{j1}) e rotor (B_{j2});
 7. Calculam-se as fmms nas coroas do estator (V_{j1}) e rotor (V_{j2});
 8. Calcula-se a corrente de magnetização(I_m);
 9. Calcula-se força eletromotriz induzida (E_f);
 10. Calcula-se a reatância de magnetização (X_m);
 11. Calculam-se as perdas do núcleo (P_{fed});
 12. Calcula-se a resistência equivalente do núcleo(R_{fe});
 13. Com os outros parâmetros determinados, resolve-se o circuito equivalente para a condição em vazio e determina a força eletromotriz(E_{ceo}).
 14. Compara a E_f com E_{ceo} ;
 15. Se diferente, retorna-se ao passo 1 com um novo valor de B_g ;
 16. Os passos de 1 a 15 são repetidos até a igualdade ser atingida.
- Os parâmetros do circuito equivalente, calculados através da metodologia proposta, são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 3-1: Resultados da metodologia de cálculo analítico

Grandezas	Cálculo Analítico
$R_1 (\Omega)$	1,264
$R'_2 (\Omega)$	1,217
$X_1(\Omega)$	2,133
$X'_2(\Omega)$	2,138
$X_m(\Omega)$	48,83
$R_{fe}(\Omega)$	1072,12

3.7. Dados do motor.

O enrolamento do estator é de dupla camada com bobina de passo pleno com 13 espiras de dois fios de 0,95 mm.

$V_n = 220 \text{ V}$	$a_{n1} = 2,5 \text{ mm}$	$\gamma_{cu} = 8900 \text{ kg/m}^3$	$G_{ene} = 24,7$
$f = 60 \text{ Hz}$	$\tan(\alpha_b) = 2,0$	$\gamma_{al} = 2700 \text{ kg/m}^3$	$G_{ne} = 5,72$
$P_n = 5 \text{ cv}$	$\phi_{fe1} = 0,97$	$f_{pa} = 0,65$	$G_{enr} = 15,5$
$P = 2$	$\phi_{fe2} = 0,97$	$\mu_o = 12,6 \cdot 10^{-7}$	$G_{nr} = 2,48$
$q=3$	$P_{mech} = 40 \text{ W}$	$t = 1,22$	$F_{ens} = 1,5$
$Z_1 = 36$	$\rho_{cu} = 17,2 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$	$c_{fe} = 1,09 \text{ U\$/kg}$	$\epsilon = 0,958$
$Z_2 = 44$	$\rho_2 = 31,0 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$	$c_{cu} = 5,0 \text{ U\$/kg}$	$\tau_1 = 0,04$
$lg = 0,37 \text{ mm}$	$\gamma_{fe} = 7700 \text{ kg/m}^3$	$c_{al} = 4,0 \text{ U\$/kg}$	$N_c = 2,0$
$NCP = 2,0$	$F_{cp} = 8,9$		

ANEXO 4

METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR

Este anexo mostra uma síntese dos resultados de vários ensaios realizados no motor, que tiveram como objetivo a determinação dos parâmetros do seu circuito equivalente correspondente. As características nominais foram extraídas do ensaio de elevação de temperatura à carga nominal. O conteúdo deste anexo foi transcrito do Anexo 3 descrito em [3].

4.1. Síntese dos Resultados dos Ensaios.

4.1.1. Ensaio de Velocidade Síncrona.

O objetivo deste ensaio é determinar com mais precisão a curva em vazio do motor. Ele consiste de girar o motor à velocidade síncrona, e aplicar-lhe diversos níveis de tensões.

Potência (W)	Tensão média de linha (V)	Corrente média de linha (A)	Temperatura média do enrolamento (°C)
184	379,5	4,09	45

4.1.2. Ensaio de Rotor Removido

Este ensaio tem o objetivo de medir parte da reatância de dispersão do motor do estator, o valor medido vai ser subtraído da reatância do vazio.

P (W)	V _{fm} (V)	V _{lm} (V)	I _{fm} (A)
28.2472	8.7629	15.17779	2.7841
47.3923	11.4272	19.79249	3.6273
102.4808	16.7562	29.02259	5.3115
170.9997	21.5838	37.38424	6.8379
275.6993	27.4866	47.60819	8.7
403.528	33.166	57.4452	10.4885

4.1.3 Ensaio de Rotor Bloqueado

Este ensaio visa determinar o comportamento da impedância com o rotor bloqueado à 60 Hz variando a corrente.

P (W)	V _{fm} (V)	V _{lm} (V)	I _{fm} (A)
119.2563	28.3154	49.04371	3.9571
180.9144	32.3172	55.97503	4.8754
262.7771	36.7646	63.67816	5.9013
368.9888	41.477	71.84027	7.028
487.1029	45.815	79.35391	8.0739
599.8103	49.557	85.83524	8.973
745.0745	53.579	92.80155	9.971

4.1.4 Ensaio de Corrente e Conjugado de Partida

Estes ensaios visam à determinação da corrente e do conjugado com rotor bloqueado, a maior dificuldade é conseguir a repetibilidade dos ensaios com valores mais próximos possíveis da tensão nominal, para que os efeitos da correção sejam minimizados. Os valores corrigidos são apresentados a seguir.

V _{lm} (V)	Tr _b (Nm)	I _{rb} (A)	I _{rb} /I _n	Tr _b /T _n
380	66,24	61,29	7,57	3,24
380	64,36	59,51	7,35	3,15

O valor adotado de corrente de partida foi de 60,4 A (valor médio) e o de conjugado de partida foi de 65,3 N.m (valor médio).

4.1.5 Ensaio de Conjugado Máximo

* Tensão fase - neutro(V)	Tensão de linha (V)	T _m (Nm)	rpm	T _m . (corrigido)	T _m /T _n
304.6875	373.1645	76,8	982.5	79,64	3,89
314.9414	385.7229	85,3	1015	82,78	4,05

* Valor máximo da tensão fase-neutro.

O valor adotado de conjugado máximo foi de 81,2 N.m (valor médio).

4.1.6 Ensaios de Elevação de Temperatura

- 25% de carga

Temp. enrol.LA (*C)	52.4
Temp. enrol.LNA (*C)	51.1
Temp. núcleo	49.7
Temp. água din.	26.9
Temp ambiente	27.6
Conjugado medido (N.m)	4.9
Potência de Entrada (kW)	1.1836
I _{fm} (A)	4.5608
V _{lm} (V)	377.9335
Velocidade (rpm)	1776
η	76.16388
cosφ	0.39645

• **50% de carga**

Temp. enrol.LA (*C)	60.8
Temp. enrol.LNA (*C)	59.2
Temp. núcleo	56.2
Temp. água din.	29.7
Temp ambiente	27.7
Conjugado medido (N.m)	10
Potência de Entrada (kW)	2.1696
I _{fm} (A)	5.5356
V _{lm} (V)	382.1424
Velocidade (rpm)	1771
η	85.00242
cos ϕ	0.592146

• **75% de carga**

Temp. enrol.LA (*C)	73.1
Temp. enrol.LNA (*C)	71.2
Temp. núcleo	65.8
Temp. água din.	29.7
Temp ambiente	27.4
Conjugado medido (N.m)	15
Potência de Entrada (kW)	3.1796
I _{fm} (A)	6.6757
V _{lm} (V)	381.5015
Velocidade (rpm)	1752
η	86.21287
cos ϕ	0.720807

• **100% de carga**

Temp. enrol.LA (*C)	94,8
Temp. enrol.LNA (*C)	92,1
Temp. núcleo	82,8
Temp. água din.	31,7
Temp ambiente	27,6
Conjugado corrigido (N.m)	20,455

Potência de Entrada (kW)	4,2678
I _{fm} (A)	8,09
V _{lm} (V)	381.692
Velocidade (rpm)	1728
η	86,73
$\cos\phi$	79,80

4.1.7. Ensaio de resistência à frio

Resistência média das bobinas (Ω)	Temperatura de correção ($^{\circ}\text{C}$)
1,002	20

4.1.8. Ensaio em vazio

Ponto de teste → Grandezas ↓	1	2	3	4	5	6
Tensão média de linha (V)	495,37	381,05	266,74	190,53	114,31	57,16
Corrente média de linha (A)	11,31	4,29	2,152	1,502	0,937	0,746
Potência de entrada (kW)	1,031	0,238	0,1086	0,07735	0,05383	0,04332
Temperatura média do enrolamento ($^{\circ}\text{C}$)	87,8	86,0	85,5	84,2	82,6	80,9

As perdas por atrito e ventilação obtidas foram 40 W.

4.2. Parâmetros do circuito equivalente.

De posse dos resultados dos ensaios, a metodologia de cálculo foi desenvolvida. Ela foi iterativa, principalmente porque a determinação exata das reatâncias de dispersão é dificultada pela impossibilidade de se medir em todas suas componentes. Além disto, o ensaio de rotor bloqueado não pôde ser realizado em baixas frequências.

Os parâmetros apresentados na tabela a seguir foram considerados consistentes.

Na comparação entre estes valores e os obtidos no modelo analítico proposto, percebe-se que os maiores erros se encontram nas reatâncias de dispersão e magnetização. A modelagem foi considerada satisfatória e válida para a otimização em [3].

Grandezas	Obtido através dos ensaios
$R_1 (\Omega)$	1,341
$R'_2 (\Omega)$	1,20
$X_1(\Omega)$	2,5
$X'_2(\Omega)$	2,8
$X_m(\Omega)$	51,37
$R_{fe}(\Omega)$	1048
Perdas no cobre (W)*	252
Perdas rotóricas (W)*	156
Perdas no núcleo (W)*	126

* Obtida do ensaio de elevação de temperatura a 100% de carga.

ANEXO 5

LISTAGEM DAS ROTINAS IMPLEMENTADAS NO PROGRAMA ANSYS

Este anexo apresenta a listagem das rotinas implementadas no programa ANSYS, contendo os comentários de cada etapa.

5.1. Ensaio Rotor Removido e Ensaio em Vazio

A seguir é apresentada a rotina para simular o ensaio rotor removido. Para simular o ensaio em vazio, basta aplicar as propriedades do ferro e do alumínio para as áreas do rotor e alterar o valor da corrente injetada nos enrolamentos do estator.

!MOTOR_ROTOR_REMOVIDO.TXT (Pré - Processamento)

/PREP7

/TITLE,CAMPO MAGNÉTICO EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

```
ET,1,PLANE13      ! ELEMENTO ELECTROMAGNETICO
!ET,2,53,3,,,,    ! PLANO 53 (Elemento 8 nós) - CIRCUIT-COUPLED STRANDED COIL
!ET,3,124,5       ! STRANDED COIL - CIRCUITO EXTERNO
!ET,4,124,3,0     ! FONTE DE CORRENTE SENOIDAL INDEPENDENTE
!ET,5,53,4,,,,    ! PLANO 53 (Elemento 8 nós) - CIRCUIT-COUPLED MASSIVE CONDUCTOR
!ET,6,124,6       ! MASSIVE CONDUCTOR - CIRCUITO EXTERNO
EMUNIT,MKS        ! UNIDADE MKS
```

!DEFINE PROPRIEDADES DO MATERIAL

```
TB,BH,1           !MATERIAL 1 - CURVA BxH (FERRO ESTATOR E ROTOR)
TBPT,DEFI,96.83,,6 !ENTRADA DE DADOS (H,B)
TBPT,,115.08,,8
TBPT,,139.68,1
TBPT,,187.30,1.2
TBPT,,242.06,1.3
TBPT,,373.02,1.4
TBPT,,761.9,1.5
TBPT,,1825.40,1.6
TBPT,,3968.25,1.7
TBPT,,7539.68,1.8
```

!TBPLOT,BH,1 !MOSTRA CURVA B X H

```
MP,MURX,2,1      !MATERIAL 2 - ENROLAMENTO ESTATOR DE COBRE (PERMEAB. RELATIVA)
MP,MURX,3,1      !MATERIAL 3 - AR (PERMEABILIDADE RELATIVA)
```

```

MP,MURX,4,1      !MATERIAL 4 - BARRA DO ROTOR DE ALUMINIO (PERMEAB. RELATIVA)
MP,MURX,5,1      !MATERIAL 5 - EIXO (PERMEABILIDADE RELATIVA)
!MP,RSVX,2,1.724E-8      !RESISTIBIDADE DO COBRE (Material 2)
!MP,RSVX,4,3.1E-8      !RESISTIBIDADE DO ALUMINIO (Material 4)

```

```

PI=ACOS(-1)      !PI=3.1415
AA=90/11         !PASSO DA RANHURA DO ROTOR
BB=AA/2
DEZ=10

```

```

CSYS,1          !CORDENADA CILINDRICA

```

```

!DEFINE "KEYPOINTS" [k,RAIO(m),ANGULO(graus)]

```

```

K,1
K,2,.0195
K,3,.04975
K,4,.04991
K,5,.0195,AA
K,6,.04975,AA
K,7,.04991,AA
K,8,.038615,2.31602
K,9,.047599,1.88035
K,10,.0374,BB
K,11,.038615,5.86580
K,12,.047599,6.30147
K,13,.0494,BB
K,14,.05012
K,15,.07965
K,16,.04991,10
K,17,.05012,10
K,18,.07965,10
K,19,.05012,3.57089
K,20,.050735,3.58822
K,21,.051166,2.52334
K,22,.06380,2.03441
K,23,.05012,6.42911
K,24,.050735,6.41178
K,25,.051166,7.47666
K,26,.06380,7.96559
K,27,.06702,5
K,28,.060119,2.14971
K,29,.060119,7.85029
K,30,.038615
K,31,.047599
K,32,.038596,BB
K,33,.047564,BB
K,34,.038615,AA
K,35,.047599,AA
K,36,.063719
K,37,.063719,5
K,38,.063719,10
K,39,.0354
K,40,.0354,AA
K,41,.051166
K,42,.051166,10
K,43,.060119
K,44,.060119,10
K,45,.07
K,46,.07,10
K,47,.051166,5
K,48,.060119,5
K,PLOT,ALL      !VISUALIZA TODOS OS PONTOS

```

```

!DEFINE LINHAS A PARTIR DE PONTOS

```

```

L,1,2          !LINHA 1
L,2,39        !LINHA 2
L,30,31       !LINHA 3
L,31,3        !LINHA 4

```

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 125

L,3,4 !LINHA 5
L,1,5 !LINHA 6
L,5,40 !LINHA 7
L,34,35 !LINHA 8
L,35,6 !LINHA 9
L,6,7 !LINHA 10
LARC,4,7,1,0.04991 !LINHA 11
L,2,5 !LINHA 12
L,8,9 !LINHA 13
L,11,12 !LINHA 14
LARC,8,10,32,.001196, !LINHA 15 - DEFINE ARCO
LARC,11,10,32,.001196, !LINHA 16 - DEFINE ARCO
L,30,8 !LINHA 17
L,8,32 !LINHA 18
L,32,11 !LINHA 19
L,11,34 !LINHA 20
LARC,9,13,33,.001836, !LINHA 21 - DEFINE ARCO
LARC,12,13,33,.001836, !LINHA 22 - DEFINE ARCO
L,31,9 !LINHA 23
L,9,33 !LINHA 24
L,33,12 !LINHA 25
L,12,35 !LINHA 26
LARC,3,6,1,0.04975 !LINHA 27
LARC,7,16,1,0.04991 !LINHA 28
L,16,17 !LINHA 29
L,4,14 !LINHA 30
L,14,41 !LINHA 31
L,19,20 !LINHA 32
L,20,21 !LINHA 33
L,21,28 !LINHA 34
L,28,22 !LINHA 35
L,41,43 !LINHA 36
L,36,45 !LINHA 37
L,15,18 !LINHA 38
L,42,44 !LINHA 39
L,38,46 !LINHA 40
L,17,42 !LINHA 41
L,23,24 !LINHA 42
L,24,25 !LINHA 43
L,25,29 !LINHA 44
L,29,26 !LINHA 45
L,28,48 !LINHA 46
L,22,37 !LINHA 47
L,37,26 !LINHA 48
LARC,22,27,37,.003301 !LINHA 49 - DEFINE ARCO
LARC,26,27,37,.003301 !LINHA 50 - DEFINE ARCO
LARC,19,23,1,0.05012 !LINHA 51
L,20,24 !LINHA 52
LDIV,10,,2,0
!!!!*****L,14,17 !LINHA 53
L,39,30 !LINHA 54
L,40,34 !LINHA 55
L,32,33 !LINHA 56
L,39,40 !LINHA 57
L,22,36 !LINHA 58
L,26,38 !LINHA 59
LDIV,5,,2,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !LINHA 60
LARC,14,19,1,0.05012 !LINHA 61
LARC,23,17,1,0.05012 !LINHA 62
L,21,41 !LINHA 63
L,25,42 !LINHA 64
L,43,28 !LINHA 65
L,44,29 !LINHA 66
L,44,38 !LINHA 67
L,43,36 !LINHA 68
L,45,46 !LINHA 69
L,45,15 !LINHA 70
L,46,18 !LINHA 71
L,47,48 !LINHA 72
L,48,37 !LINHA 73
L,29,48 !LINHA 74

```

L,21,47      !LINHA 75
L,25,47      !LINHA 76
!LDIV,10,,,2,0
!LDIV,5,,,2,0
LDIV,30,,,2,0      !LINHA 77
LDIV,29,,,2,0      !LINHA 78
LARC,49,50,1,0.04983      !LINHA 79
LARC,51,52,1,0.050015      !LINHA 80
LPLOT,ALL      !PLOTA TODAS AS LINHAS

      !DEFINE AREAS ATRAVES DE PONTOS

A,1,2,5      !AREA 1 - EIXO
A,2,39,40,5      !AREA 2 - ROTOR 1
A,39,30,8,10,11,34,40      !AREA 3 - ROTOR 2
A,30,31,9,8      !AREA 4 - ROTOR 3
A,34,35,12,11      !AREA 5 - ROTOR 4
AL,4,27,9,26,22,21,23      !AREA 6 - ROTOR 5
FLST,2,4,3
FITEM,2,8
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,32
A,P51X      !AREA 7 - RANHURA ROTOR 1
FLST,2,4,3
FITEM,2,9
FITEM,2,13
FITEM,2,12
FITEM,2,33
A,P51X      !AREA 8 - RANHURA ROTOR 2
A,8,9,33,32      !AREA 9 - RANHURA ROTOR 3
A,11,12,33,32      !AREA 10 - RANHURA ROTOR 4

AL,5,79,10,27      !AREA 11 - ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ROTOR)
AL,60,11,53,79
AL,30,80,29,28,11
AL,77,61,51,62,78,80

A,14,41,21,20,19      !AREA 13 - ESTATOR 1
A,41,43,28,21      !AREA 14 - ESTATOR 2
A,17,42,25,24,23      !AREA 15 - ESTATOR 3
A,42,44,29,25      !AREA 16 - ESTATOR 4
A,43,36,22,28      !AREA 17 - ESTATOR 5
A,44,38,26,29      !AREA 18 - ESTATOR 6
A,36,45,46,38,26,27,22      !AREA 19 - ESTATOR 7
A,45,15,18,46      !AREA 20 - ESTATOR 8
AL,51,32,52,42      !AREA 21 - ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 1
A,20,21,47,25,24      !AREA 22 - ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 2
A,21,28,48,47      !AREA 23 - RANHURA DO ESTATOR 3
A,25,29,48,47      !AREA 24 - RANHURA DO ESTATOR 4
A,28,22,37,48      !AREA 25 - ENROLAMENTO 1
A,29,26,37,48      !AREA 26 - ENROLAMENTO 2
FLST,2,4,3
FITEM,2,22
FITEM,2,27
FITEM,2,26
FITEM,2,37
A,P51X      !AREA 27 - ENROLAMENTO 3
APLOT,ALL

!/PNUM,KP,0
!/PNUM,LINE,0
!/PNUM,AREA,0
!/PNUM,VOLU,0
!/PNUM,NODE,0
!/PNUM,SVAL,0
!/NUM,-1

!/PNUM,ELEM,0
!/RELOT

ASEL,S,AREA,,1      !SELECIONA AREA 1 (EIXO)

```

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 127

```
AATT,3      !ASSOCIA MATERIAL 3 PARA A AREA SELECIONADA
            !REMOVE EIXO DO ROTOR

ASEL,S,,,2,6,1  !SELECIONA AREAS 2 A 6 (FERRO DO ROTOR)
AATT,3      !ASSOCIA MATERIAL 3 PARA AS AREAS SELECIONADAS
            !REMOVE ROTOR

ASEL,S,,,7,10,1 !SELECIONA AREAS 7 A 10 (ALUMÍNIO DAS BARRAS)
AATT,3      !ASSOCIA MATERIAL 3 PARA AS AREAS SELECIONADAS
            !REMOVE RANHURA DO ROTOR

ASEL,S,,,11,14,1 !SELECIONA AREAS 11 A 14 (ENTREFERRO)
AATT,3      !ASSOCIA MATERIAL 3 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,,15,22,1 !SELECIONA AREAS 15 A 22 (FERRO DO ESTATOR)
AATT,1      !ASSOCIA MATERIAL 1 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,,23,24,1 !SELECIONA AREAS 23 A 24 (AR NA RANHURA DO ESTATOR)
AATT,3      !ASSOCIA MATERIAL 3 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,,25,29,1 !SELECIONA AREAS 25 A 29 (COBRE NA RANHURA DO ESTATOR)
AATT,2      !ASSOCIA MATERIAL 2 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,ALL      !SELECIONA TODAS AS AREAS
APLOT,ALL     !VISUALIZA TODAS AS AREAS

/COLOR,OUTL,BLAC      ! COLOCAR COR ÀS LINHAS

      !DEFINE MALHA

ESHAPE,1      !ELEMENTOS TRIANGULARES
LESIZE,1,,,2,.5
LESIZE,6,,,2,.5
LESIZE,12,,,2
AMESH,1      !EIXO

LESIZE,2,,,11
LESIZE,57,,,4
LESIZE,7,,,11
AMESH,2      !ROTOR 1

LESIZE,54,,,2
LESIZE,17,,,2
LESIZE,15,,,22.5
LESIZE,16,,,22.5
LESIZE,20,,,2
LESIZE,55,,,2
AMESH,3      !ROTOR 2

LESIZE,18,,,2
LESIZE,19,,,2
AMESH,7      !RANHURA DO ROTOR 1

LESIZE,3,,,10
LESIZE,23,,,2
LESIZE,13,,,10
AMESH,4      !ROTOR 3

LESIZE,14,,,10
LESIZE,26,,,2
LESIZE,8,,,10
AMESH,5      !ROTOR 4

LESIZE,56,,,10
LESIZE,24,,,2
AMESH,9      !RANHURA DO ROTOR 3

LESIZE,25,,,2
AMESH,10     !RANHURA DO ROTOR 4

LESIZE,21,,,22.5
LESIZE,22,,,22.5
```

```

AMESH,8      !RANHURA DO ROTOR 2

LESIZE,4,,4
LESIZE,27,,AA/18      !!!!!AA/9
LESIZE,9,,4
AMESH,6      !ROTOR 5

!ESHAPE,0
LESIZE,5,,1
LESIZE,79,,AA/18
LESIZE,10,,1
AMESH,11     !ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ROTOR)

LESIZE,60,,1
LESIZE,11,,AA/18
LESIZE,53,,1
AMESH,12     !ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ROTOR)

LESIZE,80,,DEZ/22
LESIZE,30,,1
LESIZE,29,,1
LESIZE,28,,DEZ/22
AMESH,13     !ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ESTATOR)

LESIZE,77,,1
LESIZE,78,,1
LESIZE,51,,DEZ/22
LESIZE,61,,DEZ/22
LESIZE,62,,DEZ/22
AMESH,14     !ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ESTATOR)

LESIZE,32,,2
LESIZE,52,,6
LESIZE,42,,2
AMESH,23     !ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 1

LESIZE,63,,5
LESIZE,33,,2
LESIZE,31,,3
AMESH,15     !ESTATOR 1

LESIZE,43,,2
LESIZE,64,,5
LESIZE,41,,3
AMESH,17     !ESTATOR 3

LESIZE,36,,15
LESIZE,65,,4
LESIZE,34,,15
AMESH,16     !ESTATOR 2

LESIZE,39,,15
LESIZE,66,,4
LESIZE,44,,15
AMESH,18     !ESTATOR 4

LESIZE,68,,5
LESIZE,58,,4
LESIZE,35,,5
AMESH,19     !ESTATOR 5

LESIZE,67,,5
LESIZE,59,,4
LESIZE,45,,5
AMESH,20     !ESTATOR 6

LESIZE,37,,7
LESIZE,69,,12
LESIZE,40,,7
LESIZE,50,,15
LESIZE,49,,15
AMESH,21     !ESTATOR 7

```

```
LESIZE,70,,7
LESIZE,38,,12
LESIZE,71,,7
AMESH,22      !ESTATOR 8

LESIZE,75,,4
LESIZE,76,,4
AMESH,24      !ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 2

LESIZE,46,,4
LESIZE,72,,15
AMESH,25      !RANHURA DO ESTATOR 3

LESIZE,74,,4
AMESH,26      !RANHURA DO ESTATOR 4

LESIZE,47,,4
LESIZE,73,,5
AMESH,27      !ENROLAMENTO 1

LESIZE,48,,4
AMESH,28      !ENROLAMENTO 2
AMESH,29      !ENROLAMENTO 3

FLST,3,12,5,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-12
AGEN,44,P51X, , , ,AA, , ,0    !GERA AS AREAS SELECIONADAS 44 VEZES (ROTOR)

FLST,3,17,5,ORDE,2
FITEM,3,13
FITEM,3,-29
AGEN,36,P51X, , , ,10, , ,0    !GERA AS AREAS SELECIONADAS 36 VEZES (ESTATOR)

NUMMRG,NODE,1E-9
NUMMRG,KP,1E-9
NUMCMP,ALL

/NUM,1                      !VISUALIZA COM CORES
/PNUM,MAT,1                !VISUALIZA CORES DISTINTAS PARA CADA MATERIAL
EPLOT,ALL                  !VISUALIZA TODOS OS ELEMENTOS

*DIM,ESTATOR,ARRAY,6,30,1          !CRIA UM ARRAY (ESTATOR 6x30)
*CREATE,ansuitmp
*vread,ESTATOR(1,1),N36_ESTATOR,TXT,,30, !LÊ ARQUIVO *.TXT E COPIA NO ARRAY
(6F4.0)                          !FORMATAR A CÓPIA NO ARRAY
*END
/INPUT,ansuitmp

*DIM,L_IND,ARRAY,4,3,0,          !CRIA UM ARRAY (L_IND 4X3)

!*DIM,ROTOR,ARRAY,2,88,1        !CRIA UMA ARRAY (ROTOR 2X88)
!*CREATE,ansuitmp
!*vread,ROTOR(1,1),N44_ROTOR,TXT,,88, !LÊ ARQUIVO *.TXT E COPIA NO ARRAY
!(2F4.0)                          !FORMATAR A CÓPIA NO ARRAY
!*END
/INPUT,ansuitmp

Finish

!Js_Estator.txt (Processamento)

/PREP7
CSYS,1
!NVA= 2
NSEL,S,LOC,X,0.07965             ! SELEÇÃO DO CONTORNO EXTERNO
NSEL,A,LOC,X,0                   ! SELEÇÃO DA ORIGEM
D,ALL,AZ,0                       ! CONDIÇÃO DE CONTORNO DIRICHLET
NSEL,ALL
```

```

ESEL,ALL
ASEL,ALL

Js=(4.1/(1*0.859028E-4/26)) !lvazio(4.1) / N_ESPIRAS(1) * Aranhura(85,9mm2)
JsA=Js !CONSIDERA WT=0
JsC=-Js/2 !SUGIRO SINAL NEGATIVO (COS 120)
JsB=-Js/2 !SUGIRO SINAL NEGATIVO (COS -120)

*DO,LINHA,1,6
*IF,LINHA,EQ,1,THEN !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,30 !36,35,34,18,17,16
*IF,COL,EQ,1,THEN !CORRESPONDENTE A FASE A
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,,JsA !APLICA Js PARA FASE A
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,2,THEN !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,30 !27,26,25,9,8,7
*IF,COL,EQ,1,THEN !CORRESPONDENTE A FASE -A
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,,JsA !APLICA Js PARA FASE -A
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,3,THEN !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,30 !30,29,28,12,11,10
*IF,COL,EQ,1,THEN !CORRESPONDENTE A FASE B
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,,JsB !APLICA Js PARA FASE B
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,4,THEN !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,30 !21,20,19,3,2,1
*IF,COL,EQ,1,THEN !CORRESPONDENTE A FASE -B

```

```
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,, -JsB          !APLICA Js PARA FASE -B
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,5,THEN          !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,30                !24,23,22,6,5,4
*IF,COL,EQ,1,THEN          !CORRESPONDENTE A FASE C
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,,JsC          !APLICA Js PARA FASE C
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,6,THEN          !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,30                !33,32,31,15,14,13
*IF,COL,EQ,1,THEN          !CORRESPONDENTE A FASE -C
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,, -JsC          !APLICA Js PARA FASE -C
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*ENDDO

FINISH

/SOLUTION
ANTYPE,STATIC                !ANÁLISE ESTÁTICA (DC)
SOLVE
FINISH
```

!Calc_Indut_3.txt (Pós Processamento)

```
!Calcula a indutância em cada fase com injeção de correntes nas 3 fases
/PREP7
AA=0.859028E-4/26
ENT=1
```

```

LA=0.13
COL1=1
COL2=5
*DO,RAN,1,6
*DO,COL,COL1,COL2
  AREA= ESTATOR(1,COL)
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,AREA
  *IF,COL,EQ,COL1,THEN
    ASEL,S,,,P51X          ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,S,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,S,1             ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ELSE
    ASEL,A,,,P51X        ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,A,1             ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,A,1            ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ENDIF
*ENDDO
COL1=COL1+5
COL2=COL2+5
*GET,NIE,ELEM,,NUM,MIN      ! OBTER O MENOR ELEMENTO DOS ELEMENTOS SELECIONADOS

*IF,RAN,EQ,1,THEN
  *GET,NEL,ELEM,,COUNT    ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
  *IF,ENT,EQ,1,THEN
    *DIM,NODELEM,ARRAY,NEL*6,4,0,          ! CRIAR UM ARRAY
    *DIM,ARELEM,ARRAY,NEL*6,1,0,
    *DIM,SANODAL,ARRAY,NEL*6,1,0,
    *DIM,CALC,ARRAY,NEL*6,1,0,
    *DIM,COUNT,ARRAY,NEL*6,1,0,
  *ENDIF
  *VGET,NODELEM(1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,,2  ! PRENCHER A TABELA
  *VGET,NODELEM(1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,,2
  *VGET,NODELEM(1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,,2
  *VGET,NODELEM(1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,,2
  *VGET,ARELEM(1,1),ELEM,NIE,GEOM,,,2
*ELSE
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,,2
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,,2
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,,2
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,,2
  *VGET,ARELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,GEOM,,,2
*ENDIF
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDDO

*DO,FILA,1,NEL*6
SANODAL(FILA,1)= 0
*ENDDO

*DO,FILA,1,(NEL*6)
ANODAL= 0
COUN= 0
*DO,COL,1,4 !8
  *IF,NODELEM(FILA,COL),NE,0,THEN
    *GET,ANODAL,NODE,NODELEM(FILA,COL),A,Z  ! OBTER DADO ALMACEADO (VETOR POTENCIAL->A)
    SANODAL(FILA,1)= ANODAL+SANODAL(FILA,1) ! SUMAR OS 4 VETORES POTENCIAIS DE CADA
ELEMENTO
    COUN= COUN+1
  *ENDIF
*ENDDO
COUNT(FILA,1)= COUN
*ENDDO

*VOPER,CALC(1,1),ARELEM(1,1),MULT,SANODAL(1,1),,, ! MULTIPLICAR O VETOR POTENCIAL E O AREA
*VOPER,CALC(1,1),CALC(1,1),DIV,COUNT(1,1),,,    ! DIVIDIR PARA 4 O RESULTADO ANTERIOR
SUMA= 0
*DO,FILA,1,(NEL*6)
  SUMA= CALC(FILA,1)+SUMA          ! SUMATORIA TOTAL
*ENDDO

```

```
/POST1
*GET,J_COND,ELEM,NIE,JT,Z
I_COND= J_COND*AA
L_IND(ENT,1)= 26*LA*SUMA/(26*AA*I_COND)      ! CALCULAR A INDUTANCIA

/PREP7
COL1=1
COL2=5
*DO,RAN,1,6
*DO,COL,COL1,COL2
  AREA= ESTATOR(2,COL) !FASE (-A)
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,AREA
  *IF,COL,EQ,COL1,THEN
    ASEL,S,,P51X          ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,S,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,S,1              ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ELSE
    ASEL,A,,P51X          ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,A,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,A,1              ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ENDIF
*ENDDO
COL1=COL1+5
COL2=COL2+5

*GET,NIE,ELEM,,NUM,MIN      ! OBTER O MENOR ELEMENTO DOS ELEMENTOS SELECIONADOS

*IF,RAN,EQ,1,THEN
*GET,NEL,ELEM,,COUNT      ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
*VGET,NODELEM(1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,2    ! PENCHER A TABELA
*VGET,NODELEM(1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,2
*VGET,NODELEM(1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,2
*VGET,NODELEM(1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,2
*VGET,ARELEM(1,1),ELEM,NIE,GEOM,,2
*ELSE
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,2
*VGET,ARELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,GEOM,,2
*ENDIF
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDDO

*DO,FILA,1,NEL*6
SANODAL(FILA,1)= 0
*ENDDO

*DO,FILA,1,(NEL*6)
ANODAL= 0
COUN= 0
*DO,COL,1,4 !8
  *IF,NODELEM(FILA,COL),NE,0,THEN
    *GET,ANODAL,NODE,NODELEM(FILA,COL),A,Z    ! OBTER DADO ALMACEADO (VETOR POTENCIAL->A)
    SANODAL(FILA,1)= ANODAL+SANODAL(FILA,1)  ! SUMAR OS 4 VETORES POTENCIALES DE CADA
ELEMENTO
    COUN= COUN+1
  *ENDIF
*ENDDO
COUNT(FILA,1)= COUN
*ENDDO

*VOPER,CALC(1,1),ARELEM(1,1),MULT,SANODAL(1,1),, ! MULTIPLICAR O VETOR POTENCIAL E O AREA
*VOPER,CALC(1,1),CALC(1,1),DIV,COUNT(1,1),,    ! DIVIDIR PARA 4 O RESULTADO ANTERIOR
SUMA= 0
*DO,FILA,1,(NEL*6)
  SUMA= CALC(FILA,1)+SUMA      ! SUMATORIA TOTAL
*ENDDO
```

```

/POST1
*GET,J_COND,ELEM,NIE,JT,Z
I_COND1= J_COND*AA
L_IND(ENT,1)= L_IND(ENT,1)+(26*LA*SUMA/(26*AA*I_COND1))

!***** FASE B *****

/PREP7
COL1=1
COL2=5
*DO,RAN,1,6
*DO,COL,COL1,COL2
  AREA= ESTATOR(3,COL) !FASE (B)
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,AREA
  *IF,COL,EQ,COL1,THEN
    ASEL,S,,P51X          ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,S,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,S,1              ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ELSE
    ASEL,A,,P51X          ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,A,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,A,1              ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ENDIF
*ENDDO
COL1=COL1+5
COL2=COL2+5

*GET,NIE,ELEM,,NUM,MIN          ! OBTER O MENOR ELEMENTO DOS ELEMENTOS SELECIONADOS

*IF,COL,EQ,1,THEN
  *GET,NEL,ELEM,,COUNT          ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
  *VGET,NODELEM(1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,2 ! PRENCHE A TABELA
  *VGET,NODELEM(1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,2
  *VGET,NODELEM(1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,2
  *VGET,NODELEM(1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,2
  *VGET,ARELEM(1,1),ELEM,NIE,GEOM,,2
*ELSE
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,2
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,2
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,2
  *VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,2
  *VGET,ARELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,GEOM,,2
*ENDIF
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDDO

*DO,FILA,1,NEL*6
SANODAL(FILA,1)= 0
*ENDDO

*DO,FILA,1,(NEL*6)
ANODAL= 0
COUN= 0
*DO,COL,1,4 !8
  *IF,NODELEM(FILA,COL),NE,0,THEN
    *GET,ANODAL,NODE,NODELEM(FILA,COL),A,Z ! OBTER DADO ALMACEADO (VETOR POTENCIAL->A)
    SANODAL(FILA,1)= ANODAL+SANODAL(FILA,1) ! SUMAR OS 4 VETORES POTENCIAIS DE CADA
ELEMENTO
    COUN= COUN+1
  *ENDIF
*ENDDO
COUNT(FILA,1)= COUN
*ENDDO

*VOPER,CALC(1,1),ARELEM(1,1),MULT,SANODAL(1,1),, ! MULTIPLICAR O VETOR POTENCIAL E O AREA
*VOPER,CALC(1,1),CALC(1,1),DIV,COUNT(1,1),, ! DIVIDIR PARA 4 O RESULTADO ANTERIOR
SUMA= 0
*DO,FILA,1,(NEL*6)

```

CÁLCULO DE PARÁMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 135

```
SUMA= CALC(FILA,1)+SUMA          ! SUMATORIA TOTAL
*ENDDO

! L_IND(ENT,2)= 2*LA*SUMA/(2*AA*I_COND1)      ! CALCULAR A INDUTANCIA

/POST1
*GET,J_COND,ELEM,NIE,JT,Z
I_COND= J_COND*AA
L_IND(ENT,2)= 26*LA*SUMA/(26*AA*I_COND)      ! CALCULAR A INDUTANCIA

/PREP7
COL1=1
COL2=5
*DO,RAN,1,6
*DO,COL,COL1,COL2
AREA= ESTATOR(4,COL) !FASE (-B)
FLST,5,1,5
FITEM,5,AREA
*IF,COL,EQ,COL1,THEN
ASEL,S,,P51X          ! SELECIONAR UMA AREA
ESLA,S,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
NSLE,S,1              ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
*ELSE
ASEL,A,,P51X          ! SELECIONAR UMA AREA
ESLA,A,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
NSLE,A,1              ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
*ENDIF
*ENDDO
COL1=COL1+5
COL2=COL2+5

*GET,NIE,ELEM,,NUM,MIN          ! OBTEN O MENOR ELEMENTO DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
! *GET,N1,NODE,,NUM,MIN          ! OBTEN O MENOR NUMERO DE NODO ENTRE OS SELECIONADOS

*IF,COL,EQ,1,THEN
*GET,NEL,ELEM,,COUNT          ! OBTEN O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
*VGET,NODELEM(1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,2    ! PRENCHE A TABELA
*VGET,NODELEM(1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,2
*VGET,NODELEM(1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,2
*VGET,NODELEM(1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,2
*VGET,ARELEM(1,1),ELEM,NIE,GEOM,,2
*ELSE
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,2
*VGET,ARELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,GEOM,,2
*ENDIF
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDDO

*DO,FILA,1,NEL*6
SANODAL(FILA,1)= 0
*ENDDO

*DO,FILA,1,(NEL*6)
ANODAL= 0
COUN= 0
*DO,COL,1,4  !8
*IF,NODELEM(FILA,COL),NE,0,THEN
*GET,ANODAL,NODE,NODELEM(FILA,COL),A,Z    ! OBTEN DADO ALMACENADO (VETOR POTENCIAL->A)
SANODAL(FILA,1)= ANODAL+SANODAL(FILA,1)    ! SUMAR OS 4 VETORES POTENCIALES DE CADA
ELEMENTO
COUN= COUN+1
*ENDIF
*ENDDO
COUNT(FILA,1)= COUN
*ENDDO
```

```

*VOPER,CALC(1,1),ARELEM(1,1),MULT,SANODAL(1,1),,, ! MULTIPLICAR O VETOR POTENCIAL E O AREA
*VOPER,CALC(1,1),CALC(1,1),DIV,COUNT(1,1),,, ! DIVIDIR PARA 4 O RESULTADO ANTERIOR
SUMA= 0
*DO,FILA,1,(NEL*6)
  SUMA= CALC(FILA,1)+SUMA ! SUMATORIA TOTAL
*ENDDO

! L_IND(ENT,2)= L_IND(ENT,2)+(2*LA*SUMA/(2*AA*I_COND))

/POST1
*GET,J_COND,ELEM,NIE,JT,Z
I_COND1= J_COND*AA
L_IND(ENT,2)= L_IND(ENT,2)+(26*LA*SUMA/(26*AA*I_COND1))

!***** FASE C *****

/PREP7
COL1=1
COL2=5
*DO,RAN,1,6
*DO,COL,COL1,COL2
  AREA= ESTATOR(5,COL) !FASE (C)
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,AREA
  *IF,COL,EQ,COL1,THEN
    ASEL,S,,,P51X ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,S,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,S,1 ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ELSE
    ASEL,A,,,P51X ! SELECIONAR UMA AREA
    ESLA,A,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
    NSLE,A,1 ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
  *ENDIF
*ENDDO
COL1=COL1+5
COL2=COL2+5

*GET,NIE,ELEM,,NUM,MIN ! OBTER O MENOR ELEMENTO DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
! *GET,N1,NODE,,NUM,MIN ! OBTER O MENOR NUMERO DE NODO ENTRE OS SELECIONADOS

*IF,COL,EQ,1,THEN
*GET,NEL,ELEM,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
*VGET,NODELEM(1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,,2 ! PRENCHER A TABELA
*VGET,NODELEM(1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,,2
*VGET,NODELEM(1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,,2
*VGET,NODELEM(1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,,2
*VGET,ARELEM(1,1),ELEM,NIE,GEOM,,,2
*ELSE
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,,2
*VGET,ARELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,GEOM,,,2
*ENDIF
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDDO

*DO,FILA,1,(NEL*6)
SANODAL(FILA,1)= 0
*ENDDO

*DO,FILA,1,(NEL*6)
ANODAL= 0
COUN= 0
*DO,COL,1,4 18
  *IF,NODELEM(FILA,COL),NE,0,THEN
    *GET,ANODAL,NODE,NODELEM(FILA,COL),A,Z ! OBTER DADO ALMACEADO (VETOR POTENCIAL->A)
    SANODAL(FILA,1)= ANODAL+SANODAL(FILA,1) ! SUMAR OS 4 VETORES POTENCIAIS DE CADA
ELEMENTO

```

```
COUN= COUN+1
*ENDIF
*ENDDO
COUNT(FILA,1)= COUN
*ENDDO

*VOPER,CALC(1,1),ARELEM(1,1),MULT,SANODAL(1,1),,, ! MULTIPLICAR O VECTOR POTENCIAL E O AREA
*VOPER,CALC(1,1),CALC(1,1),DIV,COUNT(1,1),,, ! DIVIDIR PARA 4 O RESULTADO ANTERIOR
SUMA= 0
*DO,FILA,1,(NEL*6)
SUMA= CALC(FILA,1)+SUMA ! SUMATORIA TOTAL
*ENDDO

! L_IND(ENT,3)= 26*LA*SUMA/(26*AA*I_COND1) ! CALCULAR A INDUTANCIA

/POST1
*GET,J_COND,ELEM,NIE,JT,Z
I_COND= J_COND*AA
L_IND(ENT,3)= 26*LA*SUMA/(26*AA*I_COND) ! CALCULAR A INDUTANCIA

/PREP7
COL1=1
COL2=5
*DO,RAN,1,6
*DO,COL,COL1,COL2
AREA= ESTATOR(6,COL) !FASE (-C)
FLST,5,1,5
FITEM,5,AREA
*IF,COL,EQ,COL1,THEN
ASEL,S,,,P51X ! SELECIONAR UMA AREA
ESLA,S,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
NSLE,S,1 ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
*ELSE
ASEL,A,,,P51X ! SELECIONAR UMA AREA
ESLA,A,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA SELECIONADA
NSLE,A,1 ! SELECIONAR OS NODOS DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
*ENDIF
*ENDDO
COL1=COL1+5
COL2=COL2+5

*GET,NIE,ELEM,,NUM,MIN ! OBTEN O MENOR ELEMENTO DOS ELEMENTOS SELECIONADOS
! *GET,N1,NODE,,NUM,MIN ! OBTEN O MENOR NUMERO DE NODO ENTRE OS SELECIONADOS

*IF,COL,EQ,1,THEN
*GET,NEL,ELEM,,COUNT ! OBTEN O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
*VGET,NODELEM(1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,,2 ! PRENCHER A TABELA
*VGET,NODELEM(1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,,2
*VGET,NODELEM(1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,,2
*VGET,NODELEM(1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,,2
*VGET,ARELEM(1,1),ELEM,NIE,GEOM,,,2
*ELSE
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,NODE,1,,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,2),ELEM,NIE,NODE,2,,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,3),ELEM,NIE,NODE,3,,,2
*VGET,NODELEM((NEL*(RAN-1))+1,4),ELEM,NIE,NODE,4,,,2
*VGET,ARELEM((NEL*(RAN-1))+1,1),ELEM,NIE,GEOM,,,2
*ENDIF
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDDO

*DO,FILA,1,NEL*6
SANODAL(FILA,1)= 0
*ENDDO

*DO,FILA,1,(NEL*6)
ANODAL= 0
COUN= 0
*DO,COL,1,4 !8
```

```

*IF,NODELEM(FILA,COL),NE,0,THEN
*GET,ANODAL,NODE,NODELEM(FILA,COL),A,Z      ! OBTER DADO ALMACEADO (VETOR POTENCIAL->A)
SANODAL(FILA,1)= ANODAL+SANODAL(FILA,1)      ! SUMAR OS 4 VETORES POTENCIALES DE CADA
ELEMENTO
COUN= COUN+1
*ENDIF
*ENDDO
COUNT(FILA,1)= COUN
*ENDDO

*VOPER,CALC(1,1),ARELEM(1,1),MULT,SANODAL(1,1),,, ! MULTIPLICAR O VETOR POTENCIAL E O AREA
*VOPER,CALC(1,1),CALC(1,1),DIV,COUNT(1,1),,,      ! DIVIDIR PARA 4 O RESULTADO ANTERIOR
SUMA= 0
*DO,FILA,1,(NEL*6)
SUMA= CALC(FILA,1)+SUMA                        ! SUMATORIA TOTAL
*ENDDO

! L_IND(ENT,3)= L_IND(ENT,3)+(2*LA*SUMA/(2*AA*I_COND))

/POST1
*GET,J_COND,ELEM,NIE,JT,Z
I_COND1= J_COND*AA
L_IND(ENT,3)= L_IND(ENT,3)+(26*LA*SUMA/(26*AA*I_COND1))

*CFOPEN,LIND_3,txt                            ! CREAM UM ARQUIVO TXT
*VWRITE,L_IND(1,1),L_IND(1,2),L_IND(1,3)      ! ESCRIVIR O ARQUIVO
(1X,' 'F14.12,' 'F14.12,' 'F14.12)          ! FORMATO DO ARQUIVO
*CFCLOS
/INPUT,ansuitmp

```

5.2. Ensaio Rotor Bloqueado

A seguir é apresentada a rotina para simular o ensaio rotor bloqueado. Para este ensaio é necessário fazer iteração entre a solução harmônica (não-linear) e a solução estática (linear).

Solução Harmônica (não-linear)

!MOTOR_COBRE.TXT (Pré - Processamento da 1ª iteração)

/PREP7

/TITLE,CAMPO MAGNÉTICO EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

ET,1,PLANE13 ! ELEMENTO ELECTROMAGNETICO
ET,2,53,3,... ! PLANO 53 (Elemento 8 nós) - CIRCUIT-COUPLED STRANDED COIL
ET,3,124,5 ! STRANDED COIL - CIRCUITO EXTERNO
ET,4,124,3,0 ! FONTE DE CORRENTE SENOIDAL INDEPENDENTE
ET,5,53,4,... ! PLANO 53 (Elemento 8 nós) - CIRCUIT-COUPLED MASSIVE CONDUCTOR
ET,6,124,6 ! MASSIVE CONDUCTOR - CIRCUITO EXTERNO
EMUNIT,MKS ! UNIDADE MKS

!DEFINE PROPRIEDADES DO MATERIAL

TB,BH,1 !MATERIAL 1 - CURVA BxH (FERRO ESTATOR E ROTOR)
TBPT,DEFI,96.83,.6 !83.58 ENTRADA DE DADOS (H,B)
TBPT,,115.08,.8 !109.052 (valores do Bessa)
TBPT,,139.68,1 !141.688
TBPT,,187.30,1.2 !206.164
TBPT,,242.06,1.3 !271.436
TBPT,,373.02,1.4 !405.960
TBPT,,761.9,1.5 !803.960
TBPT,,1825.40,1.6 !1775.080
TBPT,,3968.25,1.7 !4457.600
TBPT,,7539.68,1.8 !7960,1.765

!TBPLOT,BH,1 !MOSTRA CURVA B X H

MP,MURX,2,1 !MATERIAL 2 - ENROLAMENTO ESTATOR DE COBRE (PERMEAB. RELATIVA)
MP,MURX,3,1 !MATERIAL 3 - AR (PERMEABILIDADE RELATIVA)
MP,MURX,4,1 !MATERIAL 4 - BARRA DO ROTOR DE ALUMINIO (PERMEAB. RELATIVA)
MP,MURX,5,1 !MATERIAL 5 - EIXO (PERMEABILIDADE RELATIVA)
MP,RSVX,2,2.5685*1.724E-8 !RESISTIBIDADE DO COBRE (Material 2 - 1,724E-8)
MP,RSVX,4,3.1E-8 !RESISTIBIDADE DO ALUMINIO (Material 4)

PI=ACOS(-1) !PI=3.1415
AA=90/11 !PASSO DA RANHURA DO ROTOR
BB=AA/2
DEZ=10

CSYS,1 !CORDENADA CILINDRICA

!DEFINE "KEYPOINTS" [k,RAIO(m),ANGULO(graus)]

K,1
K,2,.0175
K,3,.04975
K,4,.04991
K,5,.0175,AA
K,6,.04975,AA
K,7,.04991,AA
K,8,.038615,2.31602

K,9,.047599,1.88035
 K,10,.0374,BB
 K,11,.038615,5.86580
 K,12,.047599,6.30147
 K,13,.0494,BB
 K,14,.05012
 K,15,.08
 K,16,.04991,10
 K,17,.05012,10
 K,18,.08,10
 K,19,.05012,3.57089
 K,20,.050735,3.58822
 K,21,.051166,2.52334
 K,22,.06380,2.03441
 K,23,.05012,6.42911
 K,24,.050735,6.41178
 K,25,.051166,7.47666
 K,26,.06380,7.96559
 K,27,.06702,5
 K,28,.060119,2.14971
 K,29,.060119,7.85029
 K,30,.038615
 K,31,.047599
 K,32,.038596,BB
 K,33,.047564,BB
 K,34,.038615,AA
 K,35,.047599,AA
 K,36,.063719
 K,37,.063719,5
 K,38,.063719,10
 K,39,.0354
 K,40,.0354,AA
 K,41,.051166
 K,42,.051166,10
 K,43,.060119
 K,44,.060119,10
 K,45,.07
 K,46,.07,10
 K,47,.051166,5
 K,48,.060119,5
 KPLOT,ALL !VISUALIZA TODOS OS PONTOS

!DEFINE LINHAS A PARTIR DE PONTOS

L,1,2 !LINHA 1
 L,2,39 !LINHA 2
 L,30,31 !LINHA 3
 L,31,3 !LINHA 4
 L,3,4 !LINHA 5
 L,1,5 !LINHA 6
 L,5,40 !LINHA 7
 L,34,35 !LINHA 8
 L,35,6 !LINHA 9
 L,6,7 !LINHA 10
 L,4,7 !LINHA 11
 L,2,5 !LINHA 12
 L,8,9 !LINHA 13
 L,11,12 !LINHA 14
 LARC,8,10,32,.001196, !LINHA 15 - DEFINE ARCO
 LARC,11,10,32,.001196, !LINHA 16 - DEFINE ARCO
 L,30,8 !LINHA 17
 L,8,32 !LINHA 18
 L,32,11 !LINHA 19
 L,11,34 !LINHA 20
 LARC,9,13,33,.001836, !LINHA 21 - DEFINE ARCO
 LARC,12,13,33,.001836, !LINHA 22 - DEFINE ARCO
 L,31,9 !LINHA 23
 L,9,33 !LINHA 24
 L,33,12 !LINHA 25
 L,12,35 !LINHA 26
 L,3,6 !LINHA 27

L,4,16 !LINHA 28
L,16,17 !LINHA 29
L,4,14 !LINHA 30
L,14,41 !LINHA 31
L,19,20 !LINHA 32
L,20,21 !LINHA 33
L,21,28 !LINHA 34
L,28,22 !LINHA 35
L,41,43 !LINHA 36
L,36,45 !LINHA 37
L,15,18 !LINHA 38
L,42,44 !LINHA 39
L,38,46 !LINHA 40
L,17,42 !LINHA 41
L,23,24 !LINHA 42
L,24,25 !LINHA 43
L,25,29 !LINHA 44
L,29,26 !LINHA 45
L,28,48 !LINHA 46
L,22,37 !LINHA 47
L,37,26 !LINHA 48
LARC,22,27,37,.003301 !LINHA 49 - DEFINE ARCO
LARC,26,27,37,.003301 !LINHA 50 - DEFINE ARCO
L,19,23 !LINHA 51
L,20,24 !LINHA 52
L,14,17 !LINHA 53
L,39,30 !LINHA 54
L,40,34 !LINHA 55
L,32,33 !LINHA 56
L,39,40 !LINHA 57
L,22,36 !LINHA 58
L,26,38 !LINHA 59
L,21,25 !LINHA 60
L,14,19 !LINHA 61
L,23,17 !LINHA 62
L,21,41 !LINHA 63
L,25,42 !LINHA 64
L,43,28 !LINHA 65
L,44,29 !LINHA 66
L,44,38 !LINHA 67
L,43,36 !LINHA 68
L,45,46 !LINHA 69
L,45,15 !LINHA 70
L,46,18 !LINHA 71
L,47,48 !LINHA 72
L,48,37 !LINHA 73
L,29,48 !LINHA 74
L,21,47 !LINHA 75
L,25,47 !LINHA 76
LPLOT,ALL !PLOTA TODAS AS LINHAS

!DEFINE AREAS ATRAVES DE PONTOS

A,1,2,5 !AREA 1 - EIXO
A,2,39,40,5 !AREA 2 - ROTOR 1
A,39,30,8,10,11,34,40 !AREA 3 - ROTOR 2
A,30,31,9,8 !AREA 4 - ROTOR 3
A,34,35,12,11 !AREA 5 - ROTOR 4
A,31,3,6,35,12,13,9 !AREA 6 - ROTOR 5
FLST,2,4,3
FITEM,2,8
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,32
A,P51X !AREA 7 - RANHURA ROTOR 1
FLST,2,4,3
FITEM,2,9
FITEM,2,13
FITEM,2,12
FITEM,2,33
A,P51X !AREA 8 - RANHURA ROTOR 2

```

A,8,9,33,32      !AREA 9 - RANHURA ROTOR 3
A,11,12,33,32   !AREA 10 - RANHURA ROTOR 4
A,3,4,7,6       !AREA 11 - ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ROTOR)
A,4,14,17,16    !AREA 12 - ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ESTATOR)
A,14,41,21,20,19 !AREA 13 - ESTATOR 1
A,41,43,28,21   !AREA 14 - ESTATOR 2
A,17,42,25,24,23 !AREA 15 - ESTATOR 3
A,42,44,29,25   !AREA 16 - ESTATOR 4
A,43,36,22,28   !AREA 17 - ESTATOR 5
A,44,38,26,29   !AREA 18 - ESTATOR 6
A,36,45,46,38,26,27,22 !AREA 19 - ESTATOR 7
A,45,15,18,46   !AREA 20 - ESTATOR 8
A,19,20,24,23   !AREA 21 - ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 1
A,20,21,25,24   !AREA 22 - ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 2
A,21,28,48,47   !AREA 23 - RANHURA DO ESTATOR 3
A,25,29,48,47   !AREA 24 - RANHURA DO ESTATOR 4
A,28,22,37,48   !AREA 25 - ENROLAMENTO 1
A,29,26,37,48   !AREA 26 - ENROLAMENTO 2
FLST,2,4,3
FITEM,2,22
FITEM,2,27
FITEM,2,26
FITEM,2,37
A,P51X          !AREA 27 - ENROLAMENTO 3
APLOT,ALL
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,-1
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*

ASEL,S,AREA,,1  !SELECIONA AREA 1 (EIXO)
AATT,5          !ASSOCIA MATERIAL 5 PARA A AREA SELECIONADA

ASEL,S,,2,6,1   !SELECIONA AREAS 2 A 6 (FERRO DO ROTOR)
AATT,1         !ASSOCIA MATERIAL 1 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,7,10,1  !SELECIONA AREAS 7 A 10 (ALUMÍNIO DAS BARRAS)
AATT,4         !ASSOCIA MATERIAL 4 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,11,12,1 !SELECIONA AREAS 11 A 12 (ENTREFERRO)
AATT,3         !ASSOCIA MATERIAL 3 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,13,20,1 !SELECIONA AREAS 13 A 20 (FERRO DO ESTATOR)
AATT,1         !ASSOCIA MATERIAL 1 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,21,24,1 !SELECIONA AREAS 21 A 22 (AR NA RANHURA DO ESTATOR)
AATT,3         !ASSOCIA MATERIAL 3 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,S,,25,27,1 !SELECIONA AREAS 23 A 27 (COBRE NA RANHURA DO ESTATOR)
AATT,2         !ASSOCIA MATERIAL 2 PARA AS AREAS SELECIONADAS

ASEL,ALL        !SELECIONA TODAS AS AREAS
APLOT,ALL      !VISUALIZA TODAS AS AREAS

      !DEFINE MALHA

ESHape,1       !ELEMENTOS TRIANGULARES
LESize,1,,2,.5
LESize,6,,2,.5
LESize,12,,2
AMESH,1        !EIXO

LESize,2,,11
LESize,57,,4

```

LESIZE,7,,11
AMESH,2 !ROTOR 1

LESIZE,54,,2
LESIZE,17,,2
LESIZE,15,,22.5
LESIZE,16,,22.5
LESIZE,20,,2
LESIZE,55,,2
AMESH,3 !ROTOR 2

LESIZE,18,,2
LESIZE,19,,2
AMESH,7 !RANHURA DO ROTOR 1

LESIZE,3,,8
LESIZE,23,,2
LESIZE,13,,8
AMESH,4 !ROTOR 3

LESIZE,14,,8
LESIZE,26,,2
LESIZE,8,,8
AMESH,5 !ROTOR 4

LESIZE,56,,8
LESIZE,24,,2
AMESH,9 !RANHURA DO ROTOR 3

LESIZE,25,,2
AMESH,10 !RANHURA DO ROTOR 4

LESIZE,21,,22.5
LESIZE,22,,22.5
AMESH,8 !RANHURA DO ROTOR 2

LESIZE,4,,1
LESIZE,27,,.90909
LESIZE,9,,1
AMESH,6 !ROTOR 5

LESIZE,5,,1
LESIZE,11,,.90909
LESIZE,10,,1
AMESH,11 !ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ROTOR)

LESIZE,28,,.90909
LESIZE,30,,1
LESIZE,53,,.90909
LESIZE,29,,1
AMESH,12 !ENTREFERRO (FRONTEIRA COM ESTATOR)

LESIZE,51,,3
LESIZE,32,,1
LESIZE,52,,3
LESIZE,42,,1
AMESH,21 !ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 1

LESIZE,61,,.90909
LESIZE,63,,3
LESIZE,33,,1
LESIZE,31,,1
AMESH,13 !ESTATOR 1

LESIZE,43,,1
LESIZE,64,,3
LESIZE,62,,.90909
LESIZE,41,,1
AMESH,15 !ESTATOR 3

LESIZE,36,,8
LESIZE,65,,4

```

LESIZE,34,,8
AMESH,14      !ESTATOR 2

LESIZE,39,,8
LESIZE,66,,4
LESIZE,44,,8
AMESH,16      !ESTATOR 4

LESIZE,68,,3
LESIZE,58,,4
LESIZE,35,,3
AMESH,17      !ESTATOR 5

LESIZE,67,,3
LESIZE,59,,4
LESIZE,45,,3
AMESH,18      !ESTATOR 6

LESIZE,37,,2
LESIZE,69,,1.25
LESIZE,40,,2
LESIZE,50,,22.5
LESIZE,49,,22.5
AMESH,19      !ESTATOR 7

LESIZE,70,,5
LESIZE,38,,1.25
LESIZE,71,,5
AMESH,20      !ESTATOR 8

LESIZE,60,,4
AMESH,22      !ESPAÇO DE AR NA RANHURA DO ESTATOR 2

LESIZE,46,,4
LESIZE,72,,8
LESIZE,75,,2
AMESH,23      !RANHURA DO ESTATOR 3
LESIZE,74,,4
LESIZE,76,,2
AMESH,24      !RANHURA DO ESTATOR 4

LESIZE,47,,4
LESIZE,73,,3
AMESH,25      !ENROLAMENTO 1

LESIZE,48,,4
AMESH,26      !ENROLAMENTO 2
AMESH,27      !ENROLAMENTO 3

FLST,3,11,5,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-11
AGEN,44,P51X, , , ,AA, , ,0 !GERA AS AREAS SELECIONADAS 44 VEZES (ROTOR)
FLST,3,16,5,ORDE,2
FITEM,3,12
FITEM,3,-27
AGEN,36,P51X, , , ,10, , ,0 !GERA AS AREAS SELECIONADAS 36 VEZES (ESTATOR)

NUMMRG,NODE!,1E-8
NUMMRG,ELEM!,1E-8
NUMMRG,KP!,1E-8

/NUM,1          !VISUALIZA COM CORES
/PNUM,MAT,1     !VISUALIZA CORES DISTINTAS PARA CADA MATERIAL
EPLOT,ALL       !VISUALIZA TODOS OS ELEMENTOS

*DIM,ESTATOR,ARRAY,6,18,1          !CRIAR UM ARRAY (ESTATOR 6x30)
*CREATE,ansuitmp
*VREAD,ESTATOR(1,1),N36_ANTIGO_COBRE,TXT,,18,    !LÊ ARQUIVO *.TXT E COPIA NO ARRAY
(6F4.0)          !FORMATAR A CÓPIA NO ARRAY

```

```
*END
/INPUT,ansuitmp

*DIM,L_IND,ARRAY,4,3,0,          ! CRIA UM ARRAY (L_IND 4X3)

*DIM,ROTOR,ARRAY,2,88,1         ! CRIA UMA ARRAY (ROTOR 2X88)
*CREATE,ansuitmp
*VREAD,ROTOR(1,1),N44_ROTOR,TXT,,88,          ! LÊ ARQUIVO *.TXT E COPIA NO ARRAY
(2F4.0)          ! FORMATAR A CÓPIA NO ARRAY
*END
/INPUT,ansuitmp
```

Finish

```
/num,1          ! PLOTA COM CORES
```

!MOTOR_MI_CTE.TXT (Pré - Processamento das demais iterações)

!Difere do arquivo MOTOR_COBRE.txt apenas na substituição da tabela de dados B x H por MP,MURX,1,10

!P53_ESTATOR_COBRE_FILL.TXT (Modifica atributos do enrolamento do Estator)

```
/PREP7          ! PRE-PROCESSAMENTO
R,1,39.4915E-6,26,0.13,+1,.93    ! DEFINE REAL CONSTANTE [R,No,Area,Ns,l,I saindo (+1)]
REAL,1          ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 1
R,2,39.4915E-6,26,0.13,-1,.93    ! DEFINE REAL CONSTANT [I entrando (-1)]
REAL,2          ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 2
```

```
CSYS,1          ! COORDENADAS CILINDRICAS
```

```
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 1 *****
*DO,LINHA,1,5,2          ! DEFINE FASES +1 (Isaindo) PASSO DE 2 LINHAS (1,3,5)
*DO,COL,1,18          ! DEFINE COLUNAS DE 1 A 30
ACLEAR,ESTATOR(LINHA,COL)    ! APAGA A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ESTATOR(LINHA,COL)    ! SELECIONA A AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA E TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
AATT,2,1,2          ! PLANO 53, CONJ. 1, STRANDED COIL
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
AMESH,ESTATOR(LINHA,COL)    ! MALHA A AREA
ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS
*ENDDO          ! FECHA O "*DO"
*ENDDO          ! FECHA O "*DO" DAS LINHAS
```

```
ESEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NUMCMP,ELEM          ! COMPRIME A NUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS
```

```
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 2 *****
*DO,LINHA,2,6,2          ! DEFINE FASES -1(Ientrando) PASSO DE 2 LINHAS (2,4,6)
*DO,COL,1,18          ! DEFINE NUMERO DE REPETIÇÕES
ACLEAR,ESTATOR(LINHA,COL)    ! APAGA A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ESTATOR(LINHA,COL)    ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA E TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
AATT,2,2,2          ! PLANO 53, CONJ. 2, STRANDED COIL
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
AMESH,ESTATOR(LINHA,COL)    ! MALHA A AREA
ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS
*ENDDO          ! FECHA NUMERO DE REPETIÇÕES
```

```

*ENDDO          ! FECHA FASE

ESEL,ALL        ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NUMCMP,ELEM     ! COMPRIME A NUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS

ESEL,ALL        ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL        ! SELECIONA TODOS OS NODOS
ASEL,ALL        ! SELECIONA TODAS AS AREAS
NUMCMP,ALL      ! COMPRIME TODA A NUMERAÇÃO

FINISH          ! TERMINAR

```

!P53_ROTOR_NEW.TXT (Modifica atributos das barras do Rotor)

```

/PREP7          ! PRE-PROCESSAMENTO
R,3,0.343438E-4,,0.13,,      ! DEFINE REAL CONSTANTE [R,No,Area,Ns,I,I entrando (-1)]
REAL,3          ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 9
R,4,0.343438E-4,,0.13,,      ! DEFINE REAL CONSTANTE [R,No,Area,Ns,I,I entrando (+1)]
REAL,4          ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 10

CSYS,1          ! COORDENADAS CILINDRICAS

CONT=0

!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 9 *****
*DO,COL,1,88      ! DEFINE COLUNAS DE 1 A 88
ACLEAR,ROTOR(1,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(1,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA E TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,3,5        ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
CONT=CONT+1
*GET,NUMELE,ELEM,,COUNT
*IF,CONT,EQ,1,THEN
*IF,NUMELE,NE,18,THEN
ACLEAR,ROTOR(1,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(1,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,3,5        ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

! ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,2,THEN
*IF,NUMELE,NE,16,THEN
ACLEAR,ROTOR(1,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(1,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,3,5        ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

```

```
! ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,3,THEN
*IF,NUMELE,NE,26,THEN
  ACLEAR,ROTOR(1,COL)    ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,,,,ROTOR(1,COL)   ! SELECIONA AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y
  CMSEL,S,_Y1
  AATT,4,3,5             ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1

! ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,NUMELE,NE,26,THEN
  ACLEAR,ROTOR(1,COL)    ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,,,,ROTOR(1,COL)   ! SELECIONA AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y
  CMSEL,S,_Y1
  AATT,4,3,5             ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1

! ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF

*IF,CONT,EQ,4,THEN
  CONT=0
*ENDIF

ASEL,ALL              ! SELECIONA AREAS
*ENDDO                ! FECHA O COMANDO "*DO"

ESEL,ALL              ! SELECIONA TODAS AS AREAS
NUMCMP,ELEM          ! COMPRIME A NUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS

CONT=0

!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 10 *****
*DO,COL,1,88          ! DEFINE COLUNAS DE 1 A 88
  ACLEAR,ROTOR(2,COL)    ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,,,,ROTOR(2,COL)   ! SELECIONA AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y

  CMSEL,S,_Y1
  AATT,4,4,5             ! PLANO 53, CONJ. 10, MASSIVE CONDUCTOR
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1

ESHAPE,1              ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(2,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*GET,NUMELE,ELEM,,COUNT
*IF,CONT,EQ,1,THEN
*IF,NUMELE,NE,18,THEN
```

```

ACLEAR,ROTOR(2,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(2,COL)    ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,4,5              ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1              ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(2,COL)    ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,2,THEN
*IF,NUMELE,NE,16,THEN
ACLEAR,ROTOR(2,COL)    ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(2,COL)  ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,4,5              ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1              ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(2,COL)    ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,3,THEN
*IF,NUMELE,NE,26,THEN
ACLEAR,ROTOR(2,COL)    ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(2,COL)  ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,4,5              ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1              ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(2,COL)    ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,NUMELE,NE,26,THEN
ACLEAR,ROTOR(2,COL)    ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(2,COL)  ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,4,5              ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1              ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(2,COL)    ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF

*IF,CONT,EQ,4,THEN
CONT=0
*ENDIF

```

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 149

```
ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS
*ENDDO           ! FECHA O COMANDO "*DO" (Nº DE REPETIÇÕES)

ESEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS
NUMCMP,ALL       ! COMPRIME TODA A NUMERAÇÃO

FINISH           ! TERMINA
```

!Calc-mi.txt (Chama B e H da Solução Estática linear e é utilizado apenas da 2ª iteração em diante)

/PREP7

```
*DIM,BH,ARRAY,18756,3,0          ! CRIA UMA ARRAY (ROTOR 2X88)
```

```
*CREATE,ansuitmp
*VREAD,BH(1,1),RESULT_B,TXT,,1,
(E25.2)
*END
/INPUT,ansuitmp
```

```
*CREATE,ansuitmp
*VREAD,BH(1,2),RESULT_H,TXT,,1,
(E25.2)
*END
/INPUT,ansuitmp
```

```
*CREATE,ansuitmp
*VREAD,BH(1,3),RESULT_N,TXT,,1,
(E25.2)
*END
/INPUT,ansuitmp
```

```
CONT=6
MIO=1.25663706144E-6
*DO,I,1,18756
MI=BH(I,1)/BH(I,2)
MIR=MI/MIO
MP,MURX,CONT,MIR
CONT=CONT+1
*ENDDO
```

```
CONT=6
*DO,I,1,18756
MPCHG,CONT,BH(I,3)
CONT=CONT+1
*ENDDO
```

!SERIE_ESTATOR4_COBRE.TXT (Conexão dos enrolamentos do Estator)

```
/PREP7          ! PRE-PROCESSAMENTO
CSYS,1          ! COORDENADAS CILINDRICAS
NSEL,S,LOC,X,0.08          ! SELEÇÃO DO CONTORNO EXTERNO (0.08m)
NSEL,A,LOC,X,0          ! SELEÇÃO DA ORIGEM
D,ALL,AZ,0          ! CONDIÇÃO DE CONTORNO DIRICHLET
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
```

```
!***** CRIAR OS NÓS PARA O CIRCUITO EXTERNO (CIRCU124)*****
*GET,NO_EST,NODE,,COUNT          ! OBTÉM O NUMERO DE NÓS
!CSYS,0          ! COORDENADAS CILINDRICAS (???????)
NO_EST=NO_EST+1          ! ACRESCENTA UM NÓ
NO1=NO_EST
N,NO_EST          ! CRIA UM NÓ NO CENTRO
*REPEAT,39,1          ! REPETE A AÇÃO ANTERIOR 39 VEZES
NSEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ESEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
```

```

ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS

!***** CONETAR O MODELO COM O CIRCUITO EXTERNO - FASE A *****
*DO,COL,1,18,3    ! DEFINE 1 ELEMENTO DE CADA RANHURA (PASSO DE 5)
*DO,LINHA,1,2     ! DEFINE LINHAS 1 E 2 (FASES A E -A)
FLST,5,1,5
FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X     ! SELECIONA A AREA
ESLA,S,1         ! SELECIONA OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1         ! SELECIONA OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! OBTÉM O MAIOR NUMERO DE NÓ UTILIZADO

TYPE,3           ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO (STRANDED COIL)
R,5,1            ! DEFINE NOVA REAL CONSTANTE
REAL,5           ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 3

E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO AOS NÓS i,j,k (COL=1 E LINHA=1)
NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCE UM NÓ

ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS
ESEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS NÓS
*ENDDO
*ENDDO

!***** CONETAR FONTE DE CORRENTE AO CIRCUITO *****
TYPE,4           ! DEFINE TIPO DE ELEMENTO (FONTE DE CORRENTE INDEP.)
                ! FASE A
R,6,8,3,0        ! DEFINE CARACTERISTICAS (Inom=15A, Fase 0)
REAL,6           ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 4

E,NO_EST,NO1     ! CONECTA O ELEMENTO FONTE DE CORRENTE (i,j,k)
ESEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS

!***** CONETAR O MODELO COM O CIRCUITO EXTERNO - FASE B *****
NO_EST=NO_EST+1
NO1=NO_EST
*DO,COL,1,18,3    ! DEFINE COLUNA DE 1 A 30 COM PASSO DE 5
*DO,LINHA,3,4     ! DEFINE LINHAS 3 E 4 (FASES B E -B)
FLST,5,1,5
FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X     ! SELECIONA AREA
ESLA,S,1         ! SELECIONA OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1         ! SELECIONA OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! OBTÉM O MAIOR NUMERO DE NÓ UTILIZADO

TYPE,3           ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO (STRANDED COIL)
R,7,1            ! DEFINE NOVA REAL CONSTANTE
REAL,7           ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 5

E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO AOS NÓS i,j,k (COL=1 E LINHA=1)
NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCE UM NÓ

!*IF,COL,EQ,1,THEN
!*IF,LINHA,EQ,1,THEN
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO AOS NÓS i,j,k (COL=1 E LINHA=1)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCE UM NÓ
!*ELSE
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO AOS NÓS i,j,k (COL=1 E LINHA=2)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCE UM NÓ
!*ENDIF
!*ELSE
!*IF,COL,EQ,26,THEN ! ATÉ COL=26, DEVIDO PASSO DE 5
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO, NÓS i,j,k (COL=26)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCE UM NÓ
!*ELSE
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO, NÓS i,j,k (COL=6,11,16,21)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCE UM NÓ
!*ENDIF
!*ENDIF

```

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 151

```
ASEL,ALL      ! SELECIONA TODAS AS AREAS
ESEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS NÓS
*ENDDO
*ENDDO
!***** CONETAR FONTE DE CORRENTE AO CIRCUITO *****
TYPE,4        ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO (FONTE DE CORRENTE INDEP.)
              ! FASE B
!Módulo Ib=(-15*cos(2*PI/3))
R,8,8.3,120   ! DEFINE CARACTERISTICAS (Inom=15A, FASE=120)
REAL,8        ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 6

E,NO_EST,NO1  ! CONECTA O ELEMENTO FONTE DE CORRENTE (i,j,k)
ESEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ASEL,ALL      ! SELECIONA TODAS AS AREAS

!***** CONETAR O MODELO COM O CIRCUITO EXTERNO - FASE C *****
NO_EST=NO_EST+1
NO1=NO_EST
*DO,COL,1,18,3 ! DEFINE COLUNA DE 1 A 30 COM PASSO DE 5
*DO,LINHA,5,6  ! DEFINE LINHAS 3 E 4 (FASES C E -C)
FLST,5,1,5
FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X ! SELECIONA AREA
ESLA,S,1      ! SELECIONA OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1      ! SELECIONA OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! OBTEN O MAIOR NUMERO DE NÓ UTILIZADO

TYPE,3        ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO (STRANDED COIL)
R,9,1         ! DEFINE NOVA REAL CONSTANTE
REAL,9        ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 7

E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO AOS NÓS i,j,k (COL=1 E LINHA=1)
NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCENTA UM NÓ

!*IF,COL,EQ,1,THEN
!*IF,LINHA,EQ,1,THEN
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO AOS NÓS i,j,k (COL=1 E LINHA=1)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCENTA UM NÓ
!*ELSE
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO AOS NÓS i,j,k (COL=1 E LINHA=2)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCENTA UM NÓ
!*ENDIF
!*ELSE
!*IF,COL,EQ,26,THEN   ! ATÉ COL=26, DEVIDO PASSO DE 5
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO, NÓS i,j,k (COL=26)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCENTA UM NÓ
!*ELSE
! E,NO_EST,NO_EST+1,N1 ! CONECTA ELEMENTO, NÓS i,j,k (COL=6,11,16,21)
! NO_EST=NO_EST+1     ! ACRESCENTA UM NÓ
!*ENDIF
!*ENDIF

ASEL,ALL      ! SELECIONA TODAS AS AREAS
ESEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS NÓS
*ENDDO
*ENDDO
!***** CONETAR FONTE DE CORRENTE AO CIRCUITO *****
TYPE,4        ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO (FONTE DE CORRENTE INDEP.)
              ! FASE C
!Módulo Ic=(-15*cos(-2*PI/3))
R,10,8.3,-120 ! DEFINE CARACTERISTICAS (Inom=15A, FASE=-120)
REAL,10       ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 8

E,NO_EST,NO1  ! CRIA O ELEMENTO DE CORRENTE
ESEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL      ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ASEL,ALL      ! SELECIONA TODAS AS AREAS
```

!*****

!***** ACOPLAR TODOS OS ENROLAMENTOS DO ESTATOR EM CORRENTE *****

```

*GET,CPL,ACTIVE,,CP      ! OBTEN NUMERO DE ACOPLAMENTOS
*DO,LINHA,1,2            ! DEFINIR LINHA DO ARREGLO
*DO,COL,1,18            ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X          ! SELECIONAR AREA
  ESLA,S,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
  *IF,LINHA,EQ,1,THEN
  *IF,COL,EQ,1,THEN
  NSLE,S,1              ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ELSE
  NSLE,A,1              ! ADICIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ENDIF
  *ELSE
  NSLE,A,1              ! ADICIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ENDIF
*ENDDO
*ENDDO
CP,CPL+1,CURR,ALL      ! ACOPLAR EM CORRENTE
NSEL,,ALL              ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,,ALL              ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,,ALL              ! SELECIONAR TODAS AS AREAS

*DO,LINHA,3,4          ! DEFINIR LINHA DO ARREGLO
*DO,COL,1,18          ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X        ! SELECIONAR AREA
  ESLA,S,1
  ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
  *IF,LINHA,EQ,3,THEN
  *IF,COL,EQ,1,THEN
  NSLE,S,1            ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ELSE
  NSLE,A,1            ! ADICIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ENDIF
  *ELSE
  NSLE,A,1            ! ADICIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ENDIF
*ENDDO
*ENDDO
CP,CPL+2,CURR,ALL    ! ACOPLAR EM CORRENTE
NSEL,,ALL            ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,,ALL            ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,,ALL            ! SELECIONAR TODAS AS AREAS

*DO,LINHA,5,6        ! DEFINIR LINHA DO ARREGLO
*DO,COL,1,18        ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X      ! SELECIONAR AREA
  ESLA,S,1          ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
  *IF,LINHA,EQ,5,THEN
  *IF,COL,EQ,1,THEN
  NSLE,S,1          ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ELSE
  NSLE,A,1          ! ADICIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ENDIF
  *ELSE
  NSLE,A,1          ! ADICIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  *ENDIF
*ENDDO
*ENDDO
CP,CPL+3,CURR,ALL    ! ACOPLAR EM CORRENTE
NSEL,,ALL            ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,,ALL            ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,,ALL            ! SELECIONAR TODAS AS AREAS

```

!***** ACOPLAR TODOS OS ENROLAMENTOS DO ESTATOR EM EMF *****

```
*GET,CPL,ACTIVE,,CP      ! OBTEN NUMERO DE ACOPLAMENTOS
CONT=0
CONT1=0
COL1=0
COL2=0
*DO,LINHA,1,6            ! DEFINIR LINHA DO ARREGLO
*DO,COL,1,18            ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
*IF,COL1,EQ,COL2,THEN
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
  ASEL,S,,,P51X          ! SELECIONAR AREA
  ESLA,S,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
  NSLE,S,1              ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  CONT=CONT+1
  COL1=1
  COL2=2
*ELSE
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,ESTATOR(LINHA,COL)
  ASEL,A,,,P51X          ! SELECIONAR AREA
  ESLA,A,1              ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
  NSLE,A,1              ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
  CONT=CONT+1
*ENDIF

*IF,CONT,EQ,3,THEN
  cont1=cont1+1
  CP,CPL+cont1,EMF,ALL  ! DUVIDA COMO ACOPLAR EM EMF
  CONT=0
  COL1=0
  COL2=0
*ENDIF
*ENDDO
NSEL,ALL                ! SELECIONAR OS NÓS
ESEL,ALL                ! SELECIONAR OS ELEMENTOS
ASEL,ALL                ! SELECIONAR AS AREAS
*ENDDO

NSEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS

FINISH                  ! TERMINAR
```

!CURTO_ROTOR.TXT (Conecta as barras do Rotor)

```
/PREP7                  ! PRE-PROCESSAMENTO
*GET,NOD,NODE,,COUNT   ! OBTÉM O NUMERO DE NÓS
*GET,NELEM,ELEM,,COUNT ! OBTÉM O NUMERO DE ELEMENTOS
CSYS,0                  ! COORDENADAS RETANGULARES
COL1= 1
COL2= 44

!***** CRIA OS NÓS PARA O CIRCUITO EXTERNO (CIRCU124)*****
NNOD= NOD+1            ! ACRESCENTA UM NÓ
N,NNOD                 ! CRIA UM NÓ NO CENTRO
*REPEAT,2,1           ! REPETE A OPERAÇÃO ANTERIOR 2 VEZES
NSEL,ALL               ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ESEL,ALL               ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL               ! SELECIONA TODAS AS AREAS

!***** CONECTA O MODELO COM O CIRCUITO EXTERNO (CIRCU124)*****
*DO,REP,1,2           ! DEFINE NUMERO DE REPETIÇÕES
*DO,LINHA,1,2         ! DEFINE LINHAS 1 E 2
*DO,COL,COL1,COL2,4   ! DEFINE COLUNAS DE COL1 A COL2 (PASSO DE 4)
FLST,5,1,5
FITEM,5,ROTOR(LINHA,COL)
ASEL,S,,,P51X          ! SELECIONA AREA
ESLA,S,1              ! SELECIONA OS ELEMENTOS DA AREA
```

```

NSLE,S,1          ! SELECIONA OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX      ! OBTÉM O MAIOR NUMERO DE NÓS
TYPE,6            ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO (MASSIVE CONDUTOR)
R,11,1           ! DEFINE AS CARACTERISTICAS
REAL,11          ! CONJUNTO DE CARACTERISICAS - 11
E,NNOD,NNOD+1,N1      ! CONECTA O ELEMENTO NOS NÓS i,j,k
ASEL,ALL         ! SELECIONA TODAS AS AREAS
ESEL,ALL        ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL        ! SELECIONA TODOS OS NÓS
*ENDDO
*IF,LINHA,EQ,2,THEN
  COL1=COL1+44
  COL2=COL2+44
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO

!***** ACOPLA CADA UMA DAS BARRAS DO ROTOR *****
*GET,CPLE,ACTIVE,,CP      ! OBTÉM NUMERO DE ACOPLAMENTOS
CONT=0                   ! INICIALIZA CONTADOR
CONT1=0                  ! INICIALIZA CONTADOR 1
COL1=0
COL2=0
*DO,LINHA,1,2           ! DEFINE LINHAS 1 E 2 DO ARRAY
*DO,COL,1,88           ! DEFINE COLUNAS DE 1 A 88
*IF,COL1,EQ,COL2,THEN
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,ROTOR(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X          ! SELECIONA AREAS
  ESLA,S,1              ! SELECIONA OS ELEMENTOS DA AREA
  NSLE,S,1              ! SELECIONA OS NÓS DOS ELEMENTOS
  CONT=CONT+1
  COL1=1
  COL2=2
*ELSE
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,ROTOR(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X          ! SELECIONA AREAS
  ESLA,S,1              ! SELECIONA OS ELEMENTOS DA AREA
  NSLE,A,1              ! SELECIONA OS NÓS DOS ELEMENTOS
  CONT=CONT+1
*ENDIF
*IF,CONT,EQ,4,THEN      ! CHECA O PASSO DE 4
*IF,LINHA,EQ,1,THEN
  CONT1=CONT1+1
  CP,CPLE+CONT1,EMF,ALL ! ACOPLA EM EMF
  CP,CPLE+(22*1)+CONT1,CURR,ALL ! ACOPLA EM CORRENTE
*ELSE
  CONT1=CONT1+1
  CP,CPLE+(22*1)+CONT1,EMF,ALL ! ACOPLA EM EMF
  CP,CPLE+(22*2)+CONT1,CURR,ALL ! ACOPLA EM CORRENTE
*ENDIF
CONT=0
COL2=COL1
*ENDIF
*ENDDO
NSEL,ALL              ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ESEL,ALL              ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL              ! SELECIONA TODAS AS AREAS
*ENDDO

FINISH                ! TERMINA

```

!Solucao.txt

```

/PREP7
CSYS,1
/SOLU
ANTYPE,HARMIC        !Solução Harmônica (AC)
HARFRQ,15           ! DEFINIR A FREQUENCIA
SOLVE

```

!Calc_J_rotor.txt (Captura J_rotor da solução harmônica)

```
/prep7
CONT=0
CONT1=1
CONT2=0
CONT3=0
*DO,LINHA,1,2
*DO,COL,1,88
FLST,5,1,5
FITEM,5,ROTOR(LINHA,COL)
*IF,CONT,EQ,0,THEN
ASEL,S,,P51X
ESLA,S,1
CONT=CONT+1
*ELSE
ASEL,A,,P51X
ESLA,A,1
CONT=CONT+1
*ENDIF

*IF,CONT,EQ,4,THEN
*IF,CONT1,EQ,1,THEN
*GET,NEL,ELEM,,COUNT          ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
*DIM,Jre_rot,ARRAY,NEL*44,7,1  ! CRIA UMA ARRAY (ROTOR 2X88)
CONT1=0
*ENDIF

/POST1
SET,1,,0
ETABLE,JRSUM,JT,SUM
*GET,MINELEM,ELEM,,NUM,MIN     ! OBTER O MENOR NUMERO DE ELEMENTOS
*IF,CONT2,EQ,0,THEN
*VGET,Jre_rot(1,1),ELEM,MINELEM,ETAB,JRSUM,,2
CONT2=CONT2+1
I1=1
I2=86
NELEMEN=MINELEM
*DO,I,I1,I2
JRE_ROT(1,3)=NELEMEN
NELEMEN=NELEMEN+1
*ENDDO
*ELSE
CONT2=CONT2+1
*VGET,Jre_rot((NEL*(CONT2-1))+1,1),ELEM,MINELEM,ETAB,JRSUM,,2
I1=I1+86
I2=I2+86
NELEMEN=MINELEM
*DO,I,I1,I2
JRE_ROT(1,3)=NELEMEN
NELEMEN=NELEMEN+1
*ENDDO
*ENDIF

NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
CONT=0
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO

CONT=0
CONT1=1
CONT2=0
CONT3=0
*DO,LINHA,1,2
*DO,COL,1,88
FLST,5,1,5
FITEM,5,ROTOR(LINHA,COL)
*IF,CONT,EQ,0,THEN
```

```

ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
CONT=CONT+1
*ELSE
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
CONT=CONT+1
*ENDIF

*IF,CONT,EQ,4,THEN
*IF,CONT1,EQ,1,THEN
*GET,NEL,ELEM,,COUNT          ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
CONT1=0
*ENDIF

/POST1
SET,1,,,1

ETABLE, JISUM,JT,SUM
*GET,MINELEM,ELEM,,NUM,MIN      ! OBTER O MENOR NUMERO DE ELEMENTOS
*IF,CONT3,EQ,0,THEN
*VGET,Jre_rot(1,2),ELEM,MINELEM,ETAB,JISUM,,2
CONT3=CONT3+1
*ELSE
CONT3=CONT3+1
*VGET,Jre_rot((NEL*(CONT3-1))+1,2),ELEM,MINELEM,ETAB,JISUM,,2
*ENDIF
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
CONT=0
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO

SMULT,JR2,JRSUM,JRSUM,1,1,
SMULT,JI2,JISUM,JISUM,1,1,
SADD,JMAG,JR2,JI2,1,1,0,

CONT=0
CONT1=1
CONT2=0
CONT3=0
*DO,LINHA,1,2
*DO,COL,1,88
FLST,5,1,5
FITEM,5,ROTOR(LINHA,COL)
*IF,CONT,EQ,0,THEN
ASEL,S,,,P51X
ESLA,S,1
CONT=CONT+1
*ELSE
ASEL,A,,,P51X
ESLA,A,1
CONT=CONT+1
*ENDIF

*IF,CONT,EQ,4,THEN
*IF,CONT1,EQ,1,THEN
*GET,NEL,ELEM,,COUNT          ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS SELECIONADOS
CONT1=0
*ENDIF

*GET,MINELEM,ELEM,,NUM,MIN      ! OBTER O MENOR NUMERO DE ELEMENTOS
*IF,CONT3,EQ,0,THEN
*VGET,Jre_rot(1,4),ELEM,MINELEM,ETAB,JR2,,2
*VGET,Jre_rot(1,5),ELEM,MINELEM,ETAB,JI2,,2
*VGET,Jre_rot(1,6),ELEM,MINELEM,ETAB,JMAG,,2
CONT3=CONT3+1
*ELSE
CONT3=CONT3+1
*VGET,Jre_rot((NEL*(CONT3-1))+1,4),ELEM,MINELEM,ETAB,JR2,,2

```

```
*VGET,Jre_rot((NEL*(CONT3-1))+1,5),ELEM,MINELEM,ETAB,J12,,2
*VGET,Jre_rot((NEL*(CONT3-1))+1,6),ELEM,MINELEM,ETAB,JMAG,,2
*ENDIF
NSEL,,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
CONT=0
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO

*AFUN,DEG
*DO,I,1,NEL*44
ANG=ATAN(Jre_rot(I,2)/Jre_rot(I,1))
*IF,Jre_rot(I,1),LT,0,THEN
*IF,Jre_rot(I,2),LT,0,THEN
ANG=ANG-180
*ELSE
ANG=ANG+180
*ENDIF
*ENDIF
Jre_rot(I,7)=ANG
*ENDDO

*CREATE,ansuitmp
*CFOPEN,J_HARM_N,TXT,
*VWRITE,JRE_ROT(1,3)
(1X,' 'F20.1)
*CFCLOS
*END
/INPUT,ansuitmp

*CREATE,ansuitmp
*CFOPEN,J_HARM_M,TXT,
*VWRITE,JRE_ROT(1,6)
(1X,' 'F20.4)
*CFCLOS
*END
/INPUT,ansuitmp

*CREATE,ansuitmp
*CFOPEN,J_HARM_A,TXT,
*VWRITE,JRE_ROT(1,7)
(1X,' 'F20.4)
*CFCLOS
*END
/INPUT,ansuitmp
```

Solução Estática (linear)

!Motor_ESTATICO_cobre.txt (Difere do Motor_cobre.txt por não possuir elemento CIRCU 124 destinado apenas à solução harmônica)

!P53_COBRE.TXT (Modifica atributos do enrolamento do Estator)

```
/PREP7 ! PRE-PROCESSAMENTO
! R,1,39.4915E-6,26,0.13,+1,1 ! DEFINE REAL CONSTANTE [R,No,Area,Ns,I saindo (+1)]
! REAL,1 ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 1
! R,2,39.4915E-6,26,0.13,-1,1 ! DEFINE REAL CONSTANT [I entrando (-1)]
! REAL,2 ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 2

CSYS,1 ! COORDENADAS CILINDRICAS

!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 1 *****
*DO,LINHA,1,5,2 ! DEFINE FASES +1 (Isaindo) PASSO DE 2 LINHAS (1,3,5)
*DO,COL,1,18 ! DEFINE COLUNAS DE 1 A 30
ACLEAR,ESTATOR(LINHA,COL) ! APAGA A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
```

```

ASEL,,,ESTATOR(LINHA,COL)  ! SELECIONA A AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA E TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
AATT,2,,2          ! PLANO 53, CONJ. 1, STRANDED COIL
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

AMESH,ESTATOR(LINHA,COL)  ! MALHA A AREA
ASEL,ALL           ! SELECIONA TODAS AS AREAS
*ENDDO            ! FECHA O "*DO"
*ENDDO            ! FECHA O "*DO" DAS LINHAS

ESEL,ALL           ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NUMCMP,ELEM       ! COMPRIME A NUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS

!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 2 *****
*DO,LINHA,2,6,2    ! DEFINE FASES -1(entrando) PASSO DE 2 LINHAS (2,4,6)
*DO,COL,1,18      ! DEFINE NUMERO DE REPETIÇÕES
ACLEAR,ESTATOR(LINHA,COL) ! APAGA A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,ESTATOR(LINHA,COL) ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA E TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
AATT,2,,2          ! PLANO 53, CONJ. 2, STRANDED COIL
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

AMESH,ESTATOR(LINHA,COL)  ! MALHA A AREA
ASEL,ALL           ! SELECIONA TODAS AS AREAS
*ENDDO            ! FECHA NUMERO DE REPETIÇÕES
*ENDDO            ! FECHA FASE

ESEL,ALL           ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NUMCMP,ELEM       ! COMPRIME A NUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS

ESEL,ALL           ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL          ! SELECIONA TODOS OS NODOS
ASEL,ALL          ! SELECIONA TODAS AS AREAS
NUMCMP,ALL        ! COMPRIME TODA A NUMERAÇÃO

FINISH            ! TERMINAR

!P53_ALUMINIO.TXT (Modifica atributos das barras do Rotor)
/PREP7           ! PRE-PROCESSAMENTO
! R,3,0.343438E-4,,0.13,, ! DEFINE REAL CONSTANTE [R,No,Area,Ns,I,entrando (-1)]
! REAL,3          ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 9
! R,4,0.343438E-4,,0.13,, ! DEFINE REAL CONSTANTE [R,No,Area,Ns,I,entrando (+1)]
! REAL,4          ! CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 10

CSYS,1           ! COORDENADAS CILINDRICAS

CONT=0
cont1=0

!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 9 *****
*DO,COL,1,88     ! DEFINE COLUNAS DE 1 A 88
ACLEAR,ROTOR(1,COL) ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,ROTOR(1,COL) ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA E TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,,2        ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR

```

```
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
CONT=CONT+1
*GET,NUMELE,ELEM,,COUNT
*IF,CONT,EQ,1,THEN
*IF,NUMELE,NE,18,THEN
ACLEAR,ROTOR(1,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(1,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,,2          ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,2,THEN
*IF,NUMELE,NE,16,THEN
ACLEAR,ROTOR(1,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(1,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,,2          ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,3,THEN
*IF,NUMELE,NE,26,THEN
ACLEAR,ROTOR(1,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(1,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,,2          ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,NUMELE,NE,26,THEN
ACLEAR,ROTOR(1,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,ROTOR(1,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,,2          ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1          ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
```

```

    AMESH,ROTOR(1,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
cont1=cont1+1
*IF,CONT,EQ,4,THEN
CONT=0
*ENDIF

ASEL,ALL                   ! SELECIONA AREAS
*ENDDO                    ! FECHA O COMANDO "*DO"

ESEL,ALL                   ! SELECIONA TODAS AS AREAS
NUMCMP,ELEM               ! COMPRIME A NUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS

CONT=0

!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 10 *****
*DO,COL,1,88              ! DEFINE COLUNAS DE 1 A 88
ACLEAR,ROTOR(2,COL)      ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,ROTOR(2,COL)       ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y

CMSEL,S,_Y1
AATT,4,2                 ! PLANO 53, CONJ. 10, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

ESHAPE,1                 ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
AMESH,ROTOR(2,COL)      ! MALHA A AREA SELECIONADA
*GET,NUMELE,ELEM,,COUNT
*IF,CONT,EQ,1,THEN
*IF,NUMELE,NE,18,THEN
ACLEAR,ROTOR(2,COL)     ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,ROTOR(2,COL)     ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,2                 ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1              ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
   AMESH,ROTOR(2,COL)   ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,2,THEN
*IF,NUMELE,NE,16,THEN
ACLEAR,ROTOR(2,COL)     ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,,ROTOR(2,COL)     ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,2                 ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1              ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
   AMESH,ROTOR(2,COL)   ! MALHA A AREA SELECIONADA
*ENDIF
*ELSE
*IF,CONT,EQ,3,THEN
*IF,NUMELE,NE,26,THEN
ACLEAR,ROTOR(2,COL)     ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA

```

```
CM,_Y,AREA
ASEL,,ROTOR(2,COL)      ! SELECIONA AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT,4,,2              ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1            ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(2,COL)  ! MALHA A AREA SELECIONADA
  *ENDIF
  *ELSE
  *IF,NUMELE,NE,26,THEN
  ACLEAR,ROTOR(2,COL)  ! APAGA MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,,ROTOR(2,COL)  ! SELECIONA AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y
  CMSEL,S,_Y1
  AATT,4,,2          ! PLANO 53, CONJ. 9, MASSIVE CONDUCTOR
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1

!  ESHAPE,1            ! DEFINE ELEMENTOS TRIANGULARES
  AMESH,ROTOR(2,COL)  ! MALHA A AREA SELECIONADA
  *ENDIF
  *ENDIF
  *ENDIF
  *ENDIF
  cont1=cont1+1
  *IF,CONT,EQ,4,THEN
  CONT=0
  *ENDIF

ASEL,ALL                ! SELECIONA TODAS AS AREAS
*ENDDO                  ! FECHA O COMANDO "*DO" (Nº DE REPETIÇÕES)

ESEL,ALL                ! SELECIONA TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL                ! SELECIONA TODOS OS NÓS
ASEL,ALL                ! SELECIONA TODAS AS AREAS
NUMCMP,ALL              ! COMPRIME TODA A NUMERAÇÃO

FINISH                  ! TERMINA
```

!J-ROT.txt (Chama J_rotor da solução harmônica)

/PREP7

```
NEL=86
*DIM,Jre_rot,ARRAY,NEL*44,3,0          ! CRIA UMA ARRAY (ROTOR 2X88)

*CREATE,ansuitmp
*VREAD,JRE_ROT(1,1),J_HARM_N,TXT,,1,
(E25.2)
*END
/INPUT,ansuitmp

*CREATE,ansuitmp
*VREAD,JRE_ROT(1,2),J_HARM_M,TXT,,1,
(E25.4)
*END
/INPUT,ansuitmp

*CREATE,ansuitmp
*VREAD,JRE_ROT(1,3),J_HARM_A,TXT,,1,
(E24.4)
*END
/INPUT,ansuitmp
```

```
*DO,I,1,NEL*44
Jmag=SQRT(Jre_rot(I,2))
BFE,Jre_rot(I,1),JS,1,,Jmag,Jre_rot(I,3)
*ENDDO
```

!Js_DC_cobre.txt (Processamento da Solução Estática)

```
/PREP7
CSYS,1
!NVA= 2

Js= (8.3/(39.4915E-6/26)) !Ivazio(4.1) / N_ESPIRAS(1) * Aranhura(85,9mm2)

*DO,LINHA,1,6
*IF,LINHA,EQ,1,THEN
!SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,18
!36,35,34,18,17,16
*IF,COL,EQ,1,THEN
!CORRESPONDENTE A FASE A
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,Js,0
!APLICA Js PARA FASE A
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,2,THEN
!SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,18
!27,26,25,9,8,7
*IF,COL,EQ,1,THEN
!CORRESPONDENTE A FASE -A
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,-Js,0
!APLICA Js PARA FASE -A
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,3,THEN
!SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,18
!30,29,28,12,11,10
*IF,COL,EQ,1,THEN
!CORRESPONDENTE A FASE B
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,S,,P51X
ESLA,S,1
*ELSE
FLST,5,1,5
FITEM,5,estator(LINHA,COL)
ASEL,A,,P51X
ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
```

```
BFE,ALL,JS,1,,Js,120                !APLICA Js PARA FASE B
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,4,THEN                  !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,18                          !21,20,19,3,2,1
*IF,COL,EQ,1,THEN                      !CORRESPONDENTE A FASE -B
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,estator(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X
  ESLA,S,1
*ELSE
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,estator(LINHA,COL)
  ASEL,A,,P51X
  ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,-Js,120                !APLICA Js PARA FASE -B
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,5,THEN                  !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,18                          !24,23,22,6,5,4
*IF,COL,EQ,1,THEN                      !CORRESPONDENTE A FASE C
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,estator(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X
  ESLA,S,1
*ELSE
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,estator(LINHA,COL)
  ASEL,A,,P51X
  ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,-Js,-120               !APLICA Js PARA FASE C
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*IF,LINHA,EQ,6,THEN                  !SELECIONA ÁREAS DAS RANHURAS
*DO,COL,1,18                          !33,32,31,15,14,13
*IF,COL,EQ,1,THEN                      !CORRESPONDENTE A FASE -C
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,estator(LINHA,COL)
  ASEL,S,,P51X
  ESLA,S,1
*ELSE
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,estator(LINHA,COL)
  ASEL,A,,P51X
  ESLA,A,1
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,R,MAT,,2
BFE,ALL,JS,1,,-Js,-120               !APLICA Js PARA FASE -C
ESEL,ALL
ASEL,ALL
*ENDIF

*ENDDO

NSEL,S,LOC,X,0.08                      ! SELEÇÃO DO CONTORNO EXTERNO
NSEL,A,LOC,X,0                          ! SELEÇÃO DA ORIGEM
D,ALL,AZ,0                              ! CONDIÇÃO DE CONTORNO DIRICHLET
NSEL,ALL
ESEL,ALL
```

```
ASEL,ALL
```

```
/SOLUTION
ANTYPE,STATIC                !ANÁLISE ESTÁTICA (DC)
SOLVE
FINISH
```

```
/PREP7
NSEL,ALL
ESEL,ALL
ASEL,ALL
!N=13*6*2????????
```

!CALC_BH.txt (Captura B e H da Solução Estática não-linear)

```
/PREP7

CONT=0
CONT1=1
NAR=0
NUELEM=0
ASEL,S,MAT,,1
ESLA,S,1
*GET,NUAR,AREA,,COUNT
*GET,NUEL,ELEM,,COUNT
*DIM,NA,ARRAY,NUAR,1,0,
*DIM,BH,ARRAY,NUEL,3,0,
ASEL,ALL
*GET,NAREA,area,,COUNT
*DO,I,1,NAREA
  *GET,NAR,AREA,I,ATTR,MAT
  *IF,NAR,EQ,1,THEN
    CONT=CONT+1
    NA(CONT,1)=I
  *ENDIF
*ENDDO

/POST1
*DO,I,1,NUAR
  FLST,5,1,5
  FITEM,5,NA(I,1)
  ASEL,S,,P51X
  ESLA,S,1

  ETABLE,BSUM,B,SUM
  ETABLE,HSUM,H,SUM

  *GET,MINELEM,ELEM,,NUM,MIN      ! OBTER O MENOR NUMERO DE ELEMENTOS
  *IF,I,EQ,1,THEN
    *VGET,BH(1,1),ELEM,MINELEM,ETAB,BSUM,,2
    *VGET,BH(1,2),ELEM,MINELEM,ETAB,HSUM,,2
    *GET,NUELE,ELEM,,COUNT
    MELEM=MINELEM
    *DO,M,1,NUELE
      BH(M,3)=MELEM
      MELEM=MELEM+1
    *ENDDO
    NUELEM=NUELEM+NUELE
  *ELSE
    *VGET,BH(NUELEM+1,1),ELEM,MINELEM,ETAB,BSUM,,2
    *VGET,BH(NUELEM+1,2),ELEM,MINELEM,ETAB,HSUM,,2
    *GET,NUELE,ELEM,,COUNT
    MELEM=MINELEM
    *DO,M,(NUELEM+1),(NUELEM+NUELE)
      BH(M,3)=MELEM
      MELEM=MELEM+1
    *ENDDO
    NUELEM=NUELEM+NUELE
  *ENDIF
*ENDDO
```

ASEL,ALL
NSEL,ALL
ESEL,ALL

```
*CREATE,ansuitmp
*CFOPEN,RESULT_B,TXT,
*VWRITE,BH(1,1)
(1X,' ',F20.4)
*CFCLOS
*END
/INPUT,ansuitmp
```

```
*CREATE,ansuitmp
*CFOPEN,RESULT_H,TXT,
*VWRITE,BH(1,2)
(1X,' ',F20.4)
*CFCLOS
*END
/INPUT,ansuitmp
```

```
*CREATE,ansuitmp
*CFOPEN,RESULT_N,TXT,
*VWRITE,BH(1,3)
(1X,' ',F20.1)
*CFCLOS
*END
/INPUT,ansuitmp
```