

SIMULAÇÃO DO ENSAIO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA  
EM MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS SALIENTES  
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

GISELLA MARGARITA VIZHÑAY ZAMBRANO

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 CIÊNCIA EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Prof. José Andrés Santisteban Larrea D.Sc.

---

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
DEZEMBRO DE 2003

ZAMBRANO, GISELLA MARGARITA VIZHÑAY

Simulação do Ensaio de Resposta em  
Frequência em Máquinas de Pólos  
Salientes usando o Método dos Elementos  
Finitos [Rio de Janeiro] 2003.

XV, 97 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2003)

Tese - Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, COPPE

1. Método de Elementos Finitos
  2. Ensaio de Resposta em Frequência
- I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

A meus pais, José e Emilia, às  
minhas irmãs, Jacqueline, Rosa,  
Elizabeth e Cecilia.

---

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Ph. D. Antonio Carlos Ferreira pelo apoio, estímulo, confiança, ensinamentos e orientações convincentes.

Ao Professor Alquindar de Souza Pedroso pela guia oferecida, os oportunos esclarecimentos de dúvidas, e pelo freqüente interesse no desenvolvimento do presente trabalho.

A Enrique Chaparro, pela sua amizade, apoio e incentivos que foram fundamentais nos momentos difíceis do desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro com o qual tornou-se possível a finalização desta pesquisa.

---

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

SIMULAÇÃO DO ENSAIO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA  
EM MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS SALIENTES  
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

GISELLA MARGARITA VIZHÑAY ZAMBRANO

Dezembro/2003

Orientador: Antonio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

No presente trabalho são determinadas curvas características de Resposta em Frequência de uma máquina síncrona de pólos salientes, a partir das quais podem ser estabelecidos seus parâmetros operacionais. A obtenção destas curvas é feita através da simulação computacional do método de Resposta em Frequência com Rotor Travado (Standstill Frequency Response Test) descrito na norma IEEE-115A, que consiste basicamente na alimentação da máquina com tensão trifásica senoidal e frequência constante para obter sua resposta de regime permanente. As respostas obtidas em uma faixa de frequências pré-estabelecida são então utilizadas para estabelecimento das curvas de impedância e de corrente que servirão posteriormente para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente proposto para a máquina.

A simulação computacional utilizou o método dos Elementos Finitos que demonstrou ser uma ferramenta valiosa no estudo dos campos magnéticos, permitindo alcançar o objetivo proposto. Além disso, traz consigo a vantagem de permitir ao projetista reproduzir os ensaios normalizados sem a necessidade de construção de um protótipo.

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

FREQUENCY-RESPONSE TEST SIMULATION  
IN SALIENT POLE SYNCHRONOUS MACHINE  
BY FINITE-ELEMENT METHODS

GISELLA MARGARITA VIZHÑAY ZAMBRANO

December/2003

Advisor: Antonio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

This thesis presents the calculation of the characteristic curves of a salient pole synchronous machine by digital simulation of the Standstill Frequency Response Test. This test is described in the IEEE-115A standard procedures and consists basically in the connection of the armature windings to three-phase sinusoidal voltage source in the order to obtain steady-state responses. The values obtained in the test are then used in the calculation of the impedance and currents curves that will later serve to determine the equivalent circuit parameters of the machine.

The simulation was carried out using a Finite-Elements Method based software which proved to be a valuable tool for the calculation of magnetic fields. It has been shown that this procedure may be used by the designer to reduce the number of intermediate prototypes during the designing process.

# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XII
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
1.1 ASPECTOS GERAIS E OBJETIVOS .....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
1.3 OBJETIVOS .....	9
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	9
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>10</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	10
2.2 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS PARA UMA MÁQUINA SÍNCRONA.....	11
2.3 INDUTÂNCIAS OPERACIONAIS DA MÁQUINA NO EIXO DIRETO.....	13
2.4 INDUTÂNCIAS OPERACIONAIS DA MÁQUINA NO EIXO EM QUADRATURA.....	18
2.5 PARÂMETROS DAS INDUTÂNCIAS OPERACIONAIS DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	20
2.6 ENSAIOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM MÁQUINAS SÍNCRONAS. ....	23
2.6.1 <i>Procedimento para Posicionar o Rotor com fins de Ensaio no Eixo d</i> .....	24
2.6.2 <i>Procedimento para Posicionar o Rotor com fins de Ensaio no Eixo q</i> .....	25
2.6.3 <i>Ensaio no Eixo d</i> .....	26
2.6.4 <i>Ensaio no Eixo q</i> .....	30
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>32</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	32
3.2 CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA SÍNCRONA UTILIZADA.....	32
3.3 PROGRAMA UTILIZADO.....	34
3.4 MODELAGEM DA MÁQUINA USANDO ELEMENTOS FINITOS.....	35
3.5 CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS SÍNCRONAS.....	38
3.6 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	45
3.6.1 <i>Posicionamento do Rotor para Ensaio no Eixo d</i> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.6.2 <i>Posicionamento do Rotor para Ensaio no Eixo q</i> .....	48
3.6.3 <i>Curva de Indutância Síncrona <math>L_d(s)</math></i> .....	50
3.6.4 <i>Curva da Função de Transferência <math>sG(s)</math></i> .....	53
3.6.5 <i>Curva da Indutância Mútua entre o Campo e a Armadura <math>L_{af}(s)</math></i> .....	54
3.6.6 <i>Curva da Indutância Síncrona <math>L_q(s)</math></i> .....	56
3.7 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE INDUTÂNCIA PELO MÉTODO DO VETOR POTENCIAL .....	59

---

3.8	INFLUÊNCIA DO PROJETO NOS PARÂMETROS OPERACIONAIS .....	60
3.8.1	<i>Presença do Enrolamento Amortecedor</i> .....	60
3.8.2	<i>Configuração do Enrolamento Amortecedor</i> .....	61
3.8.3	<i>Consideração da Corrente no Núcleo</i> .....	62
3.9	CÁLCULO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS .....	63
<b>CAPÍTULO 4</b> .....		<b>67</b>
4.1	CONCLUSÕES .....	67
4.2	SUGESTÕES .....	68
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....		<b>69</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....		<b>71</b>
A.1	PROGRAMA FONTE .....	71

---

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Representação da onda de corrente de armadura na fase a, após o curto circuito. ....	3
Figura 2.1: Identificação dos percursos de fluxo direto e em quadratura. ....	10
Figura 2.2: Circuito equivalente no eixo $d$ e no eixo $q$ . ....	11
Figura 2.3: Diagrama de blocos no eixo $d$ . ....	14
Figura 2.4: Diagrama de blocos para o eixo em quadratura. ....	19
Figura 2.5: Diagrama de conexões para posicionar o rotor com fins de ensaios no eixo $d$ . ....	24
Figura 2.6: Diagrama de conexões para posicionar o rotor com fins de ensaio no eixo $q$ . ....	25
Figura 2.7: Diagrama de conexões para determinar a curva de indutância $L_d(s)$ . ....	26
Figura 2.8: Diagrama de conexões para determinar função de transferência $sG(s)$ . ....	28
Figura 2.9: Diagrama de conexões para determinar a curva da indutância mútua $L_{af0}(s)$ . ....	29
Figura 2.10: Diagrama de conexões para determinar a curva da indutância $L_q(s)$ . ....	30
Figura 3.1: Geometria da ranhura. ....	33
Figura 3.2: Geometria do pólo. ....	33
Figura 3.3: (a) Metade de um pólo do rotor; (b) Ranhura do estator. ....	36
Figura 3.4: Máquina síncrona de pólos salientes, modelada no ANSYS. ....	36
Figura 3.5: Enrolamento da armadura. ....	37
Figura 3.6: Enrolamento da armadura. ....	37
Figura 3.7: Representação gráfica de um determinado elemento finito $i$ . ....	39
Figura 3.8: Representação gráfica do comprimento total da bobina. ....	40
Figura 3.9: Curva de indutância própria da fase a. ....	41
Figura 3.10: Curva de indutância mútua entre a fase a e a fase b. ....	41
Figura 3.11: Representação do enrolamento amortecedor. ....	46
Figura 3.12: Tensão induzida no campo para determinar a posição correta do rotor para ensaios no eixo $d$ . ....	47
Figura 3.13: Linhas de fluxo quando é encontrada a posição correta do rotor para ensaios no eixo direto. ....	47
Figura 3.14: Tensão induzida no campo para determinar a posição correta do rotor para ensaios no eixo $q$ . ....	49
Figura 3.15: Linhas de fluxo quando se encontra a posição correta do rotor para ensaios no eixo $q$ . ....	49
Figura 3.16: Curvas no eixo $d$ da corrente de armadura. ....	51
Figura 3.17: Linhas de fluxo, para determinar curva $L_d(s)$ , com o rotor posicionado no eixo $d$ ( $330^\circ$ ). ....	51
Figura 3.18: Curva característica de impedância no eixo $d$ . ....	52
Figura 3.19: Curva característica da indutância no eixo $d$ . ....	53
Figura 3.20: Curva da corrente no enrolamento de campo. ....	53
Figura 3.21: Curva da função de transferência $sG(s)$ . ....	54
Figura 3.22: (a) Tensão induzida no campo; (b) Corrente de armadura. ....	55
Figura 3.23: Curva característica da impedância $Z_{af0}(s)$ . ....	55
Figura 3.24: Curva da indutância mútua $L_{af0}(s)$ . ....	56
Figura 3.25: Curva da corrente de armadura no eixo $q$ . ....	57
Figura 3.26: Curva característica da impedância, $Zq(s)$ , no eixo $q$ . ....	57

Figura 3.27: Linhas de fluxo para determinar a curva $L_q(s)$ com o rotor posicionado no eixo $q$ .....	58
Figura 3.28: Curva característica da indutância no eixo $q$ .....	58
Figura 3.29: Curva comparativa do efeito amortecedor nas indutâncias: (a) no eixo $d$ ; e (b) no eixo $q$ . ...	60
Figura 3.30: Curva comparativa da configuração do amortecedor nas indutâncias:(a) no eixo $d$ ; (b) no eixo $q$ .	61
Figura 3.31: Influência da corrente no Ferro: (a) Indutância no eixo $d$ ; (b) Indutância no eixo $q$ .....	63

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Comparação do cálculo da indutância $L_d(s)$ usando diferentes metodologias. ....	64
Tabela 3.2: Comparação do cálculo da indutância $L_q(s)$ usando diferentes metodologias. ....	64
Tabela 3.3: Comparação do cálculo da indutância $L'_d(s)$ , usando diferentes metodologias. ....	64
Tabela 3.4: Comparação do cálculo das indutâncias subtransitórias, usando diferentes metodologias.....	65

---

## Lista de Símbolos

---

$A$	Vetor potencial magnético.
$A_z$	Vetor potencial magnético na direção z.
$B$	Densidade de fluxo magnético.
$e_{fd}$	Tensão induzida no enrolamento de campo.
$E_{máx}$	Tensão máxima.
$E_{mín}$	Tensão mínima.
$f$	Frequência.
$\text{Im}$	Corresponde a ‘Parte imaginária de’.
$i_a$	Corrente na fase a.
$i_{arm}$	Corrente de armadura.
$I_{cc}$	Corrente de curto circuito.
$i_d$	Corrente de armadura no eixo direto.
$i_D$	Corrente do amortecedor no eixo direto.
$i_f, i_{fd}$	Corrente de campo.
$I_{máx}$	Corrente máxima.
$I_{mín}$	Corrente mínima.
$I_o$	Corrente em vazio
$i_q$	Corrente de armadura no eixo em quadratura.
$i_Q$	Corrente do amortecedor no eixo em quadratura.
$J$	Densidade de corrente.
$\ell$	Comprimento.
$L$	Indutância.
$L_{aa}$	Indutância própria da fase a.
$L_{aa2}$	Parcela variável com o ângulo da indutância própria da fase a.
$L_{ad}$	Indutância relativa ao fluxo mútuo entre os circuitos do rotor e da armadura.
$L_{af0}$	Indutância mútua entre os enrolamentos de campo e armadura.
$L_{ag}$	Parcela constante da indutância própria da fase a.

---

---

$L_{a1}$	Indutância de dispersão da fase a.
$L_{aaq}$	Indutância mútua entre os circuitos do rotor e da armadura no eixo em quadratura.
$L_d$	Indutância síncrona no eixo direto.
$L'_d$	Indutância transitória no eixo direto.
$L''_d$	Indutância subtransitória no eixo direto.
$L_D$	Indutância própria do amortecedor no eixo direto.
$L_f$	Indutância própria de campo.
$L_l$	Indutância de dispersão.
$L_{lD}$	Indutância de dispersão do amortecedor no eixo direto.
$L_{lf}$	Indutância de dispersão do rotor.
$L_{lQ}$	Indutância de dispersão do amortecedor no eixo em quadratura.
$L_q$	Indutância síncrona no eixo em quadratura.
$L''_q$	Indutância subtransitória no eixo em quadratura.
$L_Q$	Indutância do amortecedor no eixo em quadratura.
$M$	Indutância mútua.
$M_{ab}$	Indutância mútua entre as fases a e b.
$máx$	Corresponde a 'Valor máximo de'.
$mín$	Corresponde a 'Valor mínimo de'.
$N$	Número de condutores.
$N_E$	Número de elementos.
$r, R_a, R_{arm}$	Resistência do enrolamento de armadura.
$Re$	Corresponde a 'Parte real de'.
$r_D$	Resistência do amortecedor no eixo direto.
$r_f$	Resistência do enrolamento de campo.
$r_Q$	Resistência do amortecedor no eixo em quadratura.
$s$	Operador de Laplace.

---

---

$S$	Superfície.
$SSFR$	Ensaio de resposta em frequência com rotor travado.
$T_D, T_3$	Constantes de tempo do amortecedor.
$T_d', T_2$	Constante de tempo transitória no eixo direto, em curto circuito.
$T_d'', T_4$	Constante de tempo subtransitória no eixo direto, em curto circuito.
$T_{do}', T_f$	Constante de tempo transitória no eixo direto, em circuito aberto.
$T_{do}'', T_1$	Constante de tempo subtransitória no eixo direto, em circuito aberto.
$T_{kD}$	Constante de tempo de dispersão do amortecedor no eixo direto.
$T_q'', T_5$	Constante de tempo subtransitória de eixo quadratura, em curto circuito.
$T_{qo}'', T_Q$	Constante de tempo subtransitória de eixo quadratura, em circuito aberto.
$v_{arm}, e_{arm}$	Tensão de armadura.
$v_d, e_d$	Tensão da armadura no eixo direto.
$v_f$	Tensão aplicada no enrolamento de campo.
$v_q$	Tensão da armadura no eixo em quadratura.
$X_{ds}$	Reatância síncrona saturada no eixo direto
$X_d$	Reatância síncrona no eixo direto.
$X_{qs}$	Reatância síncrona saturada no eixo em quadratura
$X_q$	Reatância síncrona no eixo em quadratura.
$\omega$	Frequência angular da máquina.
$Z_{af\phi}$	Impedância mútua entre o rotor e o estator.
$Z_{arm}$	Impedância de armadura.
$Z_d$	Impedância síncrona no eixo direto.
$Z_q$	Impedância síncrona no eixo em quadratura.

---

$2D$	Plano bi-dimensional $x$ - $y$ .
$3D$	Plano tri-dimensional $x$ - $y$ - $z$ .
$\psi$	Fluxo.
$\lambda_d$	Enlace de fluxo magnético no eixo direto.
$\lambda_D$	Enlace de fluxo magnético do amortecedor no eixo direto.
$\lambda_f$	Enlace de fluxo magnético no enrolamento de campo.
$\lambda_q$	Enlace de fluxo magnético no eixo em quadratura.
$\lambda_Q$	Enlace de fluxo magnético do amortecedor no eixo em quadratura.
$\theta$	Deslocamento angular.
$\theta_d$	Ângulo de giro do rotor para ensaios no eixo direto.
$\theta_q$	Ângulo de giro do rotor para ensaios no eixo em quadratura.
$\theta_{x_d}$	Fase da curva de reatância no eixo direto.

---

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Aspectos Gerais e Objetivos

Conhecer o comportamento dinâmico das máquinas elétricas nos Sistemas Elétricos de Potência é fundamental tanto para o fornecimento eficiente da energia quanto para o bom desempenho do sistema (estabilidade para um amplo número de perturbações). Tendo em conta que a maior parte da energia elétrica gerada é produzida através de máquinas síncronas (geradores síncronos), para fins de estudos de estabilidade e controle dos Sistemas de Potência, é necessário representar a máquina síncrona através de um modelo matemático caracterizado por um circuito elétrico equivalente.

É de grande interesse obter os valores exatos dos parâmetros, não somente para apurar a análise e melhorar o desempenho da máquina síncrona em operação, mas também para permitir ao fabricante, durante o projeto, avaliar com maior precisão, através de simulações em protótipos, se essa atenderá, sob condições reais, às especificações estabelecidas pelo cliente.

Atualmente, a simulação numérica tornou-se uma grande ferramenta a ser utilizada devido à possibilidade de simular diferentes condições de operação de uma determinada máquina síncrona e, conseqüentemente, estudar o seu correspondente funcionamento. Além disso, é possível otimizar o projeto dessas máquinas através da simulação numérica, permitindo economizar tempo e dinheiro na construção de protótipos, transformando-a numa das principais ferramentas do desenvolvimento tecnológico.

---

Um desses métodos numéricos é o Método de Elementos Finitos, que vem se destacando devido à sua principal característica que é a de representar com grande exatidão os fenômenos eletromagnéticos que acontecem dentro dos principais equipamentos, como a máquina síncrona, que compõem um sistema de potência.

Existem diferentes tipos de ensaios para a determinação dos parâmetros dinâmicos de uma máquina síncrona. Estes serão descritos a seguir:

- a) *Ensaio de Circuito Aberto* [1], [2]. Neste ensaio, a máquina síncrona é acionada mecanicamente à velocidade síncrona, com os terminais de armadura a circuito aberto, e medindo a tensão terminal correspondente para diferentes valores de corrente de campo. Com essas medições é determinada a denominada “*Característica em Vazio*” do gerador, onde a tensão induzida no enrolamento de armadura é igual à tensão nos terminais do enrolamento de campo. Dependendo do objetivo fixado, a curva característica mencionada pode ser considerada linear em uma faixa determinada, mas apresenta saturação para valores maiores de corrente de campo.

Através deste ensaio é medido o valor da corrente em vazio,  $I_o$ , correspondente à corrente de campo para a tensão nominal, não saturada, na linha do entreferro. A linha de entreferro é a linha tangente à *Característica em Vazio* na origem de coordenadas. Essa corrente será utilizada para a determinação da reatância síncrona do eixo direito cujo cálculo se faz utilizando a equação mostrada a seguir:

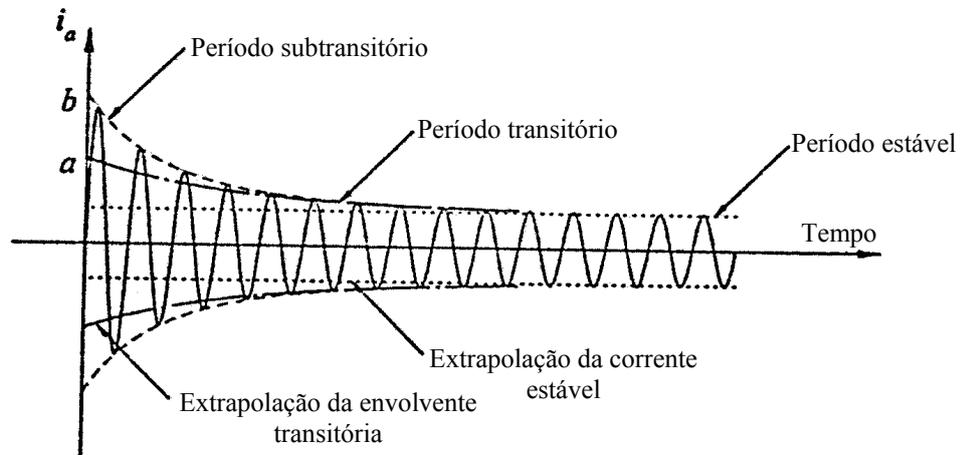
$$X_d = \frac{I_{cc}}{I_o} \text{ pu} \quad (1.1)$$

Na expressão matemática (1.1), o valor da corrente  $I_{cc}$  é determinado no *Ensaio de Curto-Circuito* descrito a seguir.

- b) *Ensaio de Curto Circuito* [1], [2]. Neste ensaio a máquina também é acionada como gerador à velocidade síncrona, mas, os terminais do enrolamento de armadura estão em curto circuito. Aumentando gradualmente a corrente de campo são medidos diferentes valores para a corrente de armadura obtendo-se uma curva linear conhecida como “*Curva Característica de Curto-Circuito*”.

$I_{cc}$  representa o valor da corrente de campo que produz a corrente nominal de armadura da máquina com o qual é calculada a reatância síncrona no eixo direito, conforme apresentado na equação (1.1).

O ensaio de curto-circuito também é o método recomendado pela norma *IEEE 115* [1] para a determinação dos parâmetros transitórios e subtransitórios no eixo direto. Através de um osciloscópio é registrado o comportamento ondulatório da corrente de armadura no tempo, conforme apresentado na **Figura 1.1**.



**Figura 1.1:** Representação da onda de corrente de armadura na fase a, após o curto circuito.

Na **Figura 1.1** observa-se o traçado de três diferentes linhas envolventes: a *subtransitória* é a envolvente externa da onda de corrente e que se apresenta desde o primeiro ciclo, com uma rápida queda de amplitude; a *transitória*, extrapolada até o tempo zero, é uma envolvente com tempo de duração maior do que a anterior e que se anula quando o regime permanente final é estabelecido; e, a envolvente de estado *estável* correspondente a uma linha de amplitude constante extrapolada até o tempo zero.

A *reatância transitória* da máquina corresponde ao quociente entre a tensão de armadura, quando a máquina está operando normalmente em circuito aberto, e a componente de corrente transitória. A componente de corrente transitória é determinada com o valor médio das correntes medidas, como resultado da extrapolação até o tempo zero das envolventes *transitórias*, nas três fases.

Um procedimento similar ao anterior é seguido para determinar a *reatância sub-transitória*, onde a componente de corrente sub-transitória é determinada com o valor médio até o tempo zero das envolventes sub-transitórias nas três fases.

Além, este ensaio é comumente utilizado como um dos ensaios para verificação preliminar de que o projeto mecânico da máquina é adequado para suportar os esforços conseqüentes de curto-circuito e de condições anormais de operação.

- c) *Ensaio de escorregamento* [1]. Neste ensaio a máquina é acionada a uma velocidade ligeiramente diferente da velocidade síncrona, com os terminais de campo em circuito aberto e os terminais de armadura alimentados mediante uma fonte de tensão trifásica balanceada e de seqüência positiva. A tensão de alimentação tem um valor menor àquele no ponto de saturação da *Curva Característica de Vazio* (aproximadamente 25% da tensão nominal). Neste ensaio são medidos a corrente de armadura, a tensão de armadura e a tensão de campo induzida.

Na prática apresentam-se dificuldades para manter constante a velocidade angular do rotor devido ao efeito dos pólos salientes e às correntes induzidas nos enrolamentos amortecedores os quais produzem um torque pulsante. Além disso, a tensão induzida no enrolamento de campo pode alcançar valores perigosos quando o escorregamento é grande.

Através deste ensaio são determinadas as *reatâncias síncronas* de eixos direto e em quadratura cujo procedimento é descrito a seguir.

A *reatância síncrona* é calculada através dos valores máximo,  $E_{máx}$ , e mínimo,  $E_{mín}$ , da tensão de armadura; e, através dos valores de corrente máxima,  $I_{máx}$ , e mínima,  $I_{mín}$ , da corrente induzida nas terminais do rotor, conjuntamente com o valor da reatância não saturada do eixo direto. O procedimento até obter a *reatância síncrona* no eixo em quadratura é descrito através das expressões matemáticas apresentadas a seguir:

$$X_{ds} = \frac{E_{máx}}{I_{mín}} \quad (1.2)$$

$$X_{qs} = \frac{E_{\min}}{I_{\max}} \quad (1.3)$$

$$X_q = X_d \frac{X_{qs}}{X_{ds}} = X_d \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \times \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \quad (1.4)$$

onde,  $X_{ds}$ ,  $X_{qs}$  são os valores das reatâncias síncronas saturadas no eixo direito e em quadratura, respectivamente.

- d) *Ensaio com tensão imposta* [1]. Este método é recomendado pela norma para determinar o valor da *reatância subtransitória* no eixo em quadratura consiste em travar o rotor, estando ligadas em série duas fases do enrolamento de armadura com uma fonte de tensão e o enrolamento de campo conectado em curto circuito.

No procedimento de cálculo da *reatância subtransitória* são calculados três coeficientes ( $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ ), cada um correspondente a uma fase, conforme descrito através da expressão matemática apresentada a seguir:

$$C_i = \frac{E}{I} \quad (1.5)$$

onde  $i \in \{1, 2, 3\}$  corresponde a cada uma das três fases da máquina; e,  $E$  corresponde ao valor em p.u. da tensão de linha aplicada e  $I$  é o valor da corrente de linha em p.u.

Esses três coeficientes servem para determinar o valor numérico  $K$  e a amplitude,  $M$ , da componente senoidal:

$$K = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{3} \quad (1.6)$$

$$M = +\sqrt{(C_2 - K)^2 + \frac{(C_3 - C_1)^2}{3}} \quad (1.7)$$

Os dois valores numéricos calculados anteriormente são utilizados para finalmente calcular o valor aproximado da *reatância sub-transitória* no eixo em quadratura:

$$X_q'' = \frac{K \pm M}{2} \quad (1.8)$$

A *reatância sub-transitória* corresponde ao maior valor calculado pela expressão (1.8).

- e) *Ensaio de Resposta em Freqüência*. O Método de Resposta em Freqüência consiste, basicamente, em variar a freqüência do sinal de tensão aplicada ao enrolamento de armadura ou de campo, em uma determinada faixa de freqüências, e analisar a resposta de saída. Dessa maneira, nesse tipo de ensaio não é necessário conhecer as partes que constituem a estrutura interna da máquina e a interdependência dinâmica entre elas; é suficiente com a observação do sinal de saída e compará-lo com o sinal de entrada.

A diferença fundamental que têm os ensaios de Resposta em Freqüência, comparada com os ensaios descritos anteriormente, consiste que através deste método podem ser determinados todos os parâmetros da máquina sob estudo. Assim, conforme fora descrito, em cada uma das outras metodologias são determinados só alguns parâmetros operativos da máquina além de ter que submeter a valores muito elevados da corrente ou grandes variações pulsantes de esforços mecânicos no rotor.

No presente trabalho, o objetivo principal foi determinar todas as curvas características de uma determinada máquina síncrona de pólos salientes através dos ensaios de Resposta em Freqüência. Utilizando técnicas de identificação de parâmetros podem ser determinados todos os parâmetros operativos de uma máquina síncrona a partir das curvas características obtidas. Dessa maneira, a norma *IEEE 115-A* [3] descreve detalhadamente os procedimentos necessários para a preparação e execução dos ensaios de Resposta em Freqüência com rotor travado para máquinas síncronas (*SSFR*).

## 1.2 Revisão Bibliográfica

A necessidade de se utilizar modelos equivalentes consistentes para representação transitória da máquina síncrona em estudos de estabilidade e controle dos sistemas de potência, ainda na etapa do projeto, tem levado diversos pesquisadores à procura de métodos para determinação dos parâmetros de máquina a serem utilizados nos modelos propostos.

Num dos trabalhos de pesquisa desenvolvidos por Nabeta e Cardoso [4], se propõe uma metodologia para determinar os parâmetros de uma máquina síncrona de pólos salientes baseada na simulação numérica dos Ensaios de Resposta em Freqüência, usando o método de Elementos Finitos através do programa FLUX 2D. Os resultados são comparados com os valores obtidos nos Ensaios de curto circuito trifásico realizados na máquina real.

A obtenção do circuito equivalente para uma máquina síncrona de pólos salientes, utilizando os Ensaios de Resposta em Freqüência com rotor travado também foi pesquisada por Park [5]. As máquinas ensaiadas foram um motor síncrono e um hidrogerador com um número inteiro e um número fracionário de bobinas por pólo e por fase, respectivamente, pesquisando mediante este método os efeitos da posição do rotor quando possui bobinas de passo fracionário.

O principal interesse na pesquisa de Bissing [6] foi a obtenção de um modelo de circuito equivalente para máquinas com rotor maciço que represente nas altas freqüências o efeito do fluxo de corrente transitória, tanto no enrolamento de campo e enrolamento amortecedor como no núcleo do rotor.

Os parâmetros são identificados através da combinação de medições fornecidas pelo Ensaio de Resposta em Freqüência com rotor parado num turbo gerador com os resultados obtidos do ensaio normalizado de curto circuito sem carga.

Nabeta [7] propõe a aplicação do Principio de Superposição na simulação numérica dos ensaios de curto circuito simétrico sem carga em máquinas síncronas. A simulação é realizada através de elementos finitos utilizando acoplamentos de circuitos elétricos e variação no tempo permitindo considerar tanto a impedância de cabeça de

---

bobina como o movimento do rotor. Os valores das reatâncias síncronas transitórias e subtransitórias como as constantes de tempo no eixo direto, obtidos nos ensaios de curto circuito feitos na máquina real, são comparados com os valores obtidos na simulação de curto circuito e do Ensaio de Resposta em Freqüência (*SSFR*).

O trabalho desenvolvido por Turner [8], propõe um método alternativo para a obtenção dos parâmetros de uma máquina síncrona (reatâncias e constantes de tempo). O método consiste em aplicar um curto circuito no enrolamento de armadura, enquanto está sendo energizado em uma ou duas fases com corrente contínua produzindo assim uma queda, gradual e de tipo exponencial, na intensidade de corrente. A metodologia deste trabalho foi aplicada em dois grandes turbogeradores, e se faz uma comparação através de simulação computacional, com elementos finitos, tentando assim avaliar as diferentes dificuldades tanto no cálculo e na análise como nos ensaios na determinação dos parâmetros da máquina.

Na pesquisa de Keyhani [9], o objetivo principal foi a identificação, no domínio do tempo, dos parâmetros de modelo linear de uma máquina síncrona de pólos salientes. Com o modelo equivalente estabelecido, são feitas simulações que são validadas com medições.

Existem outros trabalhos que discutem o número de funções de transferência a serem utilizados para a obtenção do modelo da máquina síncrona, bem como trabalhos que discutem diferentes métodos para a obtenção da função de transferência obtida através dos Ensaio de Resposta em Freqüência, que não serão detalhados porque os temas tratados saem do escopo de estudo do presente trabalho.

Nos trabalhos que foram descritos acima, a identificação de parâmetros é feita de uma maneira global, sem identificar os aspectos de projeto que podem afetá-los. Uma análise completa do assunto demandaria uma simulação tridimensional, bem como um conhecimento completo do projeto da máquina, implicando em dados que não são disponibilizados pelos fabricantes. Assim, pretende-se nesta dissertação mostrar como o método dos elementos finitos pode ser aplicado também para investigar o efeito de algumas variáveis do projeto no desempenho elétrico da máquina.

---

### 1.3 Objetivos

Tendo-se em consideração os diferentes aspectos analisados acima sobre a identificação dos parâmetros dinâmicos de uma máquina síncrona na fase do projeto, o presente trabalho tem como objetivos:

- 1) Simular computacionalmente os Ensaios de Resposta em Freqüência com rotor travado numa máquina síncrona de pólos salientes (gerador síncrono), utilizando um programa comercial para análise de circuitos eletromagnéticos que utiliza o método dos Elementos Finitos, ANSYS® [5];
- 2) Fazer uma descrição de como essa análise (Simulação Computacional usando Método dos Elementos Finitos) pode ser utilizada para representar tanto o efeito de fenômenos como corrente no ferro como a representação do efeito das barras amortecedoras nas sapatas polares.

### 1.4 Estrutura da Tese

O presente trabalho foi organizado nos capítulos descritos a seguir:

**CAPITULO 2: PARÂMETROS OPERACIONAIS DA MÁQUINA SÍNCRONA.** Neste capítulo são descritos os Ensaios de Resposta em Freqüência aplicados às máquinas síncronas para determinar os parâmetros operacionais da máquina, bem como a explicação, em forma analítica, de como são obtidos estes parâmetros.

**CAPÍTULO 3: SIMULAÇÃO E RESULTADOS.** São apresentados os dados da máquina síncrona utilizada nas simulações. Além disso, apresenta-se a forma de simulação dos Ensaios de Resposta em Freqüência usando o programa ANSYS®, bem como a sua utilidade na fase do projeto da máquina.

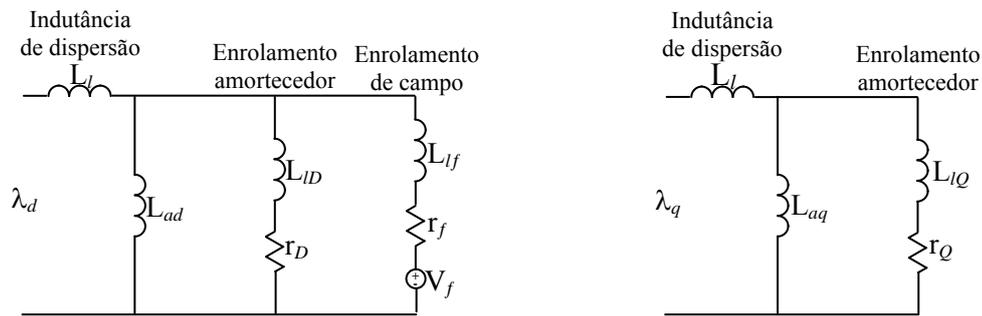
**CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES E SUGESTÕES.** Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas dos resultados das simulações dos Ensaios de Resposta em Freqüência aplicados para a obtenção dos parâmetros operacionais da máquina síncrona utilizada para teste. São apresentadas, também, sugestões para trabalhos futuros.

---



O eixo direto é o caminho de relutância mínima percorrido pelo fluxo magnético. O eixo em quadratura é identificado como o caminho de máxima relutância para o fluxo magnético. Na **Figura 2.1**, pode ser observado com mais detalhes o percurso do fluxo magnético no eixo direto (percurso identificado por  $\phi_d$ ) e no eixo em quadratura (percurso identificado por  $\phi_q$ ).

O exemplo de um possível conjunto de circuitos equivalentes é mostrado na **Figura 2.2**.



**Figura 2.2:** Circuito equivalente no eixo  $d$  e no eixo  $q$

## 2.2 Fundamentos Matemáticos para uma Máquina Síncrona

O modelo matemático de uma máquina síncrona tem, no estator, um enrolamento trifásico (fases  $a - b - c$ ) e, no rotor, além do enrolamento de campo ( $f$ ), pode existir um enrolamento amortecedor no eixo  $d$  (enrolamento amortecedor  $D$ ) e um enrolamento amortecedor no eixo  $q$  (enrolamento amortecedor  $Q$ ).

Para o estudo dinâmico de uma máquina, é usual a transformação de variáveis, com a finalidade de simplificar os complexos sistemas de equações diferenciais que representam essas máquinas. Uma destas transformações de variáveis é a *Transformação de Park*, [11]. Dessa maneira, utilizando a transformação de Park, o conjunto de equações de tensão do estator, com relação aos eixos  $d$  e  $q$ , é mostrado a seguir:

$$v_d = \frac{d\lambda_d}{dt} - r_i d - \omega\lambda_q \quad (2.1)$$

$$v_q = \frac{d\lambda_q}{dt} - r_i q + \omega\lambda_d \quad (2.2)$$

No rotor, a equação de tensão de campo, deduzida da transformação de Park, é mostrada a seguir:

$$v_f = r_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (2.3)$$

Se existirem enrolamentos amortecedores no rotor, as equações diferenciais de tensão (com relação aos eixos  $d$  e  $q$ ) são expressas da seguinte maneira:

$$0 = r_D i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \quad (2.4)$$

$$0 = r_Q i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} \quad (2.5)$$

Nas equações de enlace de fluxo magnético, tanto do estator quanto do rotor, é utilizada também a Transformação de Park, obtendo-se assim as expressões mostradas a seguir:

$$\lambda_d = -L_d i_d + L_{ad} i_f + L_{ad} i_D \quad (2.6)$$

$$\lambda_q = -L_q i_q + L_{aq} i_Q \quad (2.7)$$

$$\lambda_f = -L_{ad} i_d + L_f i_f + L_{ad} i_D \quad (2.8)$$

$$\lambda_D = -L_{ad} i_d + L_{ad} i_f + L_D i_D \quad (2.9)$$

$$\lambda_Q = -L_{aq} i_q + L_Q i_Q \quad (2.10)$$

Sobre o modelo de Park da máquina síncrona, apresentado anteriormente através do conjunto de equações diferenciais de tensão e fluxo, será aplicada a *Transformada de Laplace*.

Todas as grandezas nesse conjunto de equações variam em torno dos seus respectivos pontos de operação inicial. Dessa maneira, as condições iniciais dos termos correspondentes a essas equações podem ser retiradas das expressões, e as variáveis eletromagnéticas representam variações em torno das condições iniciais de operação. Portanto, as equações de Park, após a aplicação da transformada de Laplace, podem ser re-escritas da seguinte forma:

$$V_f(s) = s\lambda_f(s) + r_f I_f(s) \quad (2.11)$$

$$0 = s\lambda_D(s) + r_D I_D(s) \quad (2.12)$$

$$0 = s\lambda_Q(s) + r_Q I_Q(s) \quad (2.13)$$

$$\lambda_d(s) = -L_d I_d(s) + L_{ad} I_f(s) + L_{ad} I_D(s) \quad (2.14)$$

$$\lambda_q(s) = -L_q I_q(s) + L_{aq} I_Q(s) \quad (2.15)$$

$$\lambda_f(s) = -L_{ad} I_d(s) + L_f I_f(s) + L_{ad} I_D(s) \quad (2.16)$$

$$\lambda_D(s) = -L_{ad} I_d(s) + L_{ad} I_f(s) + L_D I_D(s) \quad (2.17)$$

$$\lambda_Q(s) = -L_{aq} I_q(s) + L_Q I_Q(s) \quad (2.18)$$

onde  $s=j\omega$ , sendo  $\omega$  a frequência angular da máquina.

A partir deste conjunto de equações (o modelo de Park após a transformação de Laplace), é possível estabelecer as indutâncias operacionais da máquina correspondentes a cada eixo (eixos  $d$  e  $q$ ).

### 2.3 Indutâncias Operacionais da Máquina no Eixo Direto

Para a determinação da expressão matemática dos parâmetros operacionais da máquina síncrona, correspondente ao eixo  $d$ , são consideradas as equações de tensão (2.11) e (2.12) e as equações de fluxo (2.16) e (2.17). Dessa maneira, primeiramente, é substituída a expressão matemática do fluxo magnético de campo (equação (2.16)),  $\lambda_f$ , na equação da tensão de campo (equação (2.11)), dando como resultado a expressão mostrada a seguir:

$$V_f(s) = -sL_{ad} I_d(s) + sL_f I_f(s) + sL_{ad} I_D(s) + r_f I_f(s) \quad (2.19)$$

Igualmente, a expressão matemática do fluxo magnético no enrolamento amortecedor  $D$ , (equação (2.17)),  $\lambda_D$ , é substituída na equação (2.12) para obter a seguinte equação:

$$0 = -sL_{ad} I_d(s) + sL_{ad} I_f(s) + sL_D I_D(s) + r_D I_D(s) \quad (2.20)$$

Uma vez estabelecidas as expressões matemáticas anteriores (equações (2.19) e (2.20)), o objetivo agora é representar o fluxo magnético no eixo  $d$ ,  $\lambda_d$ , como função das magnitudes de entrada ao sistema,  $V_f(s)$  (tensão de campo) e  $I_d(s)$  (corrente de armadura no eixo  $d$ ). Para isso, da equação (2.19) é extraído o termo  $I_f(s)$  e colocado como função das outras magnitudes. Uma vez feito, a expressão de  $I_f(s)$  é levada e substituída na equação (2.20). Dessa maneira, é possível obter uma expressão da corrente  $I_D(s)$  em função das entradas ao sistema.

$$I_D(s) = \frac{-sL_{ad}V_f(s) + [sL_{ad}(r_f + sL_f) - s^2L_{ad}^2]I_d(s)}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_f + sL_f)} \quad (2.21)$$

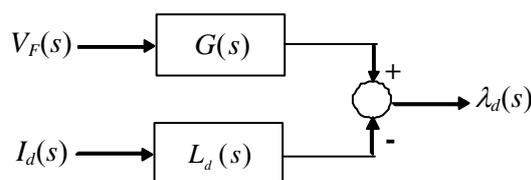
O último termo na equação do fluxo magnético, no eixo  $d$ , a ser expressa como função das magnitudes de entrada à máquina, é a corrente de campo  $I_f(s)$ . Para isso, a expressão de  $I_D(s)$ , na equação (2.21), é levada à equação (2.19). Dessa maneira, tem-se a corrente de campo como função das entradas ao sistema.

$$I_f(s) = \frac{(r_D + sL_D)V_f(s) + [sL_{ad}(r_D + sL_D) - s^2L_{ad}^2]I_d(s)}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_f + sL_f)} \quad (2.22)$$

Finalmente, as expressões de  $I_D(s)$  e  $I_f(s)$  são substituídas na equação (2.14), com a qual se tem uma nova maneira de representar o enlace de fluxo magnético no eixo direto como função das entradas do sistema:

$$\lambda_d(s) = \frac{[L_{ad}(r_D + sL_D) - sL_{ad}^2]}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_f + sL_f)}V_f(s) - \left[ L_d - \frac{sL_{ad}^2(r_D + sL_D) - 2s^2L_{ad}^3 + sL_{ad}^2(r_f + sL_f)}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_f + sL_f)} \right]I_d(s) \quad (2.23)$$

A expressão matemática correspondente à equação (2.23) pode ser representada como um diagrama de blocos, mostrado na **Figura 2.3**:



**Figura 2.3:** Diagrama de blocos no eixo  $d$ .

Na **Figura 2.3**, a função de transferência  $G(s)$  corresponde ao primeiro termo da equação (2.23) que representa a relação entre o enlace de fluxo magnético no eixo  $d$ ,  $\lambda_d(s)$  e a tensão de campo,  $V_f(s)$ , (quando  $I_d(s) = 0$ ). Portanto, a expressão matemática dessa função de transferência é mostrada a seguir:

$$G(s) = \frac{[L_{ad}(r_D + sL_D) - sL_{ad}^2]}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_f + sL_f)} \quad (2.24)$$

A função de transferência  $G(s)$ , definida na equação (2.24), está em função dos parâmetros básicos da máquina. Mas, as indutâncias da máquina são deduzidas a partir dos parâmetros derivados.

Portanto, será obtida uma expressão matemática de  $G(s)$  como função dos parâmetros derivados. Os parâmetros derivados para o circuito equivalente mostrado na **Figura 2.2** em relação ao eixo  $d$  são apresentados a seguir:

$$L_d = L_{ad} + L_l \quad (2.25)$$

$$L_f = L_{ad} + L_{lf} \quad (2.26)$$

$$L_D = L_{ad} + L_{lD} \quad (2.27)$$

As indutâncias  $L_D$  e  $L_f$  são substituídas na equação (2.24), para representar  $G(s)$  como uma função dos parâmetros derivados. Uma vez substituídas as indutâncias mencionadas, a nova expressão é multiplicada e dividida pela expressão  $r_f \times r_D$  para obter, finalmente, a seguinte equação:

$$G(s) = \frac{L_{ad}}{r_f} \left[ \frac{1 + s \left( \frac{L_{lD}}{r_D} \right)}{1 + s \left( \frac{L_f}{r_f} + \frac{L_D}{r_D} \right) + s^2 \left[ \frac{L_f}{r_f} \left( \frac{1}{r_D} \left( L_{lD} + \frac{L_{ad}L_{lf}}{L_f} \right) \right) \right]} \right] \quad (2.28)$$

Os termos entre parênteses, na equação (2.28), correspondem às constantes de tempo que são descritas a seguir:

$$T_{kD} = \frac{L_{ID}}{r_D} \quad (2.29)$$

$$T_F = \frac{L_f}{r_f} \quad (2.30)$$

$$T_D = \frac{L_D}{r_D} \quad (2.31)$$

$$T_1 = \frac{1}{r_D} \left( L_{ID} + \frac{L_{ad} L_f}{L_f} \right) \quad (2.32)$$

Dessa maneira, com as constantes de tempo definidas, tem-se uma expressão mais simplificada da função de transferência  $G(s)$  mostrada a seguir:

$$G(s) = G_o \frac{1 + sT_{kD}}{1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_1} \quad (2.33)$$

onde:

$$G_o = \frac{L_{ad}}{r_f} \quad (2.34)$$

A função de transferência  $L_d(s)$ , do diagrama de bloco da **Figura 2.3**, corresponde ao segundo termo da expressão matemática do fluxo magnético projetado no eixo  $d$  e representa a relação entre o fluxo magnético no eixo  $d$ ,  $\lambda_d(s)$  e a componente da corrente no eixo  $d$ ,  $I_d(s)$ . Dessa maneira, a expressão matemática da função de transferência  $L_d(s)$  (considerando  $G(s) = 0$ ) é a seguinte:

$$L_d(s) = L_d - \frac{sL_{ad}^2(r_D + sL_D) - 2s^2L_{ad}^3 + sL_{ad}^2(r_f + sL_f)}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_f + sL_f)} \quad (2.35)$$

Também  $L_d(s)$  precisa ser representada como uma função dos parâmetros derivados. Para isso, as expressões de  $L_f$  e  $L_D$ , equações (2.26) e (2.27), respectivamente, são substituídas na equação (2.35). Após a substituição, a nova expressão é multiplicada e dividida pelo termo  $r_f \times r_D$ , para obter finalmente uma nova forma polinomial de  $L_d(s)$ , mostrada a seguir:

$$L_d(s) = \frac{L_d}{1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_1} \left[ 1 + s \left( T_F + T_D - \frac{L_{ad}^2}{r_f L_d} - \frac{L_{ad}^2}{r_D L_d} \right) + s^2 \left( T_F T_1 - \frac{L_{ad}^2 L_{lD}}{r_f r_D L_d} - \frac{L_{ad}^2 L_{lf}}{r_f r_D L_d} \right) \right] \quad (2.36)$$

Da equação (2.36), analisando-se a expressão entre parênteses que multiplica  $s$ , pode-se escrever o seguinte:

$$T_2 = T_F - \frac{L_{ad}^2}{r_f L_d} = \frac{1}{r_f} \left( \frac{L_{ad} L_l}{L_{ad} + L_l} + L_{lf} \right) \quad (2.37)$$

$$T_3 = T_D - \frac{L_{ad}^2}{r_D L_d} = \frac{1}{r_D} \left( \frac{L_{ad} L_l}{L_{ad} + L_l} + L_{lD} \right) \quad (2.38)$$

Para obter as representações finais das equações (2.37) e (2.38), foi necessário, primeiro, substituir nelas as expressões matemáticas de  $T_F$  (equação (2.30)),  $T_D$  (equação (2.31)) e  $L_d$  (equação (2.25)).

Finalmente, no termo entre parênteses que multiplica  $s^2$ , na equação (2.36), são substituídas as expressões matemáticas de  $T_F$ ,  $T_1$  e  $L_d$ , dadas pelas equações (2.30), (2.32) e (2.25), respectivamente. Depois de fazer a substituição, a nova expressão é multiplicada e dividida pelo seguinte termo matemático:  $T_2 \times r_f$ . Assim, o termo que multiplica  $s^2$  fica reduzido a uma expressão que depende somente do produto de  $T_2$  vezes  $T_4$ , onde  $T_4$  é:

$$T_4 = \frac{1}{r_D} \left( L_{lD} + \frac{L_{ad} L_l L_{lf}}{L_{lf} L_{ad} + L_{lf} L_l + L_{ad} L_l} \right) \quad (2.39)$$

Portanto, depois de fazer todas as manipulações matemáticas mencionadas, tem-se uma expressão matemática mais simplificada para a função de transferência considerada:

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + s(T_2 + T_3) + s^2 T_2 T_4}{1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_1} \quad (2.40)$$

Dessa maneira, foram definidas as duas funções de transferência a serem determinadas nos Ensaio de Resposta em Freqüência. A partir dessas funções de transferência serão obtidos os parâmetros operacionais da máquina no eixo  $d$ .

## 2.4 Indutâncias Operacionais da Máquina no Eixo em Quadratura

Na determinação dos parâmetros operacionais da máquina síncrona no eixo em quadratura, serão utilizadas as equações (2.13), (2.15) e (2.18), ou seja, as equações relacionadas com a tensão no enrolamento amortecedor no eixo  $q$  (enrolamento amortecedor  $Q$ ), o enlace de fluxo magnético projetado no eixo em quadratura,  $\lambda_q(s)$ , e o enlace de fluxo magnético no enrolamento  $Q$ , respectivamente.

O objetivo, nesta seção, é representar o enlace de fluxo magnético no eixo  $q$  e a corrente de armadura no eixo em quadratura  $I_q(s)$ , como num diagrama de blocos, relacionando-os através de uma função de transferência, expressa como função dos parâmetros derivados da máquina no eixo  $q$ . Inicialmente, essa função de transferência estará como função dos parâmetros básicos apresentados na **Figura 2.2** mostrados a seguir:

$$L_q = L_{aq} + L_l \quad (2.41)$$

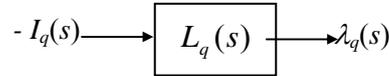
$$L_Q = L_{aq} + L_{lQ} \quad (2.42)$$

Nas equações (2.41) e (2.42), os parâmetros básicos são:  $L_q$  e  $L_Q$ , e esses estão em função dos parâmetros derivados de interesse.

O primeiro passo para representar o fluxo magnético  $\lambda_q(s)$  como função dos parâmetros derivados corresponde a obter o enlace de fluxo magnético no enrolamento amortecedor  $Q$ ,  $\lambda_Q(s)$ , em função da corrente  $I_Q(s)$ , na equação (2.13). Logo depois, a expressão matemática de  $\lambda_Q(s)$  é substituída na equação (2.18), obtendo-se a corrente no enrolamento amortecedor  $Q$ ,  $I_Q(s)$  como função da corrente de armadura no eixo  $q$  e dos parâmetros básicos. Essa expressão final da corrente no enrolamento amortecedor  $Q$  é substituída na equação (2.15) para obter uma nova representação matemática do fluxo magnético no eixo  $q$ , como é mostrada a seguir:

$$\lambda_q(s) = - \left( L_q - \frac{sL_{aq}^2}{r_Q + sL_Q} \right) I_q(s) \quad (2.43)$$

A expressão matemática de  $\lambda_q(s)$ , dada pela equação (2.43), pode ser representada como um diagrama de blocos como descrito na **Figura 2.4**:



**Figura 2.4:** Diagrama de blocos para o eixo em quadratura

No diagrama de blocos da **Figura 2.4**, a variável de entrada é a corrente de armadura em relação ao eixo  $q$ ,  $I_q(s)$ , e a variável de saída corresponde, exatamente, ao enlace de fluxo magnético no eixo em quadratura. A variável de saída é igual à corrente  $I_q(s)$  multiplicada pela função de transferência  $L_q(s)$ , a qual é chamada de *Função de Transferência da Indutância no eixo em quadratura*.

Para expressar  $L_q(s)$  como função dos parâmetros derivados da máquina com relação ao eixo  $q$ , as expressões de  $L_q$  e  $L_Q$ , dadas pelas equações (2.41) e (2.42) respectivamente, são substituídas na equação (2.43). Em seguida, a nova expressão é substituída pelas representações matemáticas das constantes de tempo  $T_5$  e  $T_Q$ , descritas a seguir:

$$T_5 = \frac{1}{r_Q} \left( L_{lQ} + \frac{L_l L_{aq}}{L_q} \right) \quad (2.44)$$

$$T_Q = \frac{L_Q}{r_Q} \quad (2.45)$$

Uma vez feitas todas as operações matemáticas descritas anteriormente, é obtida uma expressão da função de transferência  $L_q(s)$  mais simplificada:

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + sT_5}{1 + sT_Q} \quad (2.46)$$

A equação (2.46) é uma outra função de transferência, determinada a partir dos Ensaio de Resposta em Freqüência, da qual são determinados os parâmetros operacionais do gerador síncrono no eixo em quadratura (eixo  $q$ ).

## 2.5 Parâmetros das Indutâncias Operacionais da Máquina Síncrona.

Os parâmetros que caracterizam uma máquina síncrona são as indutâncias (ou reatâncias) vistas desde os terminais da máquina e as constantes de tempo que estão associadas, à taxa de decréscimo das magnitudes de tensão e corrente induzidas durante um distúrbio.

As principais constantes de tempo no eixo  $d$  são:  $T'_{do}$ ,  $T''_{do}$ ,  $T'_d$  e  $T''_d$ , e as suas relações com os parâmetros das funções características são determinadas pelos numeradores e denominadores das equações (2.33) e (2.40), funções de transferências  $G(s)$  e  $L_d(s)$ , respectivamente. A relação entre as constantes de tempo e os parâmetros das funções características pode ser descrita através das seguintes expressões [10]:

$$1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_1 = 1 + s(T'_{do} + T''_{do}) + s^2 T'_{do} T''_{do} \quad (2.47)$$

$$1 + s(T_2 + T_3) + s^2 T_2 T_4 = 1 + s(T'_d + T''_d) + s^2 T'_d T''_d \quad (2.48)$$

Através dos ensaios nas máquinas são determinados os valores numéricos dos coeficientes do numerador e do denominador de  $G(s)$  e  $L_d(s)$ . Mas, a obtenção das constantes de tempo, que definem esses coeficientes, torna-se uma operação complexa. Portanto, as equações (2.47) e (2.48) indicam uma relação aproximada entre as diferentes constantes de tempo e os parâmetros fundamentais da máquina no eixo direto.

O cálculo dessas quatro principais constantes de tempo torna-se mais simples considerando-se que  $r_D$  é muito maior do que  $r_f$ , no circuito equivalente da máquina no eixo  $d$ . Dessa maneira,  $T_F$  é maior do que  $T_D$  ou  $T_1$ , e  $T_2$  é maior do que  $T_3$  ou  $T_4$ .

Com essas considerações, as equações (2.47) e (2.48) podem ser aproximadas às seguintes expressões quadráticas:

$$1 + s(T_F + T_1) + s^2 T_F T_1 \approx 1 + s(T'_{do} + T''_{do}) + s^2 T'_{do} T''_{do} \quad (2.49)$$

$$1 + s(T_2 + T_4) + s^2 T_2 T_4 \approx 1 + s(T'_d + T''_d) + s^2 T'_d T''_d \quad (2.50)$$

Dessa maneira, é possível estabelecer as seguintes relações aproximadas:

$$T'_{d0} = T_F$$

$$T''_{d0} = T_1$$

$$T'_d = T_2$$

$$T''_d = T_4$$

Uma maneira de compreender melhor como as constantes de tempo estão relacionadas com os parâmetros operacionais da máquina é através da análise das funções de transferência deduzidas. Assim, quando os terminais do estator da máquina estão em circuito aberto ( $I_d(s) = 0$ ) da equação (2.23), tem-se:

$$\lambda_d(s) = G_0 \frac{1 + sT_{kD}}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} V_F(s) \quad (2.51)$$

A equação (2.51) indica que para condições de circuito aberto, o enlace de fluxo magnético do estator no eixo  $d$  e a tensão terminal  $v_d$  respondem a variações na tensão de campo de acordo com as constantes de tempo  $T'_{d0}$ ,  $T''_{d0}$  e  $T_{kD}$ , denominadas respectivamente como *Constante de Tempo Subtransitória* e *Transitória de Circuito Aberto*, e a *Constante de Tempo de Dispersão do Amortecedor no Eixo Direto*.

Da mesma maneira, quando os terminais do estator estão em curto-circuito e, considerando as aproximações feitas nas equações (2.49) e (2.50), o enlace de fluxo magnético no eixo  $d$  pode ser re-escrito da seguinte forma:

$$\lambda_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} I_d(s) \quad (2.52)$$

Nesse caso, o enlace de fluxo magnético responde a qualquer variação da corrente de armadura no eixo  $d$  com as constantes de tempo transitória e subtransitória de circuito aberto, bem como as constantes de tempo transitória ( $T'_d$ ) e subtransitória ( $T''_d$ ) de curto-circuito.

Uma vez definidas as constantes de tempo,  $L_d(s)$  é expressa como função dos parâmetros padronizados, tendo em conta as aproximações quadráticas feitas anteriormente. A nova expressão de  $L_d(s)$  é, então, mostrada a seguir:

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \quad (2.53)$$

Da equação (2.53), podem ser determinados os valores efetivos da indutância da máquina no eixo  $d$  para condições de regime permanente, transitório e subtransitório.

Dessa maneira, sob condições de regime permanente (com  $s = 0$ ), da equação (2.53) pode-se expressar  $L_d(s)$  da forma a seguir:

$$L_d(0) = L_d \quad (2.54)$$

representando a *indutância síncrona* do eixo  $d$ .

Durante um transitório muito rápido (quer dizer, quando  $s \rightarrow \infty$ ), o valor limite de  $L_d(s)$  é dado por:

$$L''_d = L_d(\infty) = L_d \left( \frac{T'_d \times T''_d}{T'_{d0} \times T''_{d0}} \right) \quad (2.55)$$

o qual está representando o valor da indutância imediatamente após uma variação súbita e recebendo o nome de *indutância subtransitória* do eixo direto.

Na ausência dos enrolamentos amortecedores, o valor limite da indutância em condições de regime transitório é mostrado a seguir:

$$L'_d = L_d(\infty) = L_d \left( \frac{T'_d}{T'_{d0}} \right) \quad (2.56)$$

A expressão da indutância resultante da equação (2.56) é conhecida como *indutância transitória* do eixo  $d$ .

Da mesma forma, por analogia, no eixo  $q$  temos que a equação (2.46) pode ser aproximada da seguinte expressão:

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + sT_q''}{1 + sT_{q0}''} \quad (2.57)$$

onde  $T_q''$  corresponde à *Constante de Tempo Subtransitória de Curto Circuito* no eixo  $q$ , e  $T_{q0}''$  é a *Constante de Tempo Subtransitória de Circuito Aberto* no eixo em quadratura.

Assim, também serão determinados os valores efetivos de  $L_q(s)$  para condições de regime permanente e subtransitórias.

Em condições de equilíbrio (onde  $s = 0$ ), a equação (2.57) fica da forma a seguir:

$$L_q(0) = L_q \quad (2.58)$$

representando a *indutância síncrona* do eixo em quadratura.

Durante um transitório muito rápido (quer dizer, quando  $s \rightarrow \infty$ ), o valor efetivo de  $L_q(s)$  pode ser representado como:

$$L_q'' = L_q(\infty) = L_q \left( \frac{T_q''}{T_{q0}''} \right) \quad (2.59)$$

A equação (2.59) define a *indutância subtransitória* no eixo  $q$ .

## 2.6 Ensaio de Resposta em Frequência em Máquinas Síncronas.

Uma alternativa para estabelecer um modelo das máquinas síncronas, com fins de estudo de desempenho num sistema de potência, são as simulações computacionais [3].

Para a determinação desse modelo, foram simulados os Ensaio de Resposta em Frequência através da utilização de métodos numéricos. Com a simulação destes ensaios é possível relacionar a entrada de dados e a saída.

O Ensaio de Resposta em Frequência consiste na aplicação de um sinal senoidal nos terminais da máquina obtendo uma resposta. O Ensaio fornece diferentes saídas para um sinal de entrada cuja frequência é variada numa faixa pré-estabelecida. Com esse conjunto de dados é possível determinar curvas que relacionam a entrada com a saída, e aproximá-las com as respectivas funções de transferências estudadas nos eixos  $d$  e  $q$ .

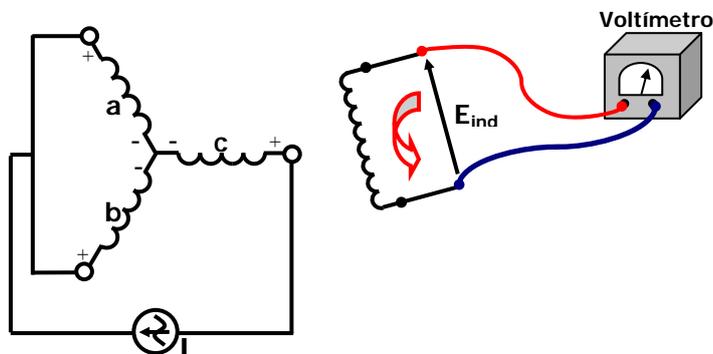
A característica principal dos ensaios de resposta em frequência é que o rotor fica estacionário e pode ser realizado com baixos níveis de tensão e corrente.

O método de resposta em frequência simulado no presente trabalho implementa os procedimentos descritos na norma *IEEE-115A*. Dessa forma, a faixa de frequência sugerida pela norma corresponde ao intervalo entre 1mHz e 1MHz, com variações de 10 pontos por cada década de frequência.

A norma também considera os ensaios correspondentes ao posicionamento do rotor nos eixos  $d$  e  $q$ .

### 2.6.1 Procedimento para Posicionar o Rotor com fins de Ensaio no Eixo $d$

Na **Figura 2.5** é mostrado o diagrama de conexões dos enrolamentos da máquina utilizado para determinar o posicionamento do rotor com a finalidade ser ensaiado no eixo direto.



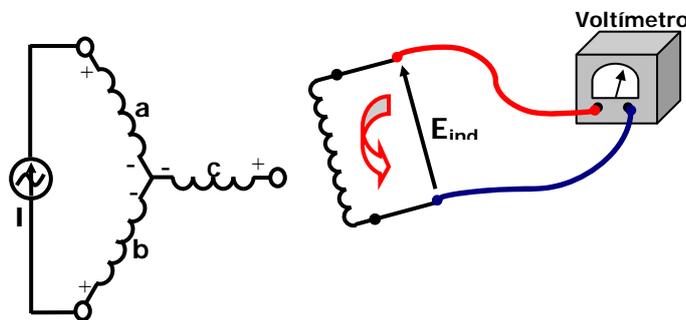
**Figura 2.5:** Diagrama de conexões para posicionar o rotor com fins de ensaios no eixo  $d$ .

Nesse diagrama de conexões, os terminais das fases  $a$  e  $b$  são conectados em paralelo. Depois, o circuito resultante é conectado em série com o terminal  $c$  da máquina. Os terminais desse circuito são conectados a uma fonte de corrente senoidal, cuja frequência é de 60 Hz. Os terminais do enrolamento de campo são mantidos em circuito aberto, induzindo-se assim uma tensão. A intensidade da tensão induzida varia com a posição do rotor.

A tensão induzida entre os terminais do circuito de campo será igual a zero quando o eixo  $d$  fica alinhado com o eixo magnético da armadura. Dessa maneira, o rotor está posicionado para realizar os ensaios no eixo direto.

### 2.6.2 Procedimento para Posicionar o Rotor com fins de Ensaio no Eixo $q$

O diagrama do circuito utilizado para estabelecer o posicionamento do rotor para ser ensaiado no eixo em quadratura é descrito através da figura a seguir:



**Figura 2.6:** Diagrama de conexões para posicionar o rotor com fins de ensaio no eixo  $q$ .

Na **Figura 2.6**, pode-se ver que os terminais da fase  $a$  e  $b$  do estator estão conectados em série, onde é ligada uma fonte de corrente senoidal de 60 Hz. Neste ensaio, o circuito de campo também é mantido em circuito aberto, e a intensidade da tensão induzida nele varia com a posição do rotor. O eixo magnético da armadura estará alinhado com o eixo  $q$ , quando a tensão induzida entre os terminais do circuito de campo for igual a zero.

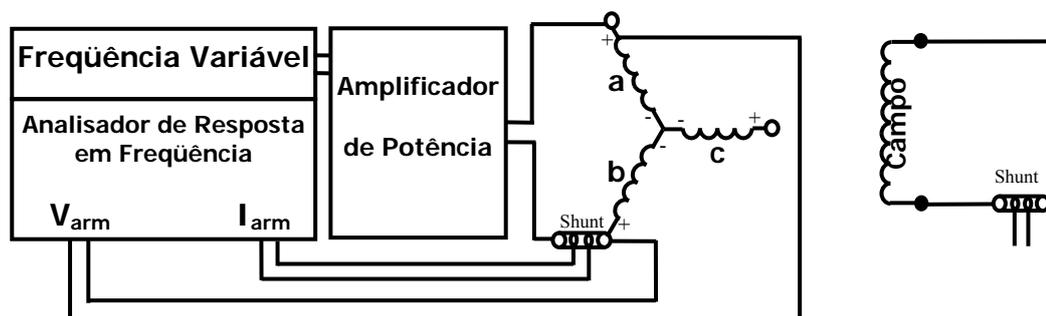
### 2.6.3 Ensaios no Eixo $d$

Antes de aplicar sobre o eixo direto da máquina os ensaios de resposta em frequência para determinar as curvas características dos parâmetros operacionais, o primeiro passo é colocar o eixo magnético da armadura sob o eixo direto; esta posição é estabelecida através do procedimento descrito anteriormente para esse eixo, onde deverá permanecer invariável durante os ensaios descritos nesta seção. As curvas características a serem determinadas são listadas a seguir:

- Indutância síncrona no eixo direto  $L_d(s)$ ;
- A função de transferência  $sG(s)$ ;
- Indutância mútua entre os enrolamentos de campo e armadura  $L_{af0}(s)$ .

#### 2.6.3.1. Curva da Indutância Operacional $L_d(s)$

A **Figura 2.7** mostra a configuração dos enrolamentos da máquina para se obter  $L_d(s)$ . Os enrolamentos  $a$  e  $b$  do estator são conectados em série, e o enrolamento  $c$  fica em circuito aberto. Os terminais  $a$  e  $b$  em série são ligados através de um amplificador de potência com uma fonte de tensão alternada, cuja frequência será variável. Então, os enrolamentos de campo são colocados em curto circuito. Após fazer todas as conexões descritas, são medidas a tensão e a corrente de armadura nos terminais do estator para cada frequência contida na faixa estabelecida.



**Figura 2.7:** Diagrama de conexões para determinar a curva de indutância  $L_d(s)$ .

Através deste ensaio, não é possível determinar diretamente a indutância no eixo  $d$ . Dessa maneira, é calculada inicialmente a impedância no eixo  $d$ ,  $Z_d(s)$ , a qual é definida a seguir:

$$Z_d(s) = -\frac{e_d(s)}{i_d(s)} \quad (2.60)$$

Na equação (2.60), o valor numérico de  $e_d$  corresponde à tensão de fase, e o valor numérico de  $i_d$  corresponde à corrente de fase. Mas, tendo em conta a configuração dos enrolamentos mostrados na **Figura 2.7** para este ensaio, os valores medidos correspondem à tensão e à corrente de linha ( $v_{arm}(s)$  e  $i_{arm}(s)$ , respectivamente), que devem ser convertidos em valores de fase para serem aplicados na equação (2.60). Visando chegar a uma expressão matemática que relacione  $Z_d(s)$  com os valores medidos de  $v_{arm}(s)$  e  $i_{arm}(s)$ , o primeiro passo será o cálculo da impedância de armadura,  $Z_{arm}(s)$ :

$$Z_{arm}(s) = \frac{v_{arm}(s)}{i_{arm}(s)} \quad (2.61)$$

A impedância de armadura  $Z_{arm}(s)$  é a impedância calculada considerando os enrolamentos  $a$  e  $b$  conectados em série, e que é igual a duas vezes a impedância no eixo  $d$ . Portanto, a impedância no eixo direto tem a seguinte expressão final:

$$Z_d(s) = \frac{1}{2} \times Z_{arm}(s) \quad (2.62)$$

Considerando que o circuito no eixo  $d$  está formado por um elemento resistivo e por um elemento indutivo, a impedância desse circuito é:

$$Z_d(s) = R_a + sL_d(s) \quad (2.63)$$

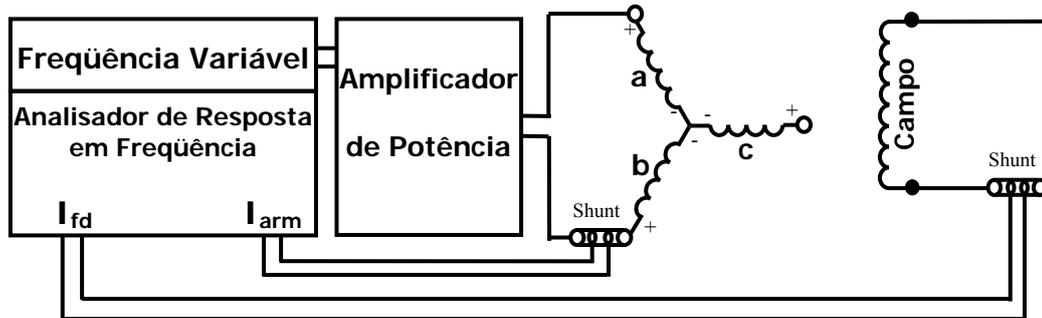
onde  $R_a$  é a resistência da armadura calculada quando  $s = 0$ .

Dessa maneira, com os valores de impedância e o valor da resistência da armadura é possível o cálculo da indutância no eixo direto:

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad (2.64)$$

### 2.6.3.2. Função de Transferência $sG(s)$

Na **Figura 2.8**, pode-se ver que a configuração dos enrolamentos para este ensaio é a mesma que fora utilizada para determinar  $L_d(s)$ , no caso anterior.



**Figura 2.8:** Diagrama de conexões para determinar função de transferência  $sG(s)$ .

A função de transferência  $sG(s)$  é uma expressão matemática que estabelece uma relação entre as correntes de campo e a armadura. Essa expressão matemática é mostrada através da seguinte equação:

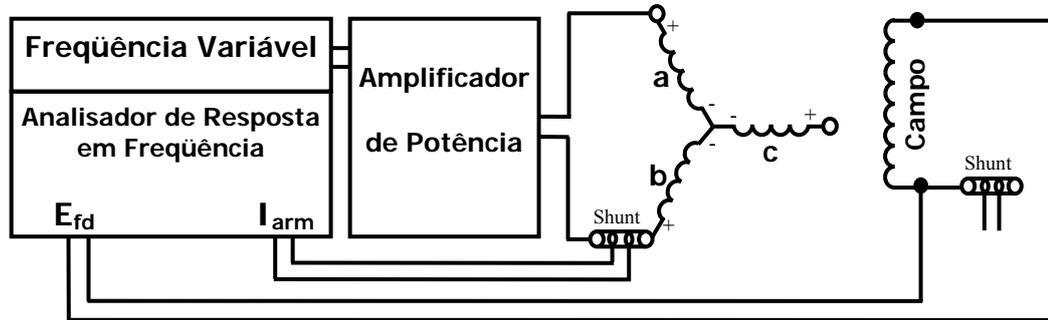
$$sG(s) = \frac{i_{fd}(s)}{i_d(s)} \quad (2.65)$$

onde  $i_d(s)$  corresponde a um valor de fase.

Porém, neste ensaio são medidos os valores da corrente de campo e a corrente de armadura para cada frequência considerada. Com a finalidade de obter a expressão dada em (2.65), a corrente de linha  $i_{arm}(s)$  é convertida para corrente de fase e, dessa maneira, tem-se a expressão final da função de transferência  $sG(s)$ :

$$sG(s) = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{i_{fd}(s)}{i_{arm}(s)} \quad (2.66)$$

### 2.6.3.3. Curva Característica da Indutância $L_{afo}(s)$



**Figura 2.9:** Diagrama de conexões para determinar a curva da indutância mútua  $L_{afo}(s)$ .

Para este ensaio, a configuração do enrolamento de armadura não muda com relação aos ensaios descritos anteriormente no eixo  $d$ . Porém, o enrolamento de campo fica em circuito aberto, como é mostrado na **Figura 2.9**. Na obtenção da curva característica  $L_{afo}(s)$ , é determinada primeiro a impedância mútua entre o rotor e o estator:

$$Z_{afo}(s) = \frac{e_{fd}(s)}{i_d(s)} \quad (2.67)$$

Com a finalidade de obter a expressão indicada na equação (2.67), como uma função da indutância mútua entre o campo e a armadura, é medido, para cada frequência, o valor da tensão de campo entre os terminais do enrolamento correspondente em circuito aberto e o valor da corrente de armadura.

Mas, a corrente de armadura é uma corrente de linha, que deverá ser convertida para corrente de fase e, dessa maneira, expressar  $Z_{afo}(s)$  em função da tensão de campo e da corrente de armadura. Assim, a nova fórmula matemática da impedância mútua é:

$$Z_{afo}(s) = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{e_{fd}(s)}{i_{arm}(s)} \quad (2.68)$$

A impedância mútua entre o rotor e o estator, mostrada na equação (2.68), corresponde a um circuito puramente indutivo. Portanto, a relação entre a impedância e a indutância mútua é dada através da seguinte expressão matemática:

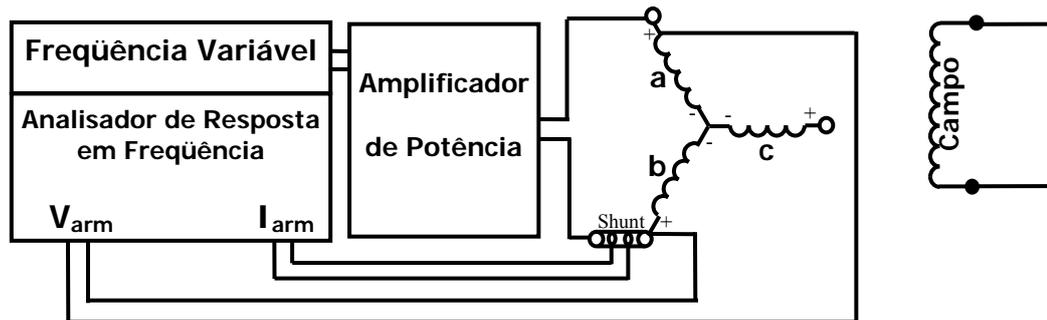
$$Z_{af0}(s) = sL_{af0}(s) \quad (2.69)$$

Da equação (2.69), deduz-se a indutância mútua, cuja expressão é mostrada a seguir:

$$L_{af0}(s) = \frac{Z_{af0}(s)}{s} \quad (2.70)$$

### 2.6.4 Ensaio no Eixo $q$

Uma vez posicionado no eixo em quadratura, de acordo com o procedimento descrito pela norma, o rotor fica nessa posição invariável durante o ensaio. A única curva característica determinada neste ensaio corresponde à indutância do eixo  $q$ ,  $L_q(s)$ .



**Figura 2.10:** Diagrama de conexões para determinar a curva da indutância  $L_q(s)$ .

Na implementação do ensaio no eixo  $q$ , os enrolamentos das fases  $a$  e  $b$  são conectados em série; porém, os enrolamentos da fase  $c$  do estator e de campo no rotor são deixados em circuito aberto, conforme mostrado na **Figura 2.10**.

Os terminais das fases  $a$  e  $b$  conectados em série são ligados através de um amplificador de potência a uma fonte de tensão alterna, cuja frequência é variada. Portanto, são medidos os valores da tensão e da corrente do estator para cada valor de frequência.

Para determinar a indutância no eixo  $q$ , é necessário determinar primeiro a impedância em quadratura  $Z_q(s)$ . A expressão matemática da impedância do eixo  $q$  é mostrada através da seguinte equação:

$$Z_q(s) = -\frac{e_q(s)}{i_q(s)} \quad (2.71)$$

A tensão no eixo  $q$   $e_q(s)$  e a corrente no eixo em quadratura  $i_q(s)$  são magnitudes de fase, mas os valores de tensão e corrente medidos são magnitudes de linha. Com esses valores de linha é calculada a impedância de armadura, como é mostrada a seguir:

$$Z_{arm}(s) = \frac{e_{arm}(s)}{i_{arm}(s)} \quad (2.72)$$

A impedância de armadura é duas vezes a impedância em quadratura. Portanto, a impedância de quadratura pode ser expressa da seguinte maneira:

$$Z_q(s) = \frac{1}{2} \times Z_{arm}(s) \quad (2.73)$$

Considerando que cada fase (fases  $a$  e  $b$ ) do circuito da armadura é constituído por um elemento resistivo e indutivo, a impedância em quadratura tem a seguinte expressão:

$$Z_q(s) = R_a + sL_q(s) \quad (2.74)$$

Na equação (2.74), a resistência de armadura  $R_a$  é igual ao valor da impedância  $Z_q(s)$  quando  $s = 0$ . Com os valores da impedância e da resistência de armadura pode ser calculada a indutância no eixo  $q$ , como descrito na equação a seguir:

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_a}{s} \quad (2.75)$$

Com a dedução da equação (2.75) e com as demais equações determinadas nas seções anteriores, foram determinadas todas as curvas características de interesse para representar o circuito equivalente da máquina síncrona nos eixos direto e quadratura.

## Capítulo 3

### Simulações e Resultados

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentadas as características construtivas da máquina síncrona utilizada no presente trabalho, para a obtenção dos correspondentes parâmetros operacionais através da simulação dos Ensaios de Resposta em Frequência com rotor travado (*SSFR*). Serão descritos também os procedimentos seguidos na implementação e simulação desses ensaios, a análise dos resultados e o cálculo das indutâncias síncronas através de uma análise magnetostática.

#### 3.2 Características da Máquina Síncrona utilizada

O modelo de máquina utilizado no estudo está baseado numa máquina síncrona trifásica de pólos salientes desenhada por J. H. Kuhlman [12]. Abaixo, são listados os parâmetros necessários para modelar a máquina através de elementos finitos.

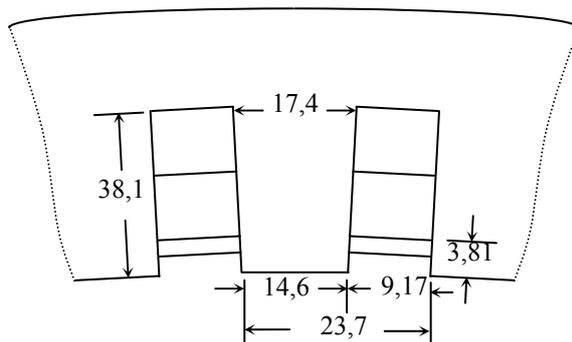
##### a) *Características Gerais*

Número de pólos	8
Conexão do enrolamento de armadura	Estrela
Comprimento da máquina	177,8 mm
Tipo de enrolamento	Embricado de dupla camada

##### b) *Características do Estator*

Número total de ranhuras	84
Número de fases por ranhura	2
Número de condutores por fase	2
Passo da bobina	1 – 8
Ranhuras por pólo por fase	3 ½
Diâmetro externo do estator	825,5 mm

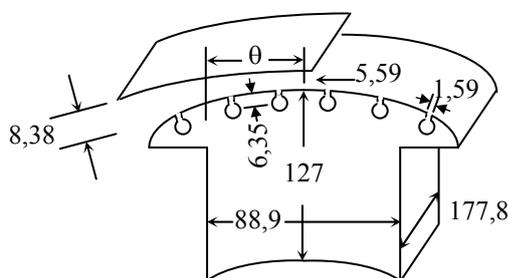
---



**Figura 3.1:** Geometria da ranhura  
(unidade de distância mm)

c) *Características do Rotor*

Número de condutores no enrolamento	342
Barras amortecedoras por pólo	6
Diâmetro das barras amortecedoras	9,5 mm
Diâmetro interno do rotor	369,8 mm



**Figura 3.2:** Geometria do pólo  
(unidade de distância mm)

As características eletromagnéticas dos materiais que constituem parte da máquina são descritas a seguir:

- *Permeabilidade Relativa* ( $\mu_r$ )

Aço do núcleo da máquina	10.000
Outros materiais (o ar do entreferro, os enrolamentos das bobinas, o isolante)	1

Assumiu-se linearidade na permeabilidade do material ferromagnético devido ao método de Resposta em Frequência ser realizado com baixa excitação; portanto pode ser considerado que o material não trabalha na região de saturação.

- *Resistividade* [ $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ )]

Aço do núcleo da máquina	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Enrolamento das bobinas	$1,724 \cdot 10^{-8}$

No presente trabalho foi utilizada a análise bidimensional que não permite representar o fato de o núcleo ferromagnético ser formado por chapas isoladas entre si, o que reduz a perda devida às correntes de Foucault. Entretanto, esse efeito é simulado através de um aumento de aproximadamente 250 vezes o valor da resistividade original do material utilizado no núcleo.

### 3.3 Programa Utilizado

No presente trabalho foi utilizado o Programa ANSYS<sup>®</sup>, que é um programa computacional dirigido a engenheiros projetistas. Esse programa segue a filosofia do sistema *CAD* (*Computer Aided Design*) [13], possibilitando a obtenção da geometria em condições de funcionamento que se aproxime do desejado, através da utilização do computador.

Esse programa possibilita a análise eletromagnética da estrutura (máquina), tendo-se em vista o comportamento da máquina, tanto sob forma qualitativa (observação das linhas equipotenciais) quanto quantitativa (valores numéricos do fluxo, indutância, força, etc.).

A simulação numérica da máquina analisada, usando o programa ANSYS<sup>®</sup>, pode ser feita através de dois caminhos diferentes: através da *Interface Gráfica* do programa, ou através de um arquivo de entrada (em formato ASCII), escrevendo-se nesse arquivo as *opções de execução* de ANSYS<sup>®</sup>.

Do ponto de vista computacional, utilizar um arquivo de entrada em formato ASCII agiliza e facilita manipular os casos onde se queiram mudar as configurações do dispositivo (máquina), enquanto que utilizar a Interface Gráfica do programa [14] pode vir a ser um processo custoso.

O programa ANSYS<sup>®</sup> está constituído das três etapas seguintes:

- 1) *Pré-Processamento*. Nesta etapa do sistema, o usuário deve fornecer a estrutura a ser analisada (formas geométricas, características dos materiais, condições de contorno, fontes, etc.), e também escolher se a geração da malha deve ser efetuada de forma automática ou semi-automática.
- 2) *Processamento*. Uma vez que a discretização é efetuada, o cálculo utilizando o Método dos Elementos Finitos é aplicado, sendo calculado o potencial (variável principal) em cada nó.
- 3) *Pós-Processamento*. Etapa final onde é efetuada alguma análise dos resultados, tanto sob a forma visual como sob forma numérica, ou seja, obtendo-se valores numéricos de fluxo, campos, forças, etc.

### 3.4 Modelagem da Máquina usando Elementos Finitos

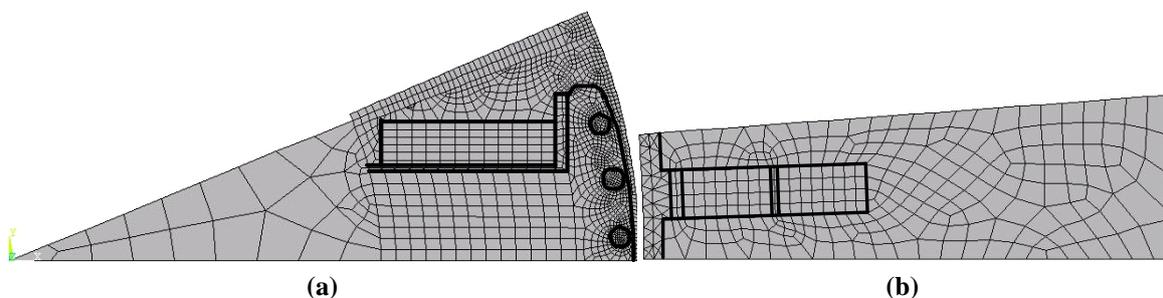
As dimensões e as características principais da máquina síncrona pré-estabelecidas inicialmente são utilizadas para modelar a máquina através do programa ANSYS<sup>®</sup>.

Na modelagem da máquina definiram-se, primeiramente, os vértices principais de cada uma das partes de máquina. Esses vértices são ligados por linhas, formando as diferentes áreas relativas a cada parte da máquina.

Uma vez construídas as áreas, o passo seguinte é dividi-las em “elementos finitos”. Para fazer isso, primeiramente, deve-se escolher a geometria dos elementos que estará relacionada com a área a ser dividida. Esses elementos podem ser triangulares ou quadrangulares. A discretização das áreas em “elementos finitos” pode ser realizada de forma aleatória ou planejada.

---

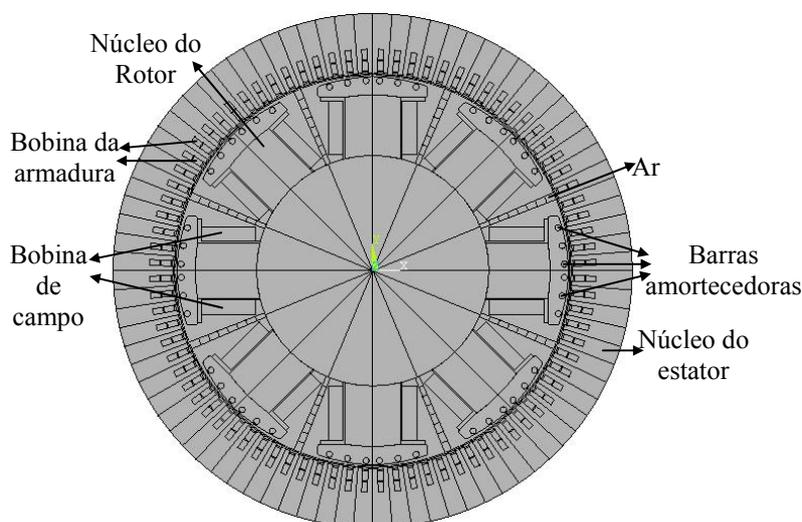
A divisão planejada do modelo da máquina permite aumentar o número de elementos finitos em certas áreas, onde são esperadas maiores variações da densidade de fluxo magnético, como as áreas referentes ao rotor e ao estator, próximas ao entreferro, bem como as áreas próprias do entreferro, onde é necessária, portanto, uma maior precisão dos resultados.



**Figura 3.3:** (a) Metade de um pólo do rotor; (b) Ranhura do estator.

A construção do modelo da máquina, no programa de elementos finitos, simplificou-se porque ela é formada por duas regiões periódicas. Como descrevem as **Figuras 3.3 (a) e (b)**, são modeladas unicamente uma ranhura do estator e a metade de um pólo do rotor. Dessa maneira, a discretização inicial feita no rotor e no estator é reproduzida até completar todo o domínio da máquina. A vantagem desse procedimento é permitir uma cuidadosa divisão dessas áreas, otimizando tempo de computação, uniformidade e qualidade na discretização do domínio.

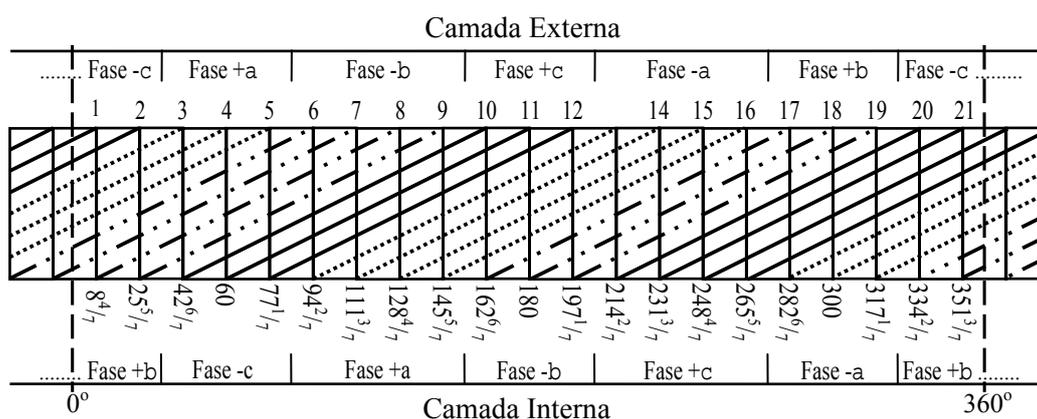
O modelo da máquina síncrona, discretizado através do programa ANSYS<sup>®</sup>, está composto, na sua totalidade, de 844 áreas, divididas em 52.865 elementos finitos que se ligam através de 58.627 nós.



**Figura 3.4:** Máquina síncrona de pólos salientes, modelada no ANSYS.

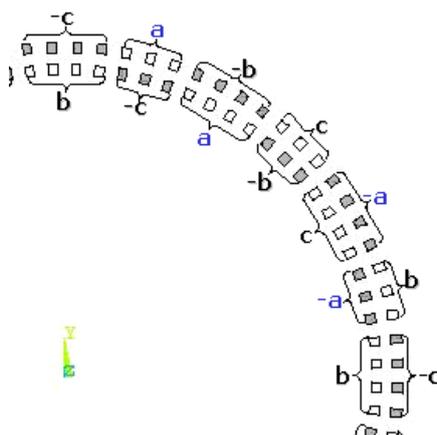
No Apêndice A, encontra-se o arquivo de entrada criado para construir a máquina em estudo utilizando o programa ANSYS®. O arquivo correspondente gera o gráfico mostrado na **Figura 3.4**, que apresenta o esquema final da máquina dividida pelas áreas para uma melhor visualização das principais partes.

Uma vez modelada a máquina, faz-se necessário conhecer a distribuição e a configuração das fases nas bobinas do enrolamento de armadura, sendo representado através de um diagrama horizontal na **Figura 3.5**.



**Figura 3.5:** Enrolamento da armadura

Porém, o esquema horizontal da distribuição das fases no primeiro quadrante tem a seguinte disposição gráfica no estator da máquina:



**Figura 3.6:** Enrolamento da armadura

Como pode ser visto na **Figura 3.6**, cada uma das fases (a , b , c) do enrolamento de armadura está composta de 28 bobinas conectadas em série. As conexões para os ensaios correspondem às ligações entre os terminais de cada fase do enrolamento de armadura, conforme descrito no Capítulo 2.

### 3.5 Cálculo das Indutâncias síncronas

Nesta seção, será descrita a metodologia utilizada para calcular as indutâncias síncronas nos eixos  $d$  e  $q$  da máquina de pólos salientes através de uma análise magnetostática, onde as indutâncias síncronas são obtidas a partir de uma curva de indutância própria e de uma curva de indutância mútua do enrolamento de armadura da máquina.

Para determinar as respectivas curvas de indutância, deve-se alimentar uma fase com corrente contínua, deixando as outras em circuito aberto e variando a posição angular do rotor para obter, assim, um campo magnético variável no bobinado da armadura.

No presente trabalho, o procedimento estático descrito para a obtenção das curvas de indutâncias será simulado através do programa ANSYS<sup>®</sup>, desenvolvendo-se uma rotina para calcular os valores das indutâncias próprias e mútuas, a partir do conceito de vetor potencial magnético de cada elemento  $A$ .

A rotina de cálculo começa com a descrição de indutância própria  $L$ . Assim, o valor da indutância de uma bobina de  $N$  espiras é calculado utilizando-se a seguinte equação:

$$\int L di = N \int d\psi \quad (3.1)$$

No entanto, o valor da indutância  $L$  é constante, bem como o valor da corrente  $I$  que percorre a bobina. Assumindo linearidade entre enlace de fluxo e corrente, a indutância própria da bobina indicada na expressão (3.1) pode ser considerada constante e representada por:

$$L = \frac{N}{I} \psi \quad (3.2)$$

O enlace de fluxo  $N\psi$  pode ser representado através da integral de linha do vetor potencial magnético, de acordo com o Teorema de Stokes<sup>1</sup> e, dessa forma, a equação (3.2) pode ser reescrita como:

---

<sup>1</sup> O Fluxo magnético pode ser representado como  $\psi = \int B ds$ . Mas,  $B = \nabla \times A$ . Dessa maneira,  $\psi = \int (\nabla \times A) ds$ . Portanto, segundo o Teorema de Stokes, tem-se  $\int (\nabla \times A) ds = \oint_{\ell} A d\ell$ .

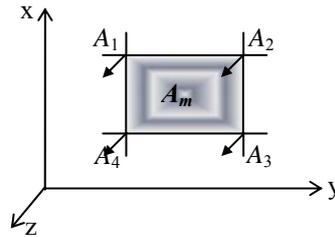
$$L = \frac{N}{I} \oint_{\ell} A d\ell \quad (3.3)$$

A equação (3.3) relaciona o valor da indutância ao vetor potencial magnético  $A$  de cada elemento, cuja seção transversal foi dividida e que está limitado pelo seu comprimento  $\ell$ . Porém, no presente trabalho, a obtenção do vetor potencial magnético de cada elemento se faz através da ponderação dos seus vetores potenciais nodais, como mostrado a seguir:

$$\int A dS_i = A_{médio} \times S_i \quad (3.4)$$

onde  $S_i$  corresponde à área do elemento finito  $i$ .

Na equação (3.4), da ponderação realizada com os potenciais vetoriais nodais de um elemento planar é obtido um vetor potencial magnético médio,  $A_{médio}$ , vezes a superfície do elemento  $i$ , conforme é descrito graficamente através da **Figura 3.7**:



**Figura 3.7:** Representação gráfica de um determinado elemento finito  $i$ .

Mas, a equação (3.4) pode ser generalizada para o conjunto de bobinas que formam a máquina, que foi dividido num total de  $N_E$  (número de elementos finitos) da seguinte maneira:

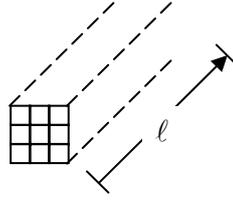
$$A_T = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_E} (S_i \times A_{médio}) \quad (3.5)$$

onde  $S$  representa a soma total das seções transversais das bobinas.

A equação (3.5) é incluída na equação (3.3) para obter a forma discretizada de cálculo da indutância total da bobina:

$$L = \frac{N}{I} \times \frac{\ell}{S} \times \sum_{i=1}^{N_E} (S_i \times A_{médio}) \quad (3.6)$$

onde  $\ell$  corresponde ao comprimento total da bobina, **Figura 3.8**.



**Figura 3.8:** Representação gráfica do comprimento total da bobina.

Para a simulação deste ensaio foi escolhida a fase **a** para ser alimentada com corrente contínua. Sendo alimentadas, com corrente positiva as áreas de bobina da fase *a positiva* e com corrente negativa as áreas de bobina da fase *a negativa*, obtendo-se:

$$L_{+a} = \frac{N}{I} \times \frac{\ell}{S} \times \sum_{i=1}^{N_E} (S_i \times A_{\text{médio}}) \quad (3.7)$$

$$L_{-a} = \frac{N}{-I} \times \frac{\ell}{S} \times \sum_{i=1}^{N_E} (S_i \times -A_{\text{médio}}) \quad (3.8)$$

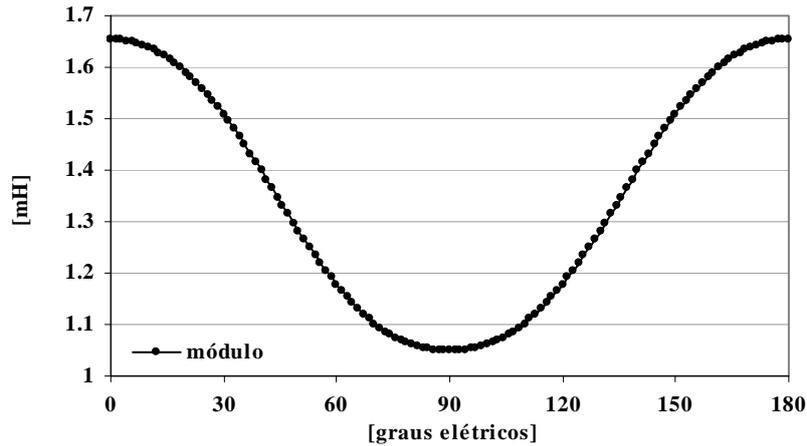
A soma das equações (3.7) e (3.8) corresponde à indutância própria da fase **a**. Assim, o fluxo magnético gerado nas bobinas energizadas envolve as bobinas colocadas em circuito aberto (fase **b** e **c**), produzindo nelas um enlace a partir do qual pode ser definida uma indutância mútua  $M$  que é calculada utilizando-se a mesma expressão matemática da equação (3.6). Assim:

$$M_{+b} = \frac{N}{I} \times \frac{\ell}{S} \times \sum_{i=1}^{N_E} (S_i \times -A_{\text{médio}}) \quad (3.9)$$

$$M_{-b} = \frac{N}{-I} \times \frac{\ell}{S} \times \sum_{i=1}^{N_E} (S_i \times A_{\text{médio}}) \quad (3.10)$$

A soma das expressões (3.9) e (3.10) correspondem à indutância mútua da fase **b**. Estas são derivadas da equação deduzida para a indutância própria, na qual a bobina não energizada é considerada igual à fase alimentada com corrente contínua.

Os valores da indutância própria da fase **a**, para cada posição angular do rotor, são mostrados na **Figura 3.9**:



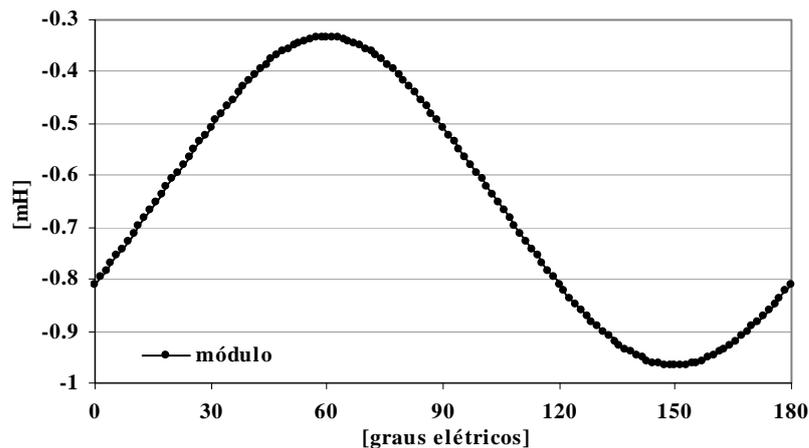
**Figura 3.9:** Curva de indutância própria da fase **a**.

A forma da curva de indutância própria, obtida na **Figura 3.9**, é equivalente à seguinte equação:

$$L_{aa}(\theta) = L_{al} + L_{ag} + L_{aa2} \cos(2\theta) \quad (3.11)$$

A equação (3.11) representa o comportamento característico da indutância da fase **a** como função da posição angular do rotor, onde  $L_{al}$  é a indutância de dispersão,  $L_{ag}$  é o valor constante da indutância e  $L_{aa2}$  é a amplitude máxima do valor da indutância.

Da mesma forma, na **Figura 3.10** é representada graficamente a curva de indutância mútua entre a fase **a** (energizada) e a fase **b** (desenergizada):



**Figura 3.10:** Curva de indutância mútua entre a fase **a** e a fase **b**.

Nesse caso também, a curva de indutância mútua, obtida na **Figura 3.10**, é equivalente à expressão matemática mostrada a seguir:

$$M_{ab}(\theta) = -\frac{1}{2}L_{ag} - L_{aa2} \cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.12)$$

Dessa maneira, as curvas obtidas na **Figura 3.9** e na **Figura 3.10** têm a forma descrita pela função cosseno, as quais são confirmadas pelas equações (3.11) e (3.12).

Através das curvas obtidas, equivalentes às equações (3.11) e (3.12), procura-se determinar os valores das constantes  $L_{al}$ ,  $L_{ag}$  e  $L_{aa2}$ . Logo, são determinadas as seguintes magnitudes:

$$amplitude = \left| \frac{máx - mín}{2} \right| \quad (3.13)$$

$$média = \left| \frac{máx + mín}{2} \right| \quad (3.14)$$

onde *máx* e *mín* correspondem aos valores máximos e mínimos, respectivamente, dos dados de qualquer uma das curvas (indutância própria ou mútua).

A partir das magnitudes *amplitude* e *média* extraídas da curva de indutância própria, cujos valores foram definidos em (3.13) e (3.14), respectivamente, são definidas as constantes  $L_{aa2}$  e de  $L_{ag}$  da seguinte maneira:

$$L_{aa2} \approx amplitude \quad (3.15)$$

$$L_{ag} \approx média \quad (3.16)$$

Assim, com as constantes determinadas nas equações (3.15) e (3.16), pode ser definida também a expressão matemática da indutância mútua  $M_{ab}$ . Mas, se as magnitudes *amplitude* e *média* são estabelecidas a partir da curva de indutância mútua (**Figura 3.10**), a constante  $L_{aa2}$  é calculada do mesmo modo que a expressão (3.15) e  $L_{ag}$  é calculada da maneira descrita a seguir:

$$L_{ag} \approx 2 \times média \quad (3.17)$$

Determinadas  $L_{aa2}$  e  $L_{ag}$ , ainda resta calcular  $L_{al}$  que corresponde a um dos termos da expressão matemática da indutância própria, equação (3.11). O procedimento para determinar a indutância de dispersão vem do fato de as duas curvas apresentadas na **Figura 3.9** e na **Figura 3.10** embora serem iguais elas estão defasadas entre si tanto no eixo de abscissas quanto no eixo de ordenadas.

Portanto, ambas as curvas são ajustadas de tal forma que possuam a mesma fase e as mesmas coordenadas nos seus pontos. Então, faz-se o cálculo da indutância de dispersão  $L_{al}$ , que é aproximadamente constante.

Desta forma, com os dados fornecidos na simulação são desenhadas as curvas de indutância própria (**Figura 3.9**) e de indutância mútua (**Figura 3.10**), e também utilizados para calcular as constantes anteriormente mencionadas:

$$L_{ag} = 1,300 \text{ [mH]}$$

$$L_{aa2} = 0,3168 \text{ [mH]}$$

$$L_{al} \approx 0,051 \text{ [mH]}$$

As equações que definem as indutâncias síncronas nos eixos  $d$  e  $q$  são calculadas através das equações (3.18) e (3.19), descritas em [10], [11], e que são mostradas a seguir:

$$L_d = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{ag} + L_{aa2}) \quad (3.18)$$

$$L_q = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{ag} - L_{aa2}) \quad (3.19)$$

As expressões matemáticas para as indutâncias síncronas são estabelecidas a partir das equações gerais da máquina síncrona, utilizando-se a transformação de Park. Portanto, na determinação das indutâncias  $L_d$  e  $L_q$  são substituídos os valores calculados para  $L_{aa2}$ ,  $L_{ag}$ , e  $L_{al}$  nas equações (3.18) e (3.19), obtendo-se os seguintes valores:

$$L_d = 2,477 \text{ [mH]}$$

$$L_q = 1,527 \text{ [mH]}$$

Das indutâncias síncronas determinadas, são calculadas as reatâncias síncronas nos eixos  $d$  e  $q$ , e com uma impedância base igual a 1,2095 Ohms são apresentadas a seguir em p.u. para serem comparadas com as calculadas no livro de Kulhman:

$$X_d = 0,772 \text{ pu}$$

$$X_q = 0,476 \text{ pu}$$

Daqui por diante, será descrito o procedimento utilizado por Kuhlmann [12] para estabelecer os valores das reatâncias síncronas nos eixos  $d$  e  $q$  da máquina. Para isso, é calculada a *Relação de Curto-Circuito (RCC)*:

$$RCC = \frac{F_o}{F_i} \quad (3.20)$$

onde  $F_o$  corresponde à excitação requerida (em A) para manter a tensão nominal da máquina em vazio, e  $F_i$  refere-se à excitação requerida (em A) para manter a corrente nominal da máquina em curto-circuito.

Dessa maneira, para um valor da excitação  $F_o$  igual a 3600 A, e sendo a excitação  $F_i$  igual a 3200 A, o valor da *Relação de Curto-Circuito* é calculada da seguinte maneira:

$$RCC = \frac{3600}{3200} = 1,125$$

Segundo o procedimento de Kuhlmann, o valor aproximado da reatância síncrona no eixo direto ( $\tilde{X}_d$ ) é inversamente proporcional ao valor da *RCC*. Portanto, o valor da reatância  $\tilde{X}_d$  é calculado a seguir:

$$\tilde{X}_d = \frac{1}{RCC} = 0,890 \text{ pu}$$

onde o valor calculado para a reatância  $\tilde{X}_d$  já inclui a dispersão na cabeça de bobina.

Mas, desconsiderando o valor dessa dispersão nas bobinas, obtém-se a reatância teórica no eixo  $d$  ( $\hat{X}_d$ ). O valor da reatância de dispersão determinado por Kuhlmann, para a mesma máquina em estudo, foi de 0,044 pu.

$$\hat{X}_d = \tilde{X}_d - 0,044 = 0,846 \text{ pu}$$

Como pode ser observado, o valor teórico da reatância síncrona no eixo  $d$  ( $\hat{X}_d$ ) é aproximado, se comparado com o valor da reatância  $X_d$  obtido da simulação.

Isso acontece porque existem pequenas variações na simulação do desenho da máquina bem como dos valores inteiros utilizados no procedimento desenvolvido por Kuhlmann no cálculo da relação de curto circuito, resultando assim que a relação inversa de curto-circuito corresponderá a uma aproximação do valor da reatância no eixo direto. Dessa maneira, o valor teórico da reatância síncrona no eixo em quadratura ( $\hat{X}_q$ ) será também uma aproximação, se comparado com o valor da reatância  $X_q$  obtido através da simulação.

A análise estática descrita nesta seção somente serve para determinar as indutâncias síncronas nos eixos  $d$  e  $q$ , mas não fornece valores para as indutâncias transitórias e subtransitórias nos eixos direto e em quadratura da máquina.

Os Ensaio de Resposta em Frequência que são a metodologia utilizada no presente trabalho apresentam a vantagem do cálculo das reatâncias, nos eixos direto e em quadratura, tanto para o regime permanente quanto para o transitório e o subtransitório.

Na seção seguinte, é descrita a técnica utilizada para a simulação dos Ensaio de Resposta em Frequência, em 2D (projeto em duas dimensões).

### **3.6 Descrição das Simulações e Resultados**

Nesta seção será descrita passo a passo, conforme descrito no Capítulo 2, a simulação dos ensaios de Resposta em Frequência (*SSFR*), utilizando o programa ANSYS® para determinar os parâmetros operacionais.

Antes da determinação das curvas de indutâncias próprias e da curva da função de transferência, é preciso estabelecer a posição do rotor nos eixos  $d$  e  $q$ . A seguir, são descritos os passos percorridos para estabelecer, primeiramente, o posicionamento do rotor no eixo direto e no eixo em quadratura e, posteriormente, são descritos os passos correspondentes à determinação das curvas que forneceram os parâmetros operacionais.

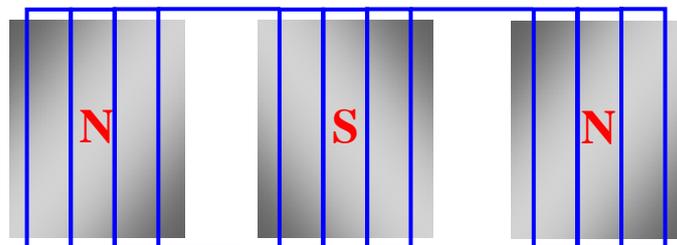
Como todos os ensaios são feitos em 2D, é necessário utilizar o recurso do *Circuito Externo* do ANSYS®, para projetar as bobinas, as fontes de tensão e as fontes de correntes que serão utilizadas na simulação dos ensaios.

---

### 3.6.1 Posicionamento do Rotor para Ensaio no Eixo d

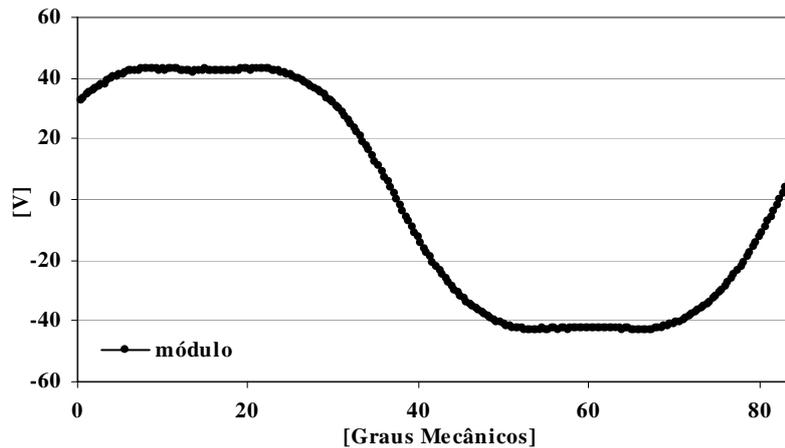
- 1) *Modelagem da máquina.* Utilizando o programa ANSYS<sup>®</sup>, a modelagem da máquina síncrona em estudo, cujas características são descritas na Seção 3.1, faz-se seguindo o procedimento descrito na Seção 3.3.
- 2) *Parâmetros Requeridos para as Bobinas.* São projetadas as bobinas correspondentes aos enrolamentos de armadura e de amortecimento. Para o projeto dessas bobinas, são necessários os seguintes parâmetros: comprimento da bobina, número de condutores que a compõem, seção transversal e sinal correspondente à fase de cada bobina.
- 3) *Ligação dos enrolamentos da Máquina.* Como foi descrito na Seção 2.6.1, as bobinas correspondentes às fases a e b são conectadas em paralelo, as quais, por sua vez são ligadas em série com a bobina correspondente à fase c. O circuito resultante é conectado a uma fonte de corrente, conforme descrito na **Figura 2.5**, que alimenta o circuito com uma corrente senoidal de amplitude igual a 210 A e um ângulo de fase igual a 0°. As bobinas, também, são associadas a cada enrolamento amortecedor.

Assim, cada bobina, correspondente a um enrolamento amortecedor, é conectada em paralelo com outra pertencente ao mesmo pólo e esses, por sua vez, são conectados em paralelo com as outras bobinas associadas aos demais pólos da máquina, formando uma gaiola de esquilo, como mostrado na **Figura 3.11**.



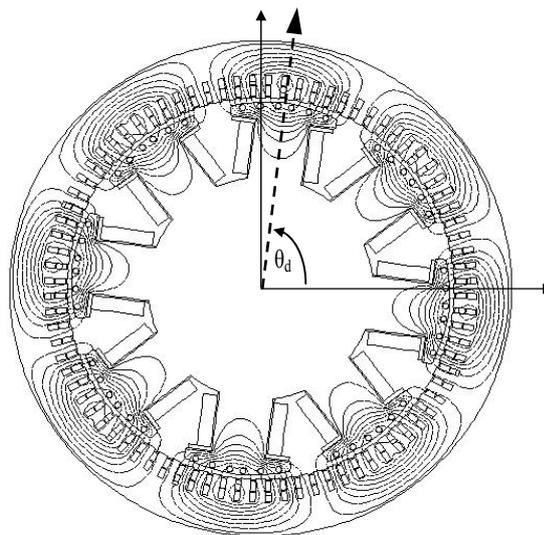
**Figura 3.11:** Representação do enrolamento amortecedor.

- 4) *Simulação do Ensaio*. Como foi indicado na Seção 2.6.1, a posição do rotor é variada gradualmente e, para cada posição do rotor, é calculado o valor da tensão induzida no circuito de campo. O deslocamento gradual do rotor se faz no sentido anti-horário. A análise empregada nesta simulação utiliza uma frequência de 60 Hz. Na **Figura 3.12**, é mostrada a curva obtida com os valores da tensão induzida no campo para cada posição do rotor.



**Figura 3.12:** Tensão induzida no campo para determinar a posição correta do rotor para ensaios no eixo  $d$

O giro gradual do rotor não é contínuo e sim discreto devido à metodologia dos Elementos Finitos. Dessa maneira, no presente trabalho, cada deslocamento do rotor corresponde a uma das 126 divisões iguais contidas num quadrante, ou seja, em  $90^\circ$  mecânicos. Por essa razão, a posição angular do rotor para ser ensaiado no eixo  $d$  é só uma aproximação, pois a tensão induzida nessa posição não foi exatamente igual a zero.



**Figura 3.13:** Linhas de fluxo quando é encontrada a posição correta do rotor para ensaios no eixo direto.

A **Figura 3.12** fornece dois resultados para o ângulo de posicionamento do rotor no eixo  $d$ :  $37,5^\circ$  e  $82,5^\circ$  graus mecânicos. Foi selecionado o ângulo de  $82,5^\circ$  graus mecânicos,  $\theta_d$ , como a melhor posição angular do rotor no eixo direto, devido ao valor da tensão encontrar-se mais perto do zero. Nesta posição angular, o eixo magnético da armadura alinha-se com o eixo magnético do rotor, como é apresentado na **Figura 3.13** de distribuição das linhas de fluxo.

### 3.6.2 Posicionamento do Rotor para Ensaio no Eixo $q$

- 1) Modelagem da máquina. A modelagem da máquina é a mesma descrita no item 1 da Seção 3.6.1.
- 2) Parâmetros Requeridos para as Bobinas. O projeto das bobinas dos enrolamentos de armadura e de amortecimento, bem como a bobina associada ao enrolamento de campo, seguem o mesmo procedimento do item 2 da Seção 3.6.1.
- 3) Ligação dos enrolamentos da Máquina. Neste ponto, as bobinas associadas às fases a e b são conectadas em série, deixando a bobina da fase c em circuito aberto durante todo o ensaio, como descrito na **Figura 2.6**.

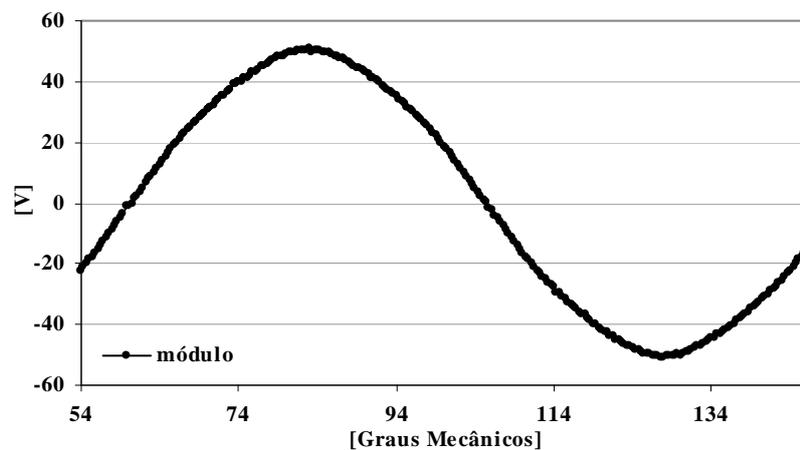
Assim, as bobinas conectadas em série são ligadas a uma fonte de corrente, conforme descrito em 2.6.2, alimentando a conexão resultante com uma corrente senoidal de amplitude igual a 210 A e ângulo de fase igual a  $0^\circ$ .

As bobinas correspondentes aos enrolamentos amortecedores são conectadas da mesma forma descrita no item 3 da Seção 3.6.1, cuja conexão resultante é apresentada na **Figura 3.11**.

- 4) Simulação do Ensaio. O rotor é deslocado gradualmente, conforme descrito no item 4 da Seção 3.6.1. Neste caso, também, a análise harmônica empregada utiliza uma frequência de 60 Hz. Na **Figura 3.14**, é mostrada a curva resultante do ensaio, com os valores da tensão induzida no campo para cada posição angular do rotor.

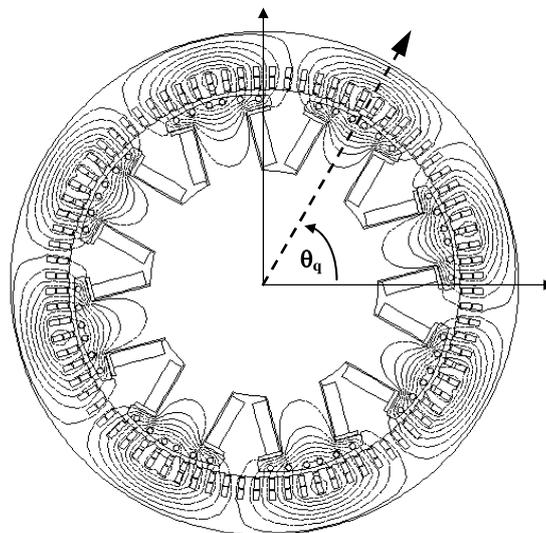
Como fora mencionado, a variação na posição angular do rotor não é contínua por causa da divisão da máquina em elementos finitos. Porém, é obtida a melhor aproximação para a posição angular do rotor, na qual o valor da tensão induzida no campo é o mais próximo possível do zero.

Assim, os dois valores obtidos para o posicionamento angular do rotor no eixo em quadratura foram de  $60^\circ$  e  $105^\circ$  graus mecânicos, como pode ser observado na **Figura 3.14**, escolhendo-se como a melhor posição para o rotor o ângulo  $60^\circ$  mecânicos  $\theta_q$ .



**Figura 3.14:** Tensão induzida no campo para determinar a posição correta do rotor para ensaios no eixo  $q$

Também neste ensaio, na posição angular do rotor, o eixo magnético da armadura alinha-se com o eixo magnético do rotor, quando a tensão induzida no campo atinge o valor zero, como é mostrado na **Figura 3.15**. Onde se observa que as linhas de fluxo ficam concentradas nas sapatas polares do rotor.



**Figura 3.15:** Linhas de fluxo quando se encontra a posição correta do rotor para ensaios no eixo  $q$ .

Encontradas as posições do rotor nos eixos magnéticos  $d$  e  $q$ , poderão ser realizadas as simulações dos ensaios, na faixa de frequência considerada, processando-se esses resultados para obter as diferentes curvas características da máquina.

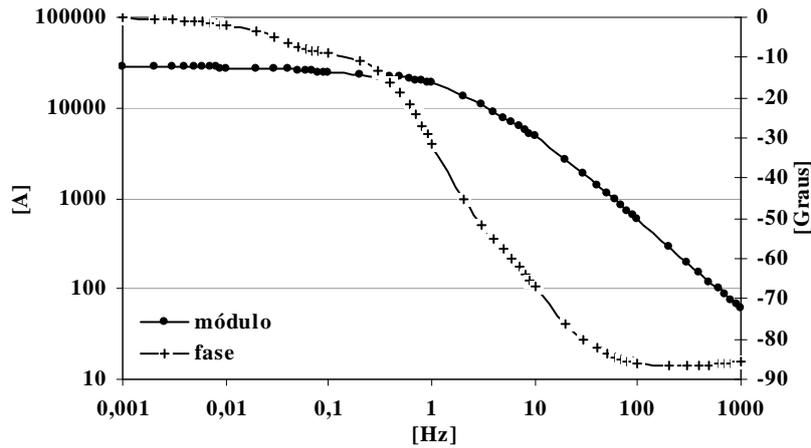
### 3.6.3 Curva de Indutância Síncrona $L_d(s)$

Nesta seção será descrita, passo a passo, a metodologia seguida para o ensaio que determinará a curva característica  $L_d(s)$ . Porém, antes de simular esse ensaio, posiciona-se o rotor no eixo  $d$ .

- 1) Modelagem da máquina. A modelagem da máquina é a mesma descrita no item 1 da Seção 3.6.1.
- 2) Parâmetros requeridos para as bobinas. Para o projeto das bobinas do enrolamento de armadura e de amortecimento, são seguidos os mesmos procedimentos descritos no item 2 da Seção 3.6.1, bem como para o projeto da bobina correspondente ao enrolamento de campo.
- 3) Ligação dos enrolamentos da máquina. Nesta etapa, as bobinas associadas aos enrolamentos das fases a e b são conectadas em série, e a bobina correspondente à fase c fica em circuito aberto, conforme descrito na Seção 2.6.3.1.

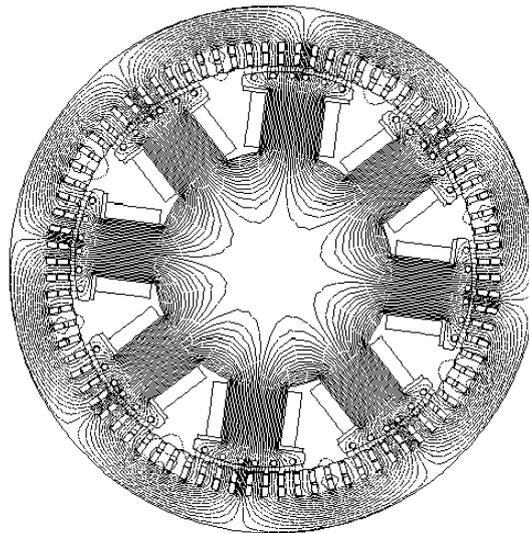
Assim, uma fonte de tensão alimenta a conexão resultante com tensão senoidal de amplitude igual a 254 V e ângulo de fase igual a  $0^\circ$ . As bobinas correspondentes ao enrolamento amortecedor são ligadas, conforme descrito no item 3 da Seção 3.6.1, cuja conexão resultante é apresentada na **Figura 3.11**. A bobina correspondente ao enrolamento de campo é ligada em curto-circuito.

- 4) Simulação do Ensaio. Para cada valor de frequência correspondente à faixa considerada, é determinado um valor de corrente de armadura. A tensão de armadura é a mesma tensão de alimentação para o ensaio. Com esses valores numéricos, associados aos módulos e às fases da corrente de armadura, é montada a curva mostrada na **Figura 3.16**.
-



**Figura 3.16:** Curvas no eixo  $d$  da corrente de armadura.

A seguir, é mostrado o gráfico das linhas de fluxo correspondente ao posicionamento do rotor no eixo direto para estabelecer a curva característica da indutância no eixo  $d$ .



**Figura 3.17:** Linhas de fluxo, para determinar curva  $L_d(s)$ , com o rotor posicionado no eixo  $d$  ( $330^\circ$ ).

A obtenção da curva de indutância  $L_d(s)$  inicia-se com o cálculo da impedância de armadura no eixo direto para uma dada frequência, conforme indicado na equação (2.61). Em seguida, será mostrado o processo de cálculo utilizado para determinar a curva característica da indutância no eixo direto, tendo como exemplo a frequência de 0,01 Hz. É calculada, a seguir, a impedância de armadura para 0,01 Hz:

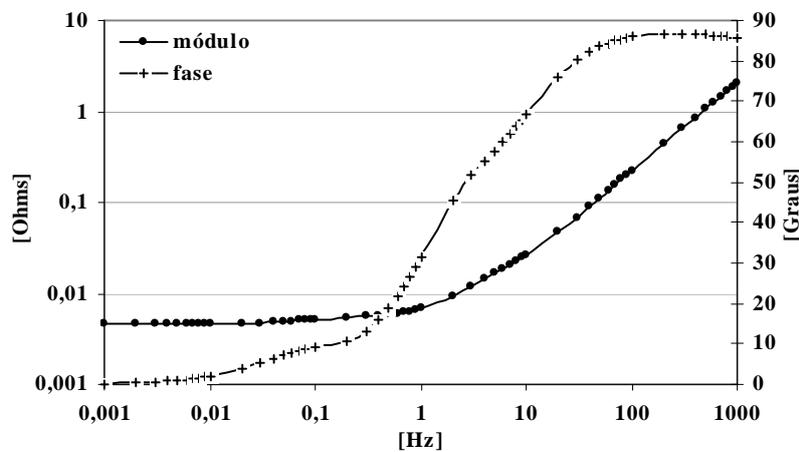
$$Z_{armd} (0,01) = \frac{254 \angle 0^\circ}{27677,57 \angle -1,92^\circ}$$

$$Z_{armd}(0,01) = 0,009177 \angle 1,92^\circ [\Omega]$$

Para o cálculo da impedância no eixo direto ( $Z_d(0,01)$ ), utiliza-se a equação (2.62) com o valor calculado de  $Z_{arm}(0,01)$ , obtendo-se:

$$Z_d(0,01) = 0,004588 \angle 1,92^\circ [\Omega]$$

O mesmo procedimento realizado para o cálculo de  $Z_d(0,01)$  é utilizado na determinação da impedância no eixo direto na faixa de frequência considerada, obtendo-se a curva mostrada na **Figura 3.18**:



**Figura 3.18:** Curva característica de impedância no eixo  $d$ .

Determina-se o valor da resistência de armadura,  $R_{arm}$ :

$$R_{arm} = Z_{arm}(s) \Big|_{s \rightarrow 0} = 0,004571 [\Omega]$$

Considerando a equação (2.63), é calculada a reatância no eixo direto  $X_d(s)$ , a partir da resistência de armadura e de cada valor da impedância  $Z_d(s)$  da curva correspondente à **Figura 3.18**, como é descrito a seguir:

$$X_d(s) = Z_d(s) - R_{arm} = \sqrt{(\text{Re}(Z_d) - R_{arm})^2 + (\text{Im}(Z_d))^2} \tag{3.21}$$

$$\theta_{X_d} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(Z_d)}{\text{Re}(Z_d) - R_{arm}} \right) \tag{3.22}$$

Mas, baseado na equação (2.64), o valor da indutância no eixo direto  $L_d(s)$  é calculado dividindo-se a expressão (3.21) pela frequência angular ( $s = j \omega$ ), obtendo-se a curva apresentada na **Figura 3.19**:

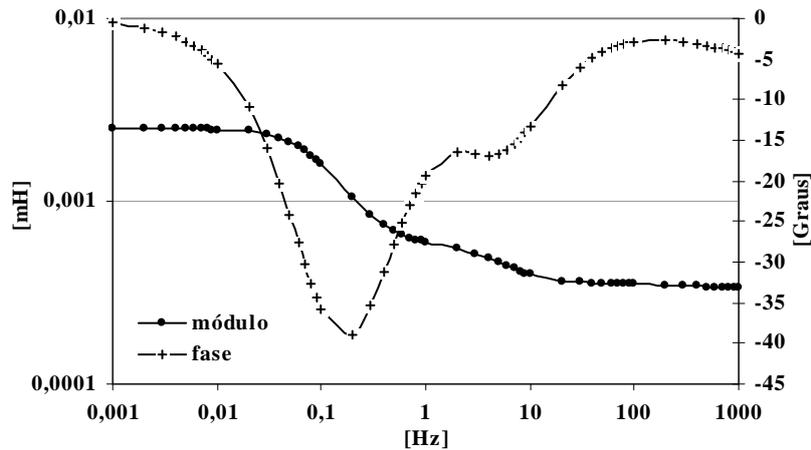


Figura 3.19: Curva característica da indutância no eixo  $d$ .

### 3.6.4 Curva da Função de Transferência $sG(s)$

A função de transferência  $sG(s)$  corresponde à relação entre a corrente de campo  $i_{fd}(s)$  e a corrente de armadura  $i_{arm}(s)$ . Neste ensaio, é utilizada a mesma conexão dos enrolamentos de campo e de armadura empregada para determinar a curva  $L_d(s)$ . Portanto, além da tensão e da corrente de armadura, é medida também a corrente de campo com a qual será estabelecida a curva  $sG(s)$ . A seguir, na **Figura 3.20**, são mostrados o módulo e a fase de  $i_{fd}(s)$  para a faixa de frequência considerada.

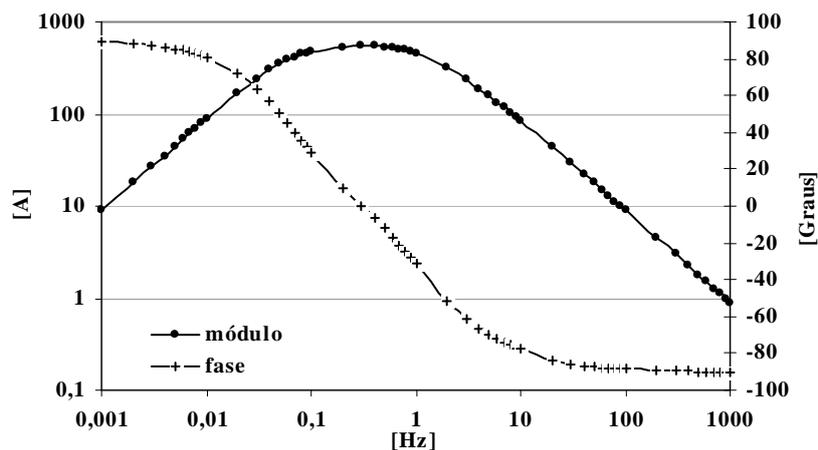


Figura 3.20: Curva da corrente no enrolamento de campo.

Para a obtenção da curva da função de transferência  $sG(s)$ , é utilizada a expressão (2.66), para cada frequência da faixa, obtendo-se o gráfico da **Figura 3.21**.

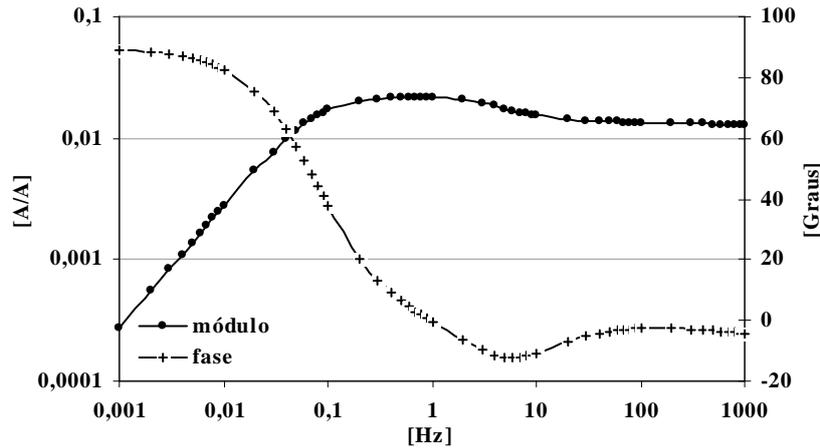


Figura 3.21: Curva da função de transferência  $sG(s)$ .

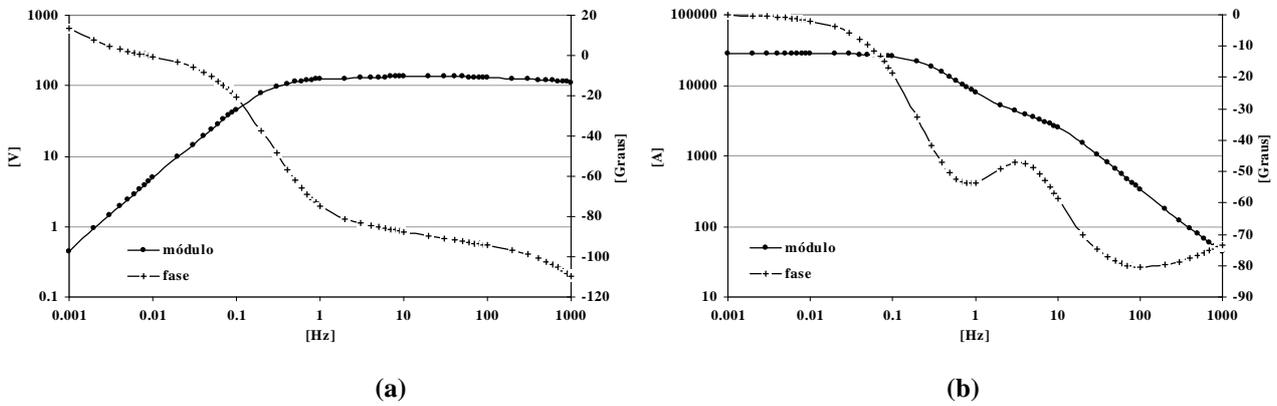
### 3.6.5 Curva da Indutância Mútua entre o Campo e a Armadura $L_{af0}(s)$

A curva característica da indutância  $L_{af0}(s)$  refere-se à indutância mútua entre o enrolamento do rotor e o enrolamento do estator, para cada frequência correspondente à faixa considerada no presente trabalho. Todo este ensaio, como aconteceu no caso anterior, faz-se com o rotor posicionado no eixo direto ( $330^\circ$ ). Os passos seguidos na simulação deste ensaio são descritos a seguir:

- 1) Modelagem da máquina. A modelagem da máquina é a mesma descrita no item 1 da Seção 3.6.1.
- 2) Parâmetros Requeridos para as Bobinas. Para o projeto das bobinas do enrolamento de armadura e de amortecimento, bem como da bobina correspondente ao enrolamento de campo, é seguido o mesmo procedimento correspondente ao item 2 da Seção 3.6.1.
- 3) Ligação dos enrolamentos da Máquina. Neste item, as bobinas e a fonte de tensão são conectadas da mesma forma descrita no item 3 da Seção 3.6.3, mas o circuito resultante é utilizado para simular o ensaio correspondente à determinação da curva da Indutância  $L_{af0}(s)$ , como é descrito na Seção 2.6.3.3. Dessa maneira, a fonte de tensão alimenta a conexão resultante com tensão senoidal de amplitude igual a 254 V e ângulo de fase igual a  $0^\circ$ .

Os enrolamentos amortecedores são ligados da mesma forma descrita no item 3 da Seção 3.6.1.

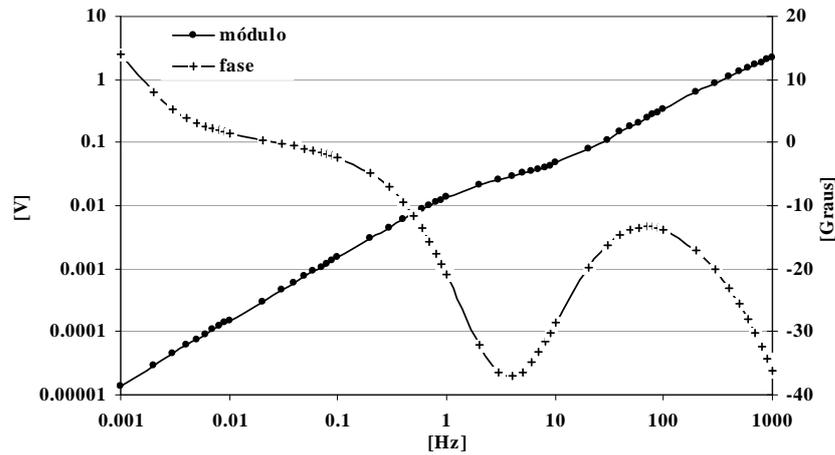
4) *Simulação do Ensaio*. Neste ensaio, são determinados os valores da corrente de armadura  $i_{arm}(s)$  e a tensão induzida no enrolamento de campo  $e_{fd}(s)$  para cada frequência da faixa considerada, obtendo-se os gráficos dos módulos e fases mostrados na **Figura 3.22**.



**Figura 3.22:** (a) Tensão induzida no campo; (b) Corrente de armadura.

As linhas de fluxo magnético, determinadas neste ensaio são equivalentes às mostradas na **Figura 3.17**.

Para cada valor de frequência pertencente à faixa considerada, é utilizada a expressão (2.68), podendo-se montar a curva  $Z_{afo}(s)$ , que é mostrada na **Figura 3.23**.



**Figura 3.23:** Curva característica da impedância  $Z_{afo}(s)$ .

Para o cálculo da indutância  $L_{afo}(s)$ , a partir da impedância mútua entre o enrolamento do rotor e o enrolamento do estator  $Z_{afo}(s)$ , é utilizada a expressão (2.69), obtendo-se a curva mostrada na **Figura 3.24**. Nesse gráfico são mostrados, para cada frequência, o módulo e o ângulo da fase da indutância mútua.

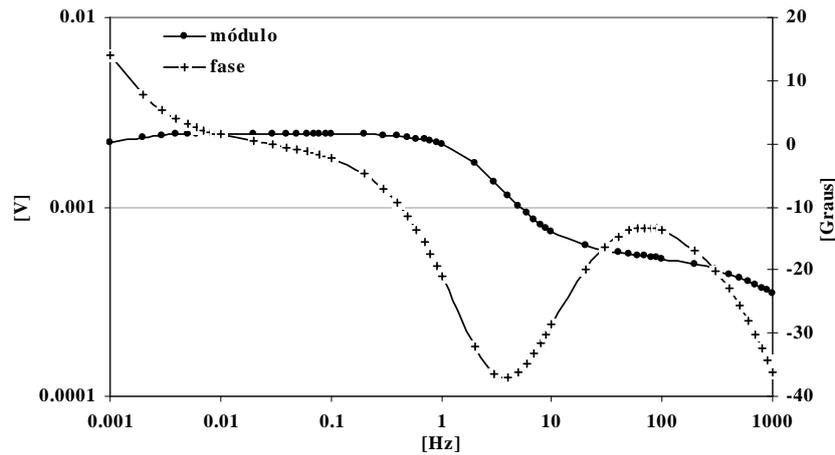


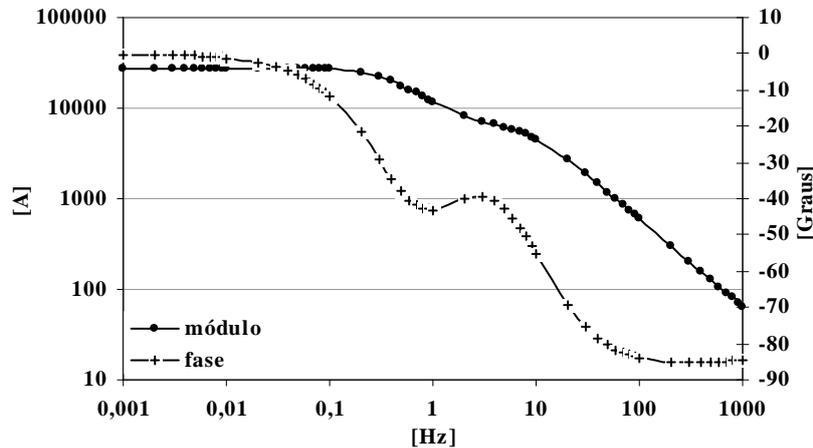
Figura 3.24: Curva da indutância mútua  $L_{af0}(s)$ .

### 3.6.6 Curva da Indutância Síncrona $L_q(s)$

Neste ensaio, antes da simulação, o rotor é posicionado no eixo em quadratura ( $240^\circ$ ). Abaixo, são descritos os passos seguidos na determinação da curva característica da indutância no eixo em quadratura:

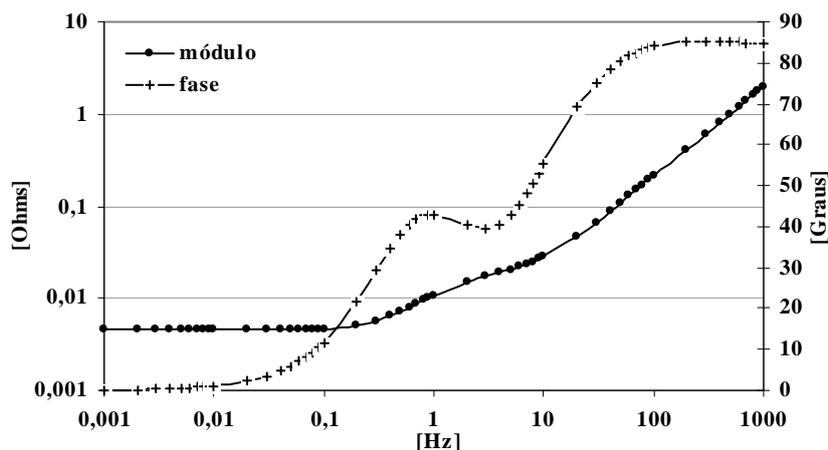
- 1) Modelagem da máquina. A modelagem da máquina é a mesma descrita no item 1 da Seção 3.6.1.
- 2) Parâmetros Requeridos para as Bobinas. Para o projeto das bobinas do enrolamento de armadura e de amortecimento, bem como da bobina correspondente ao enrolamento de campo, é seguido o mesmo procedimento correspondente ao item 2 da Seção 3.6.1.
- 3) Ligação dos enrolamentos da Máquina. As bobinas associadas aos enrolamentos das fases a e b são conectadas entre si, em série, deixando a bobina associada à fase c em circuito aberto, conforme descrito na Seção 2.6.4. A fonte de tensão alimenta a conexão resultante com tensão senoidal de amplitude igual a 254 V e ângulo de fase igual a  $0^\circ$ . As bobinas correspondentes aos enrolamentos amortecedores são ligadas como descrito no item 3 da Seção 3.6.1, cuja conexão resultante é apresentada na **Figura 3.11**. Neste ensaio, o enrolamento de campo fica em circuito aberto.

- 4) Simulação do Ensaio. Para cada valor de frequência pertencente à faixa considerada, é determinado um valor da corrente de armadura, com a finalidade de montar a curva de módulo e fase, que é apresentada na **Figura 3.25**.



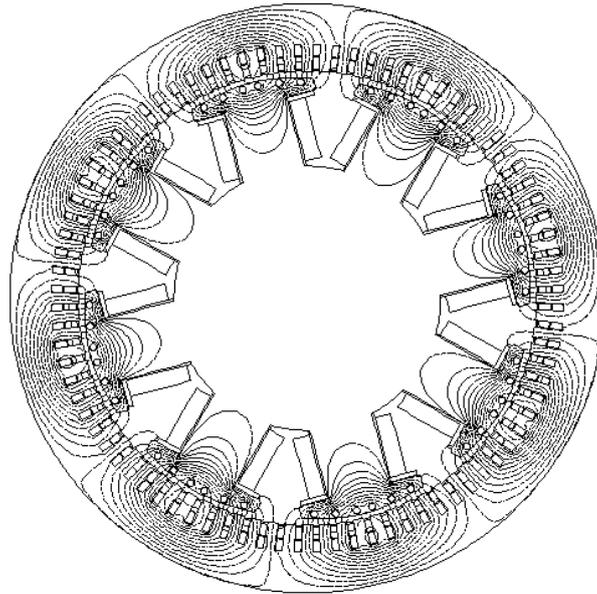
**Figura 3.25:** Curva da corrente de armadura no eixo  $q$ .

Depois de calculada a corrente de armadura para cada frequência e considerando que a tensão de armadura é a mesma tensão de alimentação para o ensaio, utiliza-se a equação (2.72) para o cálculo da impedância de armadura  $Z_{arm}(s)$ . Após a obtenção da curva de impedância de armadura, a curva de impedância no eixo em quadratura  $Z_q(s)$  é calculada, utilizando-se a expressão (2.73), e seu gráfico é apresentado na **Figura 3.26**.



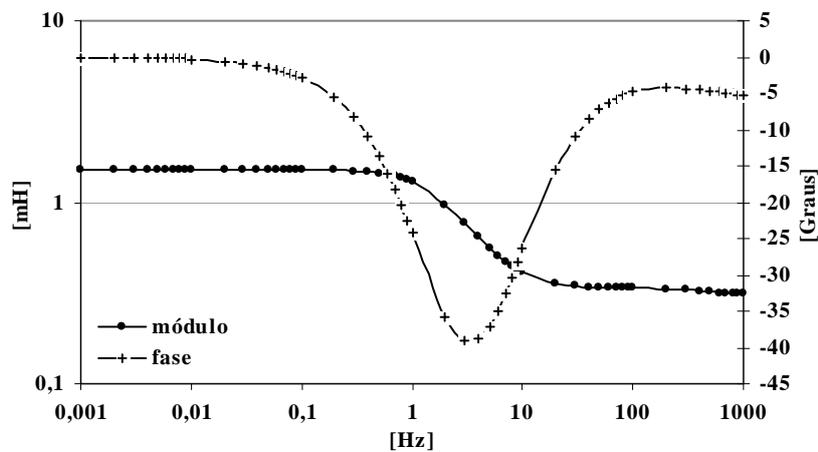
**Figura 3.26:** Curva característica da impedância,  $Z_q(s)$ , no eixo  $q$ .

As linhas do fluxo magnético do presente ensaio são mostradas, a seguir, na **Figura 3.27**.



**Figura 3.27:** Linhas de fluxo para determinar a curva  $L_q(s)$  com o rotor posicionado no eixo  $q$ .

Na expressão (2.74), o valor da resistência  $R_a$  é igual ao valor da resistência de armadura  $R_{arm}$ , porque, neste ensaio, a mesma configuração correspondente ao enrolamento de armadura foi utilizada também para o ensaio que determina a indutância no eixo direto cujo valor foi determinado na seção 3.6.3. Logo, o valor da resistência de armadura ( $R_a = R_{arm} = 0,003958 \Omega$ ) é utilizado na equação (2.75), considerando cada frequência contida na faixa estabelecida para calcular a indutância no eixo  $q$ . Assim, um gráfico de cada valor da indutância correspondente a cada frequência é apresentado na **Figura 3.28**.



**Figura 3.28:** Curva característica da indutância no eixo  $q$ .

### 3.7 Determinação das Curvas de Indutância pelo Método do Vetor Potencial

No caso anterior, as curvas de indutâncias foram determinadas através das medições das tensões e das correntes, tal como sugerido pela norma [3], fornecidas na simulação dos ensaios de resposta em frequência utilizando o ANSYS®. Porém, nesta seção, é apresentada uma alternativa para a determinação dessas curvas através do Vetor Potencial Magnético.

Para a aplicação da metodologia do vetor potencial magnético, é utilizada a seguinte expressão matemática:

$$L = \frac{\Re\left(J^* \times \sum_{i=1}^{N_E} (A_i \times S_i)\right)}{|I|^2} \times \ell \quad (3.23)$$

Na equação (3.23) é utilizado o conjugado da densidade de corrente total  $J$  (indicado como  $J^*$ ). Nessa equação, para o cálculo da indutância  $L$ , é utilizada a parte real do produto.

Além disso, na simulação dos ensaios, é medido o vetor potencial magnético simultaneamente com a tensão e a corrente, mas as duas últimas grandezas citadas são utilizadas nos ensaios simulados anteriormente, e a primeira grandeza eletromagnética é utilizada, nesta seção, na metodologia do Vetor Potencial Magnético para a determinação das mesmas curvas de indutância.

Desta maneira, através do método do vetor potencial magnético, são determinadas as curvas características de indutância correspondentes a  $L_d(s)$  e  $L_q(s)$ , utilizando-se a mesma metodologia empregada nas seções 3.6.3, e 3.6.6, respectivamente. Apresentando-se como metodologia alternativa.

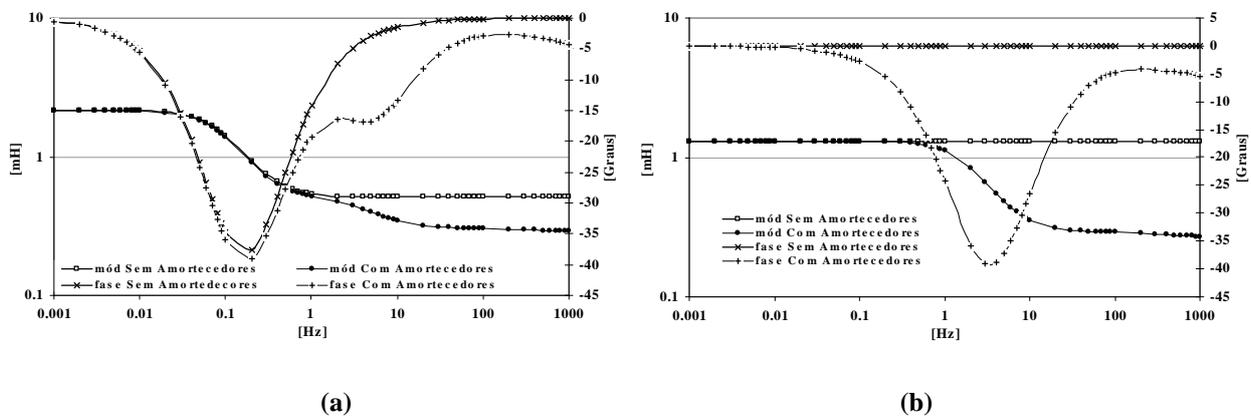
### 3.8 Influência do Projeto nos Parâmetros Operacionais

Nesta seção, serão estudados como alguns detalhes do projeto afetam o comportamento eletromagnético de uma máquina síncrona. No presente trabalho, os detalhes estudados foram os seguintes:

- Presença do Enrolamento Amortecedor;
- Configuração do Enrolamento Amortecedor;
- Consideração da Corrente no Núcleo.

#### 3.8.1 Presença do Enrolamento Amortecedor

Nesta seção, é estudado o efeito da presença do enrolamento amortecedor no projeto de uma máquina síncrona. A seguir, nas **Figuras 3.27 (a) e (b)**, é mostrada a influência da presença do enrolamento amortecedor nos valores da indutância nos eixos direto e em quadratura do gerador considerado no presente trabalho.



**Figura 3.29:** Curva comparativa do efeito amortecedor nas indutâncias: (a) no eixo *d*; e (b) no eixo *q*.

Na **Figura 3.29 (a)**, descreve-se graficamente que na curva de indutância no eixo *d*, quando a máquina não possui enrolamentos amortecedores, os valores de indutância permanecem constantes nas regiões de média e alta frequência (a partir de 1 Hz em adiante). Porém, isso não acontece com a presença do enrolamento amortecedor onde os valores da indutância nessas regiões são diferentes, mostrando-se assim a influência do efeito do enrolamento amortecedor no eixo direto.

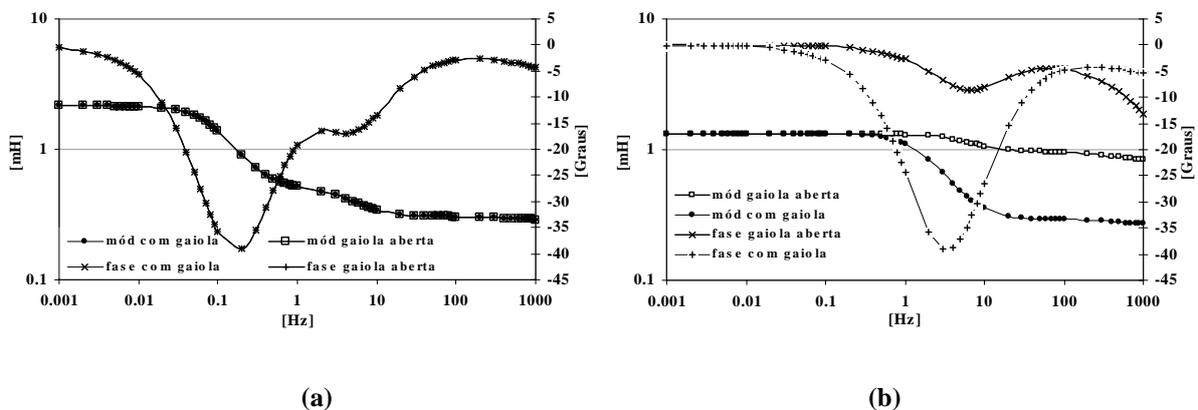
Na **Figura 3.29 (b)**, determina-se que na ausência do enrolamento amortecedor, os valores de indutância no eixo  $q$  permanecem constantes durante tudo o intervalo de frequência considerado. Então, os efeitos da presença ou ausência dos enrolamentos amortecedores, provenientes da simulação do ensaio no eixo direto e no eixo em quadratura, confirmam o conceito da referência [15], com relação à determinação das indutâncias transitórias e subtransitórias.

### 3.8.2 Configuração do Enrolamento Amortecedor

Neste estudo, têm-se as considerações do tipo de conexão empregada para os enrolamentos amortecedores da máquina. Diferentes tipos de conexão podem gerar diferentes curvas características de indutância nos eixos  $d$  e  $q$ .

Os tipos de conexão estudados para o enrolamento amortecedor correspondem à configuração descrita na **Figura 3.11** e à configuração denominada conexão descontínua de amortecedores (gaiola aberta). Nessa última conexão, as bobinas do enrolamento amortecedor, associadas a um determinado pólo, são conectadas em paralelo entre si, mas elas não estão conectadas entre pólos, caracterizando o enrolamento amortecedor em gaiola aberta.

Considerando esses dois casos de conexão dos enrolamentos, são apresentadas, nas **Figuras 3.28 (a) e (b)**, as curvas de indutância nos eixos  $d$  e  $q$ ,



**Figura 3.30:** Curva comparativa da configuração do amortecedor nas indutâncias:(a) no eixo  $d$ ; (b) no eixo  $q$

Na **Figura 3.30 (a)**, a curva de indutância no eixo  $d$  é a mesma para os dois tipos de conexões considerados. A razão disso vem da análise da **Figura 3.17**, onde se pode ver que as linhas de fluxo passaram através dos pólos da máquina, atravessando os condutores que ligam em paralelo as bobinas do enrolamento amortecedor, percorrendo todo o núcleo. Nenhuma das linhas de fluxo magnético atravessa os condutores que ligam em paralelo o conjunto de bobinas do enrolamento amortecedor de um pólo com o conjunto de outro pólo (condutor que fecha a gaiola), determinando uma conexão parecida com uma gaiola de esquilo.

Portanto, a existência ou não dessas ligações não afeta o deslocamento das linhas de fluxo magnético durante o ensaio no eixo direto, determinando-se igual curva característica da indutância  $L_d(s)$  para os dois tipos de conexões do enrolamento amortecedor.

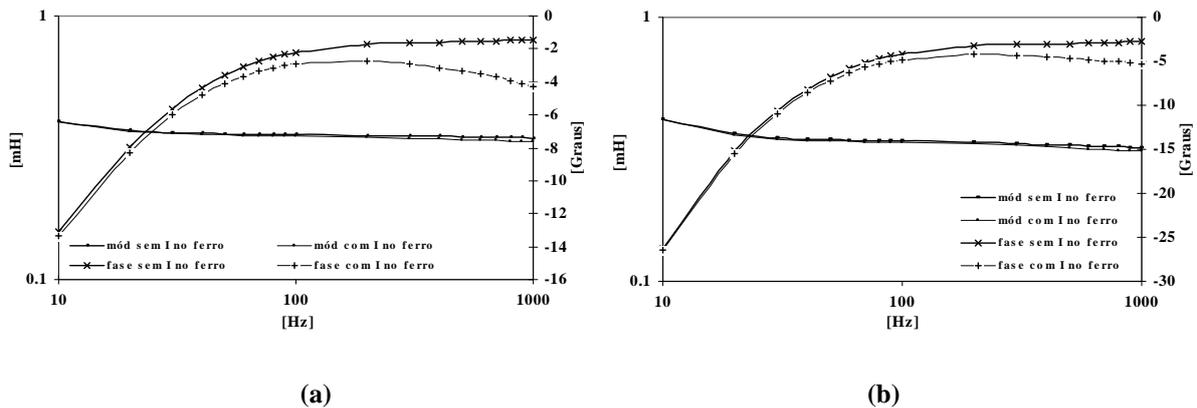
Porém, isso não acontece quando se faz o ensaio para estabelecer a curva característica da indutância  $L_q(s)$ , considerando os dois tipos de conexões do enrolamento amortecedor porque, nesse caso, as linhas de fluxo magnético concentram-se na cabeça do pólo (**Figura 3.27**). Assim, algumas das linhas de fluxo atravessam os condutores que ligam em paralelo os grupos de bobinas do enrolamento amortecedor associadas a cada pólo. Logo, a existência ou não dessas conexões afetam sensivelmente o comportamento das linhas de fluxo magnético durante o ensaio, aumentando essa influência para frequências cada vez maiores, como pode ser observado na curva de indutância  $L_q(s)$  da **Figura 3.30 (b)**.

### 3.8.3 Consideração da Corrente no Núcleo

No comportamento real da máquina síncrona, existem correntes induzidas no núcleo da máquina (correntes de *Foucault*) que acarretam perdas no Ferro. Embora essas correntes existam, o seu valor é muito pequeno.

Na presente seção, serão estudados os efeitos da presença ou não de correntes induzidas no núcleo nos parâmetros operacionais.

A influência nos parâmetros operacionais, devido às correntes de *Foucault*, é mais bem descrita através das curvas de indutância no eixo *d* e no eixo *q*. A seguir, nas **Figuras 3.29 (a) e (b)**, é descrita a influência nos eixos direto e de quadratura no módulo e na fase da indutância, considerando, respectivamente, a ausência ou não de correntes induzidas.



**Figura 3.31:** Influência da corrente no Ferro: (a) Indutância no eixo *d*; (b) Indutância no eixo *q*.

Nas **Figuras 3.36 (a) e (b)**, pode-se observar que, para baixas frequências, a curva de indutância (módulo e fase) não varia com a consideração ou não de correntes de Foucault. Mas isso não acontece com as altas frequências, onde são percebidas variações (observando-se uma diferença maior na fase do que no módulo).

### 3.9 Cálculo dos Parâmetros Operacionais

Após a obtenção das curvas características de indutância nos eixos *d* e *q* da curva correspondente à função de transferência  $sG(s)$  e à indutância mútua  $L_{af0}(s)$ , o passo seguinte refere-se à determinação do circuito equivalente da máquina nos eixos direto e em quadratura, através da identificação de parâmetros, que não é o objetivo do presente trabalho.

Portanto, nesta seção, são apresentados os valores de determinadas indutâncias operacionais da máquina, calculadas com aproximações através da análise correspondente ao estudo da influência do projeto da máquina nesses parâmetros (Seção 3.7), bem como o estudo de expressões matemáticas das indutâncias operacionais.

As indutâncias operacionais consideradas são: as indutâncias síncronas, as transitórias e as subtransitórias. As indutâncias síncronas nos eixos direto e em quadratura são calculadas considerando as expressões (2.53) e (2.57), respectivamente. Para determinar o valor da indutância no eixo  $d$ , de regime permanente, é considerado  $s \rightarrow 0$ , como mostrado a seguir:

**Tabela 3.1:** Comparação do cálculo da indutância  $L_d(s)$  usando diferentes metodologias.

	Análise Magnetostática	Análise Harmônica	
		V/I	Az
$L_d(0) \approx L_d(0,001) =$	2,477 [mH]	2,4806 [mH]	2,4809 [mH]

A mesma consideração anterior é utilizada para o cálculo da indutância síncrona no eixo em quadratura:

**Tabela 3.2:** Comparação do cálculo da indutância  $L_q(s)$  usando diferentes metodologias.

	Análise Magnetostática	Análise Harmônica	
		V/I	Az
$L_q(0) \approx L_q(0,001) =$	1,527 [mH]	1,5130 [mH]	1,513 [mH]

Um cálculo aproximado pode ser obtido também para as indutâncias transitórias e subtransitórias correspondentes aos eixos  $d$  e  $q$ . Dessa forma, pode ser observado na **Figura 3.29 (a)** que, na ausência do enrolamento amortecedor, os valores das indutâncias transitória e subtransitória no eixo direto são os mesmo quando a frequência está tendendo ao infinito ( $s \rightarrow \infty$ ). Dessa maneira, considerando-se a equação (2.53), é calculada a indutância de regime transitório  $L'_d$ , como é descrito na **Tabela 3.3**.

**Tabela 3.3:** Comparação do cálculo da indutância  $L'_d(s)$ , usando diferentes metodologias.

<i>Na ausência do enrolamento amortecedor, Fig 3.33</i>	Análise Harmônica	
	V/I	Az
$L'_d = L_d(\infty) \approx L_d(1000) =$	0,5898 [mH]	0,5899 [mH]

Porém, a indutância transitória no eixo em quadratura é considerada equivalente à indutância subtransitória no eixo  $q$ , conforme descrito na referência [15].

O valor aproximado da indutância subtransitória correspondente aos eixos direto e em quadratura é calculado a partir das expressões matemáticas (2.53) e (2.57), respectivamente. Em ambas as expressões, os valores das indutâncias subtransitórias são determinados quando a frequência está tendendo para o infinito ( $s \rightarrow \infty$ ).

Mas, para um cálculo aproximado das indutâncias  $L_d''$  e  $L_q''$  na curva da **Figura 3.19** e **Figura 3.28** respectivamente, é considerado o valor da indutância para o valor máximo da frequência no intervalo considerado, conforme descrito na **Tabela 3.4**.

**Tabela 3.4:** Comparação do cálculo das indutâncias subtransitórias, usando diferentes metodologias.

	Análise Harmônica	
	V/I	Az
$L_d'' = L_d(\infty) \approx L_d(1000) =$	0,334 [mH]	0,333 [mH]
$L_q'' = L_q(\infty) \approx L_q(1000) =$	0,311 [mH]	0,309 [mH]

Para a obtenção de todas as curvas apresentadas neste capítulo foram simulados em 2D, através do programa ANSYS<sup>®</sup>, os ensaios baseados na análise magnetostática e na Resposta em Frequência (análise harmônica).

Para os valores fornecidos nas simulações, com os quais serão determinadas as curvas características apresentadas, são utilizadas duas metodologias: a) metodologia baseada nos valores de Tensão/Corrente (V/I) e b) metodologia baseada no *Vetor Potencial Magnético* (Az). Na primeira metodologia mencionada, considera-se a resistência de armadura como um valor constante. O valor dessa resistência é considerado igual ao da impedância, quando a frequência tende a zero ( $s \rightarrow 0$ ). Porém, a resistência, na realidade, é sensível à variação da frequência [3].

Dessa maneira, a metodologia do *Vetor Potencial Magnético* (segunda metodologia considerada) apresenta-se como uma alternativa interessante para a obtenção das curvas características e cálculo dos parâmetros de uma máquina síncrona de pólos salientes porque se evita a consideração da resistência para a obtenção do valor da indutância.

No segundo método, o cálculo das indutâncias se faz em forma direta, conforme descrito na Seção 3.6, através da equação (3.23).

Mas, as curvas características da máquina estabelecidas, utilizando as duas metodologias de simulação, correspondem às curvas características apresentadas na norma [3]. Assim, no presente trabalho, não foram feitas medições experimentais sobre uma máquina real. Dessa maneira, é validada a proposta inicial apresentada de fazer projetos de máquinas através da simulação dos ensaios, diminuindo o número de protótipos reais, otimizando, dessa forma, os custos e a rapidez para atingir os parâmetros adequados ao gerador.

---

---

## Capítulo 4

### Conclusões e Sugestões

#### 4.1 Conclusões

Na prática, os ensaios realizados sobre uma máquina para determinar os seus parâmetros operacionais, com a finalidade de estabelecer um modelo matemático para fins de estudo de estabilidade de sistemas de potência, trazem consigo muitos problemas. Além do fornecimento de um protótipo para estudo, como a configuração adequada dos enrolamentos para os ensaios pertinentes, há também os problemas de isolamento, de disponibilidade de instrumentos precisos de medição assim como de riscos de danificação devido à utilização de grandes tensões ou correntes.

Outro detalhe a ser considerado é a exatidão das medições durante o ensaio que dependerá do tipo de instrumentos de precisão utilizados na medição das grandezas, que poderiam apresentar dificuldades em baixa frequência. Assim, uma forma alternativa de contornar esse problema seria a simulação da modelagem e dos ensaios correspondentes. Além disso, há a possibilidade de simular os ensaios com potências elevadas. Nesse sentido, no presente trabalho, a simulação dos Ensaios de Reposta em Frequência foi realizada através do método dos Elementos Finitos, utilizando como ferramenta computacional o programa comercial ANSYS®. Tal programa constituiu uma excelente ferramenta para determinar as curvas características associadas aos eixos  $d$  e  $q$  de uma máquina síncrona de pólos salientes. A partir dessas curvas características, foram calculados alguns dos parâmetros operacionais da máquina: as indutâncias síncronas e as transitórias e subtransitórias, correspondentes aos dois eixos.

Foi também observada uma maneira de obter maior precisão na determinação das curvas características da máquina através da simulação dos ensaios, levando-se em consideração divisões menores naquelas áreas onde se terá maior influência de fluxo magnético, como as áreas localizadas perto do entreferro. Porém, isso é também uma desvantagem, já que quanto maior a divisão, maior será o tamanho do sistema de equações que o ANSYS® precisará para resolver, aumentando o tempo de computação.

---

As curvas características, determinadas através da simulação dos ensaios de Resposta em Frequência, utilizando o programa ANSYS<sup>®</sup>, são similares às curvas características apresentadas na norma da IEEE. Além disso, as variações dessas curvas, como consequência da variação do projeto, correspondem às descritas na literatura.

Portanto, o presente trabalho descreveu como o programa comercial ANSYS<sup>®</sup> pode ser aplicado para simular o ensaio de resposta em frequência da máquina correspondente em estudo. Assim, a utilização desta análise pode ser considerada como uma ferramenta útil, principalmente, para os fabricantes, tendo em vista a possível redução do número de protótipos intermediários, bem como uma maior confiança nos parâmetros calculados.

## 4.2 Sugestões

Apesar dos bons resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, existem alguns aspectos ainda não explorados que podem ser considerados em futuros trabalhos que são descritos a seguir:

- a) Determinação dos parâmetros operacionais da máquina através da identificação de parâmetros, a partir das curvas características estabelecidas com a simulação dos ensaios de resposta em frequência, estabelecendo-se, assim, o circuito equivalente da máquina com relação aos eixos direto e em quadratura.
  - b) Consideração, na simulação dos ensaios, do efeito da saturação do material ferromagnético, com a finalidade de obter um modelo matemático da máquina síncrona que seja mais adequado à realidade.
  - c) Simulações dos ensaios em 3D, onde seja considerado um modelo mais confiável do núcleo do rotor e do estator (efeitos tridimensionais).
-

## Referências Bibliográficas

- [1] IEEE Guide, Test Procedures for Synchronous Machine. IEEE Std 115 – 1995.
  - [2] Chapman, S., J., *Máquinas Eléctricas*. Editorial McGraw – Hill Latinoamericana, S. A., ISBN 968–422–149–5, Copyright © 1987.
  - [3] IEEE Guide, Standard Procedures for Obtaining Synchronous Machine Parameters by Standstill Frequency Response Testing. IEEE Std 115A – 1987.
  - [4] Nabeta, S., I., Cardoso, J., R., Foggia, A., Coulomb, J., Reyne, G., “Determinação Dos Parâmetros de Máquinas Síncronas da Simulação de Elementos Finitos do Ensaio de Resposta em Frequência”. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática*. São Paulo, Brasil, pp. 1491 – 1496. Setembro, 1996.
  - [5] Park, D., Y., Karmaker, H., C., Dawson, G., E., Eastham, A., R., “Standstill Frequency Response Testing and Modelling of Salient Pole Synchronous Machines”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 13, No. 3, September 1998.
  - [6] Bissing, H., Reichert, K., “Modelling and Identification of Synchronous Machines, a New Approach with an Extended Frequency Range”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 8, No. 2, June 1993.
  - [7] Nabeta, S., I., Foggia, A., Coulomb, J., L., Reyne, G., “A Time Stepped Finite Element Simulation of a Symmetrical Short Circuit in a Synchronous Machine”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 30, No. 5, September 1994.
  - [8] Turner, P., J., Reece, A., B., J., McDonald, D., C., “The D.C. Decay Test for Determining Synchronous Machine Parameters: Measurement and Simulation”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 4, No. 4, December 1989.
  - [9] Keyhani, A., “Identification of Synchronous Machine Linear Parameters from Standstill step Voltage Input Data”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 10, No. 2, June 1995.
  - [10] Kundur, P., *Power System Stability and Control*. The EPRI Power System Engineering Series. McGraw–Hill, Inc., ISBN 0–07–035958–X, 1993.
  - [11] De Mello, F., P., *Dinâmica das Máquinas Eléctricas – I*. Curso de Engenharia em Sistemas de Potência – Série P. T. I. Convênio ELETROBRÁS/UFMS. Volume 4. Santa Maria – RS – Brasil, 1979.
-

- [12] Kuhlmann, J., H., *Design of Electrical Apparatus*. John Wiley & Sons, Inc., Third Edition. New York – USA, 1950.
- [13] Assumpção Bastos, J., P., *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). 3ª Edição revisada. Florianópolis – Brasil, 1996.
- [14] ANSYS V 5.4. *Users's Manual*, 2000.
- [15] Jordão, R., G., *Máquinas Síncronas*, Universidade de São Paulo. Ed. Universitaria, 1980.
-

## Apêndice A

# Arquivos de Programas para Simulação dos Ensaio

## A.1 Programa Fonte

Para a implementação da máquina que é simulada numericamente usando o programa ANSYS® utilizou-se arquivos de entrada em formato ASCII, os quais serem listados a seguir:

*% Rotina para modelar no ANSYS® uma máquina de pólos salientes (oito pólos) e discretiza-la em elementos finitos.*

```

/PREP7                                ! COMANDO PARA INICIAR O PRÉ-PROCESSAMENTO
/TITLE, MAQUINA SINCRONA
!***** DECLARAÇÃO DOS TIPOS DE ELEMENTOS A SEREM UTILIZADOS *****
ANTYPE,STATIC                          ! ANALISIS ELETROSTATICO
ET,1,13,,,                              ! ELEMENTO MAGNETICO 2-D COM 4-NÓS
ET,2,53,3,,,,                           ! CIRCUIT-COUPLED STRANDED COIL - ELEMENTO COM 8-NÓS
ET,3,124,5                               ! STRANDED COIL - CIRCUITO EXTERNO
ET,4,124,4,0                             ! FONTE DE VOLTAGE INDEPENDENTE, SINOIDAL - CIRCUITO EXTERNO
ET,5,124,0                               ! EXTERNAL RESISTOR
ET,6,124,6                               ! MASSIVE CONDUCTOR - CIRCUITO EXTERNO
ET,7,53,4,,,,                           ! CIRCUIT-COUPLED MASSIVE CONDUCTOR - ELEMENTO COM 8-NÓS
ET,8,53,1                                ! CURRENT-FED MASSIVE CONDUCTOR
PIR= 4*ATAN(1)                           ! CONSTANTE PI EM RADIANES
EMUNIT,MKS                               ! DEFINE SISTEMA DE UNIDADES - MKS
*AFUN,DEG                                ! DEFINE A FUNCAO DEGREE
!***** DEFINIR AS DIMENSOES POR MEIO DE PARAMETROS *****
FC= 0.0254                               ! FACTOR DE CONVERSAO
A= 0.361*FC
B= 0.574*FC
C= 0.687*FC
D= 0.15*FC
D1= 0.9*FC
E= 1.5*FC
H= 5*FC
I= 0.06*FC
J= 3.5*FC/2
K= 0.33*FC
L= 0.4025*FC
M= 0.4130880067*FC
N= 1.125*FC
O= 0.0625*FC
Q= 0.06*FC
S= 0.1*FC
T= 0.25*FC
HP= 3.9*FC

```

---

```

HF= (HP-2*T)/32
HF1= HP-HF*25
HF2= HP-HF*18
HF3= HP-HF*11
BP= 6.875*FC/2
F= (E-D)/2
R1= 25*FC/2
R2= 32.5*FC/2
R3= 24.56*FC/2
R4= 12.28694599*FC
R5= (2*R3+R1)/3
R6= 22.21*FC/2
R7= (R3+2*R1)/3
RB= 0.1875*FC
RE= 5*FC/32
ND= 100
G= (D-I)/2
PI= 4*ATAN(1)
LA= 7*FC
NR= 84
NP= 8
NF= 342
NRP=3.5
NUM=0
ENT= 0
wt= 0
KK= 0
ZZ= 28
AA= 7.510835422E-5          !(E-D-I)*A/4
AF= D1*(HP-2*T)
AR= 2*PI/NR
AX= ASIN(J/(R3-H))
AY= ASIN((3.436125*FC)/R1)
A1= AR*B/(2*(A+B))
A2= AR*(B+2*A)/(2*(A+B))
XA1= COS(A1)
YA1= SIN(A1)
XA2= COS(A2)
YA2= SIN(A2)
XAR= COS(AR/2)
YAR= SIN(AR/2)
XPI= COS(PI/4)
XP= COS(PI/8)
YP= SIN(PI/8)
!***** DEFINIR PROPIEDADES DOS MATERIAIS *****
MP,MURX,1,10000             ! PERMEABILIDADE DA CARÇAÇA
MP,MURX,2,1                ! PERMEABILIDADE DO CONDUTOR FASE A-B
MP,MURX,3,1                ! PERMEABILIDADE DO ISOLANTE
MP,MURX,4,1                ! PERMEABILIDADE DO AR
MP,MURX,5,10000           ! PERMEABILIDADE DO NUCLEO DO ROTOR
MP,MURX,6,1                ! PERMEABILIDADE DO CONDUTOR FASE C
MP,RSVX,2,1.724E-8        ! RESISTIBIDADE DO CONDUTOR FASE A-B
MP,RSVX,5,0.5E-4         ! RESISTIBIDADE DO NUCLEO DO ROTOR

```

---

```

***** CRIAR UMA RANHURA E A MITADE DE UM POLO *****
!***** DEFINIR OS PONTOS *****
K,1,0,0
K,2,R1,0
K,3,R1*XA1,R1*YA1
K,4,(R1*XA1)+(I*XAR),(R1*YA1)+(I*YAR)
K,5,(R1*XA1)+((I+G)*XAR)+(G*YAR),(R1*YA1)+((I+G)*YAR)-(G*XAR)
K,6,(R1*XA1)+((I+G)*XAR),(R1*YA1)+((I+G)*YAR)
K,7,(R1*XA1)+(D*XAR),(R1*YA1)+(D*YAR)
K,8,(R1*XA1)+((D+F)*XAR),(R1*YA1)+((D+F)*YAR)
K,9,(R1*XA1)+(E*XAR),(R1*YA1)+(E*YAR)
K,10,(R1*XA2)+(E*XAR),(R1*YA2)+(E*YAR)
K,11,(R1*XA2)+((D+F)*XAR),(R1*YA2)+((D+F)*YAR)
K,12,(R1*XA2)+(D*XAR),(R1*YA2)+(D*YAR)
K,13,(R1*XA2)+((I+G)*XAR)-(G*YAR),(R1*YA2)+((I+G)*YAR)+(G*XAR)
K,14,(R1*XA2)+((I+G)*XAR),(R1*YA2)+((I+G)*YAR)
K,15,(R1*XA2)+(I*XAR),(R1*YA2)+(I*YAR)
K,16,R1*XA2,R1*YA2
K,17,R1*COS(AR),R1*SIN(AR)
K,18,R2,0
K,19,R2*COS(AR),R2*SIN(AR)
K,20,R3,0
K,21,R3-H,0
K,22,(R3-H)*COS(AX),J
K,23,((R3-H)*COS(AX))+HP,J
K,24,((R3-H)*COS(AX))+HP,(R1*SIN(AY))-RE
Z=(R1*SIN(AY))-RE-J
K,25,((R3-H)*COS(AX))+HP+RE,(R1*SIN(AY))-RE
K,26,((R3-H)*COS(AX))+HP+RE,(R1*SIN(AY))
K,27,((R3-H)*COS(AX))+HP+RE+L,(R1*SIN(AY))
K,28,((R3-H)*COS(AX))+HP+RE+L,(R1*SIN(AY))-RE
K,29,((R3-H)*COS(AX))+HP+RE+L+(RE*COS(PI/8)),(R1*SIN(AY))-RE+(RE*SIN(PI/8))
K,30,0,-M
K,31,(R3-H)*COS(ASIN((S+J)/(R3-H))),J+S
K,32,(R3-H)*COS(AX)+T,J+S
K,33,((R3-H)*COS(AX))+HP-T,J+S
K,34,((R3-H)*COS(AX))+HP-T,J+Z
K,35,(R3-H)*COS(AX)+T,J+D1+S
K,36,((R3-H)*COS(AX))+HP-T,J+D1+S
K,37,R5*XAR,R5*YAR
K,38,R5*COS(AR),R5*SIN(AR)
K,39,R5*COS(3*AR/2),R5*SIN(3*AR/2)
K,40,R5*COS(2*AR),R5*SIN(2*AR)
K,41,R5*COS(5*AR/2),R5*SIN(5*AR/2)
K,42,R5*COS(3*AR),R5*SIN(3*AR)
K,43,R5*COS(7*AR/2),R5*SIN(7*AR/2)
K,44,R5*COS(4*AR),R5*SIN(4*AR)
K,45,R5*COS(9*AR/2),R5*SIN(9*AR/2)
K,46,R5*COS(5*AR),R5*SIN(5*AR)
K,47,R5*COS(11*AR/2),R5*SIN(11*AR/2)
K,48,R5,0
K,49,(R3-H)*COS(5*AR),(R3-H)*SIN(5*AR)
K,50,(R3-H)*COS(11*AR/2),(R3-H)*SIN(11*AR/2)
K,51,R6,0
K,52,R7,0
K,53,R7*COS(AR),R7*SIN(AR)
K,PLOT,ALL
! PLOTA TODOS OS PONTOS

```

```
!***** DEFINIR AS LINHAS *****
LARC,2,3,1,R1          ! 1 - DEFINE UM ARCO
L,3,4                  ! 2 - DEFINE UMA LINHA
L,4,7                  ! 3
L,8,7                  ! 4
L,8,9                  ! 5
L,9,10                 ! 6
L,11,10                ! 7
L,11,12                ! 8
L,12,15                ! 9
L,15,16                ! 10
LARC,16,17,1,R1       ! 11
L,11,8                 ! 12
L,7,12                 ! 13
L,4,15                 ! 14
L,20,51                ! 15
LARC,18,19,1,R2       ! 16
L,18,2                 ! 17
L,19,17                ! 18
LARC,21,22,1,R3-H    ! 19
L,22,23                ! 20
L,24,23                ! 21
LARC,24,26,25,RE      ! 22
L,26,27                ! 23
LARC,27,29,28,RE      ! 24
LARC,20,29,30,R4      ! 25
LARC,22,31,1,R3-H    ! 26
L,31,32                ! 27
L,35,32                ! 28
L,33,36                ! 29
L,34,24                ! 30
L,35,36                ! 31
L,36,34                ! 32
L,21,1                 ! 33
L,33,32                ! 34
K,54,(R3-H)*XP,(R3-H)*YP
LARC,31,49,1,R3-H     ! 35
L,17,53                ! 36
L,20,48                ! 37
LARC,48,37,1,R5       ! 38
LARC,37,38,1,R5       ! 39
LARC,38,39,1,R5       ! 40
LARC,39,40,1,R5       ! 41
LARC,40,41,1,R5       ! 42
LARC,41,42,1,R5       ! 43
LARC,42,43,1,R5       ! 44
LARC,43,44,1,R5       ! 45
LARC,44,45,1,R5       ! 46
LARC,45,46,1,R5       ! 47
LARC,46,47,1,R5       ! 48
L,52,2                 ! 49
L,49,46                ! 50
L,50,47                ! 51
L,1,54                 ! 52
LARC,49,54,1,R3-H     ! 53
LARC,54,50,1,R3-H     ! 54
L,21,51                ! 55
```

```

LARC,51,23,1,R6           ! 56
L,52,48                   ! 57
L,53,38                   ! 58
LARC,52,53,1,R7          ! 59
LDIV,51,,,8,0            ! 60 - 67 DIVIDE UMA LINHA
LDIV,50,,,8,0            ! 68 - 75 DIVIDE UMA LINHA
LARC,55,62,1,(R5+7*R3-7*H)/8 ! 76 1
LARC,56,63,1,(R5+3*R3-3*H)/4 ! 77 2
LARC,57,64,1,(3*R5+5*R3-5*H)/8 ! 78 3
LARC,58,65,1,(R5+R3-H)/2 ! 79 4
LARC,59,66,1,(5*R5+3*R3-3*H)/8 ! 80 5
LARC,60,67,1,(3*R5+R3-H)/4 ! 81 6
LARC,61,68,1,(7*R5+R3-H)/8 ! 82 7
KL,25,1-(N/2)/0.0865,69 ! GERA UM PONTO ACIMA DE UMA LINHA
KL,25,1-((N/2)+(O/2))/0.0865,70
KL,25,1-((N/2)+O)/0.0865,71
KL,25,1-((3*N/2)+O)/0.0865,72
KL,25,1-((3*N/2)+(3*O/2))/0.0865,73
KL,25,1-((3*N/2)+(2*O))/0.0865,74
KL,25,1-((5*N/2)+(2*O))/0.0865,75
KL,25,1-((5*N/2)+(5*O/2))/0.0865,76
KL,25,1-((5*N/2)+(3*O))/0.0865,77
OO=-.793835229E-03
K,78,0,-OO !-M-(OO)
K,79,0,+OO !-M+(OO)
K,80,(((R3-H)*COS(AX))+HP+RE+L+(RE*COS(PI/8))-T),(R1*SIN(AY))-RE+(RE*SIN(PI/8))
K,81,R3-T,0
!***** CRIAR AS BARRAS NO POLO *****
LARC,81,80,30,R4-T
L,70,1
L,73,1
L,76,1
FLST,2,2,4,ORDE,2 ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,81
FITEM,2,-82
LINL,P51X ! INTERSETAR LINHAS
K,80,(((R3-H)*COS(AX))+HP+RE+L+(RE*COS(PI/8))-T),(R1*SIN(AY))-RE+(RE*SIN(PI/8))
K,81,R3-T,0
LARC,81,80,30,R4-T
FLST,2,2,4,ORDE,2 ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,81
FITEM,2,83
LINL,P51X ! INTERSETAR LINHAS
K,80,(((R3-H)*COS(AX))+HP+RE+L+(RE*COS(PI/8))-T),(R1*SIN(AY))-RE+(RE*SIN(PI/8))
K,81,R3-T,0
LARC,81,80,30,R4-T
FLST,2,2,4,ORDE,2 ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,81
FITEM,2,84
LINL,P51X ! INTERSETAR LINHAS
CIRCLE,82,RB
CIRCLE,70,RB
CIRCLE,73,RB
L,69,79
L,71,78
L,72,79
L,74,78

```

```
L,75,79
L,77,78
FLST,2,2,4,ORDE,2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,81
FITEM,2,93
LINL,P51X                   ! INTERSETAR LINHAS
LARC,80,76,82,RB
FLST,2,2,4,ORDE,2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,81
FITEM,2,94
LINL,P51X                   ! INTERSETAR LINHAS
FLST,2,2,4,ORDE,2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,85
FITEM,2,95
LINL,P51X                   ! INTERSETAR LINHAS
FLST,2,2,4,ORDE,2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,88
FITEM,2,96
LINL,P51X                   ! INTERSETAR LINHAS
FLST,2,2,4,ORDE,2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,89
FITEM,2,97
LINL,P51X                   ! INTERSETAR LINHAS
FLST,2,2,4,ORDE,2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM,2,92
FITEM,2,98
LINL,P51X                   ! INTERSETAR LINHAS
LARC,80,92,82,RB
LARC,69,76,82,RB
LARC,85,71,70,RB
LARC,87,72,70,RB
LARC,89,74,73,RB
LARC,75,91,73,RB
KL,25,1-(N/2)/0.0865,94
KL,25,1-((N/2)+O)/0.0865,95
KL,25,1-((3*N/2)+O)/0.0865,96
KL,25,1-((3*N/2)+(2*O))/0.0865,97
KL,25,1-((5*N/2)+(2*O))/0.0865,98
KL,25,1-((5*N/2)+(3*O))/0.0865,99
L,92,94
L,69,95
L,71,96
L,72,97
L,74,98
L,75,99
LARC,94,95,30,R4
LARC,96,97,30,R4
LARC,98,99,30,R4
LARC,92,69,82,RB
LARC,71,72,70,RB
LARC,74,75,73,RB
LPLOT,ALL                   ! PLOTAR TODAS AS LINHAS CRIADAS
!***** DEFINIR AS AREAS *****
A,8,9,10,11                 ! CRIAR UMA AREA
A,7,8,11,12
AL,3,13,9,14
A,2,3,4,7,8,9,10,11,12,15,16,17,19,18
```

---

```
A, 21, 22, 23, 51
A, 20, 51, 23, 24, 26, 27, 29
A, 21, 22, 31, 49, 54, 1
AL, 53, 54, 51, 74, 50
AL, 74, 67, 75, 60
AL, 75, 68, 76, 61
AL, 76, 69, 77, 62
AL, 77, 70, 78, 63
AL, 78, 71, 79, 64
AL, 79, 72, 80, 65
AL, 80, 73, 48, 66
AL, 30, 32, 29, 34, 27, 26, 20, 21
AL, 28, 31, 29, 34
A, 52, 53, 17, 16, 15, 4, 3, 2
FLST, 2, 29, 4, ORDE, 12          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM, 2, 22
FITEM, 2, -25
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
FITEM, 2, 30
FITEM, 2, -32
FITEM, 2, 35
FITEM, 2, 37
FITEM, 2, -47
FITEM, 2, 50
FITEM, 2, 67
FITEM, 2, -73
AL, P51X                          ! CRIAR UMA AREA
A, 48, 52, 53, 38, 37
AL, 103, 85, 84, 83, 82, 81
AL, 104, 89, 87, 86, 88
AL, 105, 93, 91, 90, 92
AL, 103, 95, 100, 94
AL, 104, 97, 101, 96
AL, 105, 99, 102, 98
AOVLAP, 6, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 19  ! SOBREPOR AREAS
NUMCMP, ALL                        ! COMPRIMIR A ENUMERAÇÃO DOS PONTOS, LINHAS E AREAS
KL, 8, (I/(2*.017145)), 94
KL, 4, (I/(2*.017145)), 95
KL, 7, (I/(2*.017145)), 96
KL, 5, (I/(2*.017145)), 97
L, 94, 95
L, 96, 94
L, 96, 97
L, 97, 95
A, 94, 95, 97, 96
AOVLAP, 1, 2, 4, 27              ! SOBREPOR AREAS
FLST, 2, 2, 5, ORDE, 2          ! SELECIONAR AREAS
FITEM, 2, 29
FITEM, 2, -30
AADD, P51X                       ! JUNTAR AREAS
FLST, 2, 2, 4, ORDE, 2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM, 2, 116
FITEM, 2, 118
LCOMB, P51X, , 0                 ! JUNTAR LINHAS
FLST, 2, 2, 4, ORDE, 2          ! SELECIONAR LINHAS
FITEM, 2, 115
```

---

---

```
FITEM,2,117
LCOMB,P51X, ,0          ! JUNTAR LINHAS
NUMCMP,ALL              ! COMPRIMIR A ENUMERAÇÃO DOS PONTOS, LINHAS E AREAS
ASEL,S,AREA, ,1        ! SELECIONAR AREAS
AATT,3                  ! ATRIBUIR O MATERIAL
ASEL,S,AREA, ,2
AATT,3
ASEL,S,AREA, ,3
AATT,5
ASEL,S,AREA, ,4
AATT,5
ASEL,S,AREA, ,5
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,6
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,7
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,8
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,9
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,10
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,11
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,12
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,13
AATT,3
ASEL,S,AREA, ,14
AATT,6
ASEL,S,AREA, ,15
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,16
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,17
AATT,2
ASEL,S,AREA, ,18
AATT,2
ASEL,S,AREA, ,19
AATT,2
ASEL,S,AREA, ,20
AATT,3
ASEL,S,AREA, ,21
AATT,3
ASEL,S,AREA, ,22
AATT,3
ASEL,S,AREA, ,23
AATT,5
ASEL,S,AREA, ,24
AATT,4
ASEL,S,AREA, ,25
AATT,2
ASEL,S,AREA, ,26
AATT,2
ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
/COLOR,OUTL,BLAC       ! COLOCAR COR ÀS LINHAS
```

---

```
!***** DEFINIR A MALHA *****
ESHape,2                ! FORMATAR O ELEMENTO - QUADRADO
LESize,9,,4            ! DIVIDIR A LINHA PARA A MALHA
LESize,8,,4
LESize,5,,2
LESize,3,,2
AMESH,2                ! CRIAR MALHA
LESize,111,,8
LESize,104,,4
LESize,110,,8
AMESH,26              ! CRIAR MALHA
LESize,107,,8
LESize,105,,4
LESize,4,,4
LESize,106,,8
AMESH,25              ! CRIAR MALHA
LESize,108,,2
LESize,109,,2
AMESH,1               ! CRIAR MALHA
ESHape,0              ! FORMATAR O ELEMENTO - QUADRILATERO
LESize,11,,4
LESize,13,,24
LESize,12,,24
LESize,7,,2
LESize,1,,2
LESize,6,,1
LESize,2,,1
AMESH,27              ! CRIAR MALHA
LESize,14,,8
LESize,50,,8
LESize,49,,13
LESize,15,,13
AMESH,3               ! CRIAR MALHA
LESize,10,,7
LESize,79,,1
LESize,75,,4
LESize,78,,6
LESize,82,,5
LESize,83,,6
LESize,86,,6
LESize,87,,6
LESize,97,,1
LESize,98,,1
LESize,99,,1
LESize,101,,6
LESize,103,,14
LESize,102,,12
LESize,100,,5
LESize,16,,12
LESize,18,,4
LESize,88,,2
LESize,89,,2
LESize,90,,2
LESize,91,,2
LESize,92,,2
LESize,93,,2
AMESH,23              ! CRIAR MALHA
```

---

```
LESIZE,29,,4
LESIZE,47,,1
LESIZE,20,,1
LESIZE,46,,9
LESIZE,27,,9
AMESH,4           ! CRIAR MALHA
LESIZE,48,,1
LESIZE,45,,4
LESIZE,44,,4
LESIZE,68,,2
AMESH,5           ! CRIAR MALHA
LESIZE,69,,2
LESIZE,61,,6
LESIZE,54,,6
AMESH,6           ! CRIAR MALHA
LESIZE,70,,2
LESIZE,62,,6
LESIZE,55,,6
AMESH,7           ! CRIAR MALHA
LESIZE,71,,2
LESIZE,63,,6
LESIZE,56,,6
AMESH,8           ! CRIAR MALHA
LESIZE,72,,2
LESIZE,57,,6
LESIZE,64,,6
AMESH,9           ! CRIAR MALHA
LESIZE,73,,2
LESIZE,65,,6
LESIZE,58,,6
AMESH,10          ! CRIAR MALHA
LESIZE,74,,2
LESIZE,66,,6
LESIZE,59,,6
AMESH,11          ! CRIAR MALHA
LESIZE,42,,6
LESIZE,67,,6
LESIZE,60,,6
AMESH,12          ! CRIAR MALHA
LESIZE,26,,4
LESIZE,24,,2
LESIZE,23,,6
LESIZE,28,,12
LESIZE,21,,1
AMESH,13          ! CRIAR MALHA
ESHAPE,2
LESIZE,22,,6
LESIZE,25,,12
AMESH,14          ! CRIAR MALHA
ESHAPE,1          ! FORMATAR O ELEMENTO - TRIANGULAR
LESIZE,53,,9
LESIZE,30,,1
LESIZE,43,,1
AMESH,15          ! CRIAR MALHA
LESIZE,51,,1
LESIZE,32,,6
LESIZE,33,,6
```

---

```

LESIZE,52,,1
AMESH,16 ! CRIAR MALHA
ESHape,0 ! FORMATAR O ELEMENTO - QUADRILATEIRO
LESIZE,31,,1
LESIZE,34,,6
LESIZE,35,,6
LESIZE,36,,6
LESIZE,37,,6
LESIZE,38,,6
LESIZE,39,,6
LESIZE,40,,6
LESIZE,41,,6
AMESH,24 ! CRIAR MALHA
LESIZE,94,,1
AMESH,20
LESIZE,95,,1
AMESH,21
LESIZE,96,,1
AMESH,22
AMESH,17
AMESH,18
AMESH,19
!***** COMPLETAR UM POLO *****
FLST,3,12,5,ORDE,6 ! SELECIONAR AREAS
FITEM,3,3
FITEM,3,-4
FITEM,3,13
FITEM,3,-14
FITEM,3,17
FITEM,3,-24
ARSYM,Y,P51X, , , ,0,0 ! GERAR AREAS SIMETRICAS
NUMCMP,ALL ! COMPRIMIR A ENUMERAÇÃO DOS PONTOS, NÓS, LINHAS E AREAS
NUMMRG,NODE ! FUSIONAR NÓS
NUMMRG,ELEM ! FUSIONAR ELEMENTOS
NUMMRG,KP ! FUSIONAR PONTOS
!***** COMPLETAR AS RANHURAS *****
CSYS,1 ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - CILINDRICAS
FLST,3,7,5,ORDE,6 ! SELECIONAR AREAS
FITEM,3,1
FITEM,3,-2
FITEM,3,15
FITEM,3,-16
FITEM,3,25
FITEM,3,-27
AGEN,NR,P51X,,,,AR,,,0, ! COPIAR A RANHURA
!***** COMPLETAR O ROTOR *****
FLST,3,30,5,ORDE,8 ! SELECIONAR AREAS
FITEM,3,3
FITEM,3,5
FITEM,3,-14
FITEM,3,17
FITEM,3,-24
FITEM,3,28
FITEM,3,30
FITEM,3,-39
AGEN,NP,P51X,,,,(21*AR/2),,,,0 ! COPIAR O POLO
FLST,3,3,5,ORDE,3 ! SELECIONAR AREAS

```

```
FITEM,3,4
FITEM,3,20
FITEM,3,29
AGEN,NP,P51X,,,,(PI/4),,,,0      ! COPIAR O NUCLEO DO ROTOR
NUMMRG,NODE                       ! FUSIONAR NÓS
NUMMRG,ELEM                       ! FUSIONAR ELEMENTOS
NUMMRG,KP                         ! FUSIONAR PONTOS
NUMCMP,ALL                        ! RE-ENUMERAR PONTOS, NÓS, LINHAS E AREAS
/NUM,1                             ! ESPECIFICAR PARA PLOTAR COR
/PNUM,MAT,1                       ! PLOTAR DIFERENCIANDO OS MATERIAIS
!***** CARREGAR DADOS PARA POSTERIOR UTILIZAÇÃO *****
*DIM,A_CORR,ARRAY,6,28,0,        ! CRIAR VETORES
*CREATE,ansuitmp
*vREAD,A_CORR(1,1),COR_C_I_N,txt,,28,! LER Y COPIAR UM ARQUIVO A UM ARREGLO
(6F11.0)                          ! FORMATAR A COPIA NO ARREGLO
*END
/INPUT,ansuitmp
*DIM,SERIE,ARRAY,3,56,0          ! CRIAR VETORES
*CREATE,ansuitmp
*vREAD,SERIE(1,1),SERIE_C_N,TXT,,56,! LER Y COPIAR UM ARQUIVO A UM ARREGLO
(3F12.0)                          ! FORMATAR A COPIA NO ARREGLO
*END
/INPUT,ansuitmp
*DIM,CAMPO,ARRAY,2,8,1           ! CRIAR VETORES
*CREATE,ansuitmp
*vREAD,CAMPO(1,1),I_CAMPCOMP,TXT,,8,! LER Y COPIAR UM ARQUIVO A UM ARREGLO
(2F14.0)                          ! FORMATAR A COPIA NO ARREGLO
*END
/INPUT,ansuitmp
*DIM,DAMPER,ARRAY,2,24,0,        ! CRIAR UM ARREGLO
*CREATE,ansuitmp
*vREAD,DAMPER(1,1),CORR_DAMP,txt,,24,! LER Y COPIAR UM ARQUIVO A UM ARREGLO
(2F11.0)                          ! FORMATAR A COPIA NO ARREGLO
*END
/INPUT,ansuitmp
!***** CRIAR ARREGLOS PARA POSTERIOR UTILIZAÇÃO *****
*DIM,L_IND,ARRAY,80,3,0,         ! CRIAR UM ARREGLO
*DIM,SVOLT,ARRAY,100,2,0,
*DIM,CORR,ARRAY,80,4,0,
*DIM,FEM,ARRAY,80,4,0,
*DIM,SUM,ARRAY,80,6,0,
*DIM,ZETA,ARRAY,80,4,0,
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
/INPUT,GIRAR_MC,txt,c:\Exemplo\MaqCompleta\TESTE_B\,,0
FINISH                            ! TERMINAR
```

*% Rotina para fazer girar o rotor da máquina.*

```

! *****
! ***** GIRAR O ROTOR *****
! ***** NO EIXO D OU Q *****
! *****

/PREP7                ! COMANDO PARA O PRÉ-PROCESSAMENTO
CSYS,1                ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - CILINDRICAS
! ***** DEFINIR EIXO DE POSICAO *****
*DO,INPUT,1,1        ! DEFINIR INPUT 1 OU 2
*IF,INPUT,EQ,1,THEN  ! PREGUNTAR O VALOR DO INPUT
  ITER=(231/12)      ! IGUAL 1 - EIXO D
*ELSE                ! ENTÃO
  ITER=168/12       ! IGUAL 2 - EIXO Q
*ENDIF              ! CERRAR PREGUNTA CON VALOR DE "ITER"
! ***** COPIAR AREAS DE SÓ UM POLO DO ROTOR *****
FLST,3,32,5,ORDE,6  ! SELECIONAR AREAS
FITEM,3,3
FITEM,3,-14
FITEM,3,17
FITEM,3,-24
FITEM,3,28
FITEM,3,-39
AGEN,2,P51X,,,,,0   ! COPIAR AREAS
! ***** APAGAR O MAPEAMENTO DAS AREAS COPIADAS *****
FLST,2,32,5,ORDE,6  ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,3
FITEM,2,-14
FITEM,2,17
FITEM,2,-24
FITEM,2,28
FITEM,2,-39
ACLEAR,P51X          ! APAGAR MALHAS
! ***** APAGAR AS AREAS COPIADAS *****
FLST,2,32,5,ORDE,6  ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,3
FITEM,2,-14
FITEM,2,17
FITEM,2,-24
FITEM,2,28
FITEM,2,-39
ADELE,P51X,,1       ! APAGAR AREAS
! ***** APAGAR O MAPEAMENTO DAS OUTRAS AREAS DO ROTOR *****
FLST,2,210,5,ORDE,2 ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,621
FITEM,2,-830
ACLEAR,P51X          ! APAGAR MALHAS
FLST,2,14,5,ORDE,2  ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,831
FITEM,2,-844
ACLEAR,P51X          ! APAGAR MALHAS
! ***** APAGAR AS OUTRAS AREAS DO ROTOR *****
FLST,2,210,5,ORDE,2 ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,621
FITEM,2,-830
ADELE,P51X,,1       ! APAGAR AREAS

```

```
FLST,2,14,5,ORDE,2          ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,831
FITEM,2,-844
ADELE,P51X,,1              ! APAGAR AREAS
!***** COPIAR Y MOVER POLO DO ROTOR *****
FLST,3,32,5,ORDE,2          ! SELECIONAR AREAS
FITEM,3,845
FITEM,3,-876
AGEN,2,P51X, , , ,ITER*AR, , ,0 ! COPIAR O POLO
!***** APAGAR O POLO UBICADO NA POSIÇÃO ORIGINAL *****
FLST,2,32,5,ORDE,2          ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,845
FITEM,2,-876
ACLEAR,P51X                ! APAGAR MALHAS
FLST,2,32,5,ORDE,2          ! SELECIONAR AREAS
FITEM,2,845
FITEM,2,-876
ADELE,P51X,,1              ! APAGAR AREAS
!***** COMPLETAR O ROTOR *****
FLST,3,30,5,ORDE,8          ! SELECIONAR AREAS
FITEM,3,3
FITEM,3,5
FITEM,3,-14
FITEM,3,17
FITEM,3,-24
FITEM,3,28
FITEM,3,30
FITEM,3,-39
AGEN,NP,P51X,,,,(21*AR/2),,,,0 ! COPIAR O POLO
FLST,3,2,5,ORDE,2          ! SELECIONAR AREAS
FITEM,3,4
FITEM,3,29
AGEN,NP,P51X,,,,(PI/4),,,,0 ! COPIAR O NUCLEO DO ROTOR
NUMMRG,NODE                ! FUSIONAR NÓS
NUMMRG,ELEM                ! FUSIONAR ELEMENTOS
NUMMRG,KP                  ! FUSIONAR PONTOS
NUMCMP,ALL                 ! RE-ENUMERAR PONTOS, NÓS, LINHAS E AREAS
/NUM,1                     ! ESPECIFICAR PARA PLOTAR SÓ COR
/PNUM,MAT,1                ! PLOTAR DIFERENCIANDO OS MATERIAIS
FINISH                     ! TERMINAR
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
/prep7                     ! COMANDO PARA O PRÉ-PROCESSAMENTO
*IF,INPUT,EQ,1,THEN        ! PREGUNTAR O VALOR DO INPUT
  /INPUT,DIR_CAMP,COM,txt,c:\Exemplo\MaqCompleta\TESTE_B\,, 0
*ELSE                       ! ENTÃO
  /INPUT,DIR_CAMP_AB,txt,c:\Exemplo\MaqCompleta\TESTE_B\,, 0
*ENDIF                      ! FECHAR PREGUNTA
*ENDDO                      ! FECHAR LAÇO DO
FINISH                      ! TERMINAR
```

*% Rotina para atribuir e modificar características nas áreas do enrolamento de campo.*

```

!*****
!***** MODIFICAR ATRIBUTOS DOS ENROLAMENTOS DE CAMPO *****
!*****
/PREP7                ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
!***** DEFINIR CARACTERISTICAS DOS ENROLAMENTOS *****
R,1,AF,NF,LA,-1,1     ! DEFINIR CARACT.-CORRENTE ENTRANDO (-)
REAL,1                ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 1
R,2,AF,NF,LA,+1,1    ! DEFINIR CARACTERISTICAS-CORRENTE SAINDO (+)
REAL,2                ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 2
CSYS,1                ! DEFINIR SIST. DE COORD.-CILINDRICAS
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICA - 1 *****
*DO,COL,1,8           ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES
ACLEAR,CAMPO(1,COL)  ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,CAMPO(1,COL) ! SELECIONAR AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA Y TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
*IF,INPUT,EQ,1,THEN  ! PREGUNTAR A POSIÇÃO DO EIXO
  AATT,2,1,2          ! STRANDED COIL - ELEMENTO 8 NÓS
*ELSE
  AATT,2,1,8          ! MASSIVE CONDUCTOR - ELEMENTO 8 NÓS
*ENDIF
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
ESHAPE,2              ! FORMATAR O ELEMENTO - QUADRADO
AMESH,CAMPO(1,COL)   ! MALHAR AREA
ASEL,ALL              ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO                ! FECHAR REPETIÇÕES
ESEL,ALL              ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NUMCMP,ELEM           ! RE-ENUMERAR OS ELEMENTOS
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICA - 2 *****
*DO,COL,1,8           ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES
ACLEAR,CAMPO(2,COL)  ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,CAMPO(2,COL) ! SELECIONAR AREA
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA Y TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL,S,_Y1
*IF,INPUT,EQ,1,THEN  ! PREGUNTAR A POSIÇÃO DO EIXO
  AATT,2,2,2          ! STRANDED COIL - ELEMENTO 8 NÓS
*ELSE
  AATT,2,2,8          ! MASSIVE CONDUCTOR - ELEMENTO 8 NÓS
*ENDIF
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
ESHAPE,2              ! FORMATAR O ELEMENTO - QUADRADO
AMESH,CAMPO(2,COL)   ! MALHAR AREA
ASEL,ALL              ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO                ! FECHAR REPETIÇÕES

```

```

ESEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ASEL,ALL               ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
NUMCMP,ALL            ! COMPRIMIR TODA A ENUMERAÇÃO
FINISH                ! TERMINAR
/PREP7                ! COMAMDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
/INPUT,DIR_QCOM,txt,c:\Exemplo\MAQCOMPLETA\TESTE_B\,,0

```

*% Rotina para atribuir e modificar características nas áreas do enrolamento de armadura.*

```

!*****
!***** MODIFICAR ATRIBUTOS DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR *****
!*****
/PREP7                ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
R,3,2*AA,2,LA,-1,1    ! DEFINIR CARACTERISTICAS-CORRENTE ENTRANDO (-)
REAL,3                ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 3
R,4,2*AA,2,LA,+1,1    ! DEFINIR CARACTERISTICAS-CORRENTE SAINDO (+)
REAL,4                ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 4
CSYS,1                ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - CILINDRICAS
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 3 *****
*DO,FILA,1,3,2        ! DEFINIR FASE A - B
*DO,COL,1,ZZ          ! DEFINIR NÚMERO DE REPETIÇÕES
  ACLEAR,A_CORR(FILA,COL) ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,, ,A_CORR(FILA,COL) ! SELECIONAR AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA Y TIPO DE ELEMENTO *****
  CMSEL,S,_Y1
  AATT,2,3,2          ! STRANDED COIL - ELEMENTO 8 NÓS
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1
  AMESH,A_CORR(FILA,COL) ! MALHAR AREA
  ASEL,ALL            ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO                ! FECHAR NUMERO DE REPETIÇÕES
*ENDDO                ! FECHAR FASE
ESEL,ALL              ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NUMCMP,ELEM           ! COMPRIMIR A ENUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS
*DO,COL,1,ZZ          ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES-FASE C
  ACLEAR,A_CORR(5,COL) ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,, ,A_CORR(5,COL) ! SELECIONAR AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y
  CMSEL,S,_Y1
  AATT,6              ! ATRIBUIR MATERIAL
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1
  AMESH,A_CORR(5,COL) ! MALHAR AREA
  ASEL,ALL            ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO                ! FECHAR NUMERO DE REPETIÇÕES
ESEL,ALL              ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS

```

```

NUMCMP,ELEM          ! COMPRIMIR A ENUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 4 *****
*DO,FILA,2,4,2      ! DEFINIR FASE A - B
*DO,COL,1,ZZ        ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES
  ACLEAR,A_CORR(FILA,COL) ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,, , ,A_CORR(FILA,COL) ! SELECIONAR AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y
  !***** MATERIAL, CARACTERISTICA Y TIPO DE ELEMENTO *****
  CMSEL,S,_Y1
  AATT,2,4,2        ! STRANDED COIL - ELEMENTO 8 NÓS
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1
  AMESH,A_CORR(FILA,COL) ! MALHAR AREA
  ASEL,ALL          ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO             ! FECHAR NUMERO DE REPETIÇÕES
*ENDDO             ! FECHAR FASE
ESEL,ALL          ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NUMCMP,ELEM      ! COMPRIMIR A ENUMERAÇÃO DOS ELEMENTOS
*DO,COL,1,ZZ      ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES-FASE C
  ACLEAR,A_CORR(6,COL) ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
  CM,_Y,AREA
  ASEL,, , ,A_CORR(6,COL) ! SELECIONAR AREA
  CM,_Y1,AREA
  CMSEL,S,_Y
  CMSEL,S,_Y1
  AATT,6          ! DEFINIR O MATERIAL
  CMSEL,S,_Y
  CMDELE,_Y
  CMDELE,_Y1
  AMESH,A_CORR(6,COL) ! MALHAR AREA
  ASEL,ALL        ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO           ! FECHAR NUMERO DE REPETIÇÕES
ESEL,ALL        ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL        ! SELECIONAR TODOS OS NODOS
ASEL,ALL        ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
NUMCMP,ALL      ! RE-ENUMERAR PONTOS, NÓS, LINHAS E AREAS
FINISH          ! TERMINAR
/PREP7          ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
/INPUT,DIREC_DAMP,txt,c:\Exemplo\MAQCOMPLETA\TESTE_B\,,0

```

*% Rotina para atribuir e modificar características nas áreas do enrolamento amortecedor.*

```

!*****
!***** MODIFICAR ATRIBUTOS DAS BARRAS NOS POLOS *****
!*****
/PREP7          ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
R,5,RB*RB*PIR,,LA,, ! DEFINIR CARACTERISTICAS-CORRENTE ENTRANDO (-)
REAL,5          ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 5
R,6,RB*RB*PIR,,LA,, ! DEFINIR CARACTERISTICAS-CORRENTE SAINDO (+)
REAL,6          ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 6
CSYS,1          ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - CILINDRICAS

```

```
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 5 *****
*DO, COL, 1, 24          ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES
ACLEAR, DAMPER(1, COL)  ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM, _Y, AREA
ASEL, , , , DAMPER(1, COL) ! SELECIONAR AREA
CM, _Y1, AREA
CMSEL, S, _Y
!***** MATERIAL, CARACTERISTICA Y TIPO DE ELEMENTO *****
CMSEL, S, _Y1
AATT, 2, 5, 7          ! STRANDED
CMSEL, S, _Y
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
ESHAPE, 0              ! DEFINIR ELEMENTOS QUADRADOS
AMESH, DAMPER(1, COL)  ! DIVIDIR A AREA SELECIONADA EM ELEMENTOS
ASEL, ALL              ! SELECIONAR AREAS
*ENDDO                ! FECHAR REPETIÇÕES
ESEL, ALL              ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
NUMCMP, ELEM          ! RE-ENUMERAR OS ELEMENTOS
!***** CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 6 *****
*DO, COL, 1, 24          ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES
ACLEAR, DAMPER(2, COL)  ! APAGAR A MALHA DA AREA DEFINIDA
CM, _Y, AREA
ASEL, , , , DAMPER(2, COL) ! SELECIONAR AREA
CM, _Y1, AREA
CMSEL, S, _Y
CMSEL, S, _Y1
AATT, 2, 6, 7          ! MASSIVE CONDUTOR - ELEMENTO 8 NÓS
CMSEL, S, _Y
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
ESHAPE, 0              ! FORMATAR O ELEMENTO - QUADRANGULAR
AMESH, DAMPER(2, COL)  ! MALHAR AREA
ASEL, ALL              ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO                ! FECHAR REPETIÇÕES
ESEL, ALL              ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL, ALL              ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ASEL, ALL              ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
NUMCMP, ALL           ! RE-ENUMERAR PONTOS, NÓS, LINHAS E AREAS
FINISH                ! TERMINAR
/PREP7                ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
*IF, INPUT, EQ, 1, THEN
  /INPUT, SER_CAMP_COM, txt, c:\Exemplo\MAQCOMPLETA\TESTE_B\, , 0
*ELSE
  /INPUT, SER_CAMP_AB, txt, c:\Exemplo\MAQCOMPLETA\TESTE_B\, , 0
*ENDIF
```

*% Rotina para configurar as bobinas do enrolamento de campo.*

```

!*****
!***** CONEXAO DOS ENROLAMENTOS DE CAMPO *****
!*****
/PREP7                ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
*GET,NOD,NODE,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NÓS
ERNOD1=NOD
*GET,NELEM1,ELEM,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS
!***** CRIAR OS NÓS PARA O CIRCUITO EXTERNO *****
CSYS,0                ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - RECTANGULARES
NOD1=NOD+1
N,NOD1                ! CRIAR UM NÓ NO CENTRO
*REPEAT,16,1          ! REPETIR A SENTENCA ANTERIOR 16 VECES
NSEL,ALL              ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,ALL              ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL              ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*GET,ERNOD2,NODE,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NODOS
!***** CONETAR O MODELO COM O CIRCUITO EXTERNO *****
NODE=NOD
*DO,COL,1,8           ! DEFINIR A COLUNA DO ARREGLO
  *DO,FILA,1,2         ! DEFINIR A FILA DO ARREGLO
    NODE=NODE+1
    FLST,5,1,5
    FITEM,5,CAMPO(FILA,COL)
    ASEL,S,,P51X       ! SELECIONAR AREA
    ESLA,S,1           ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
    NSLE,S,1           ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
    *GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! OBTER O MAIOR NUMERO DE NÓS
    TYPE,3             ! DEFINIR O TIPO DE ELEMENTO (STRANDED COIL)
    R,7,1              ! DEFINIR AS CARACTERISTICAS
    REAL,7             ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 7
    *IF,COL,EQ,8,THEN
      *IF,FILA,EQ,2,THEN
        E,NODE,NOD1,N1 ! CRIAR O ELEMENTO STRANDED COIL
      *ELSE
        E,NODE,NODE+1,N1 ! CRIAR O ELEMENTO STRANDED COIL
      *ENDIF
    *ELSE
      E,NODE,NODE+1,N1 ! CRIAR O ELEMENTO STRANDED COIL
    *ENDIF
    ASEL,ALL           ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
    ESEL,ALL           ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
    NSEL,ALL           ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
  *ENDDO
*ENDDO
*GET,NELEM2,ELEM,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NODOS
!***** ACOPLAR TODOS OS ENROLAMENTOS DO CAMPO EM CORRENTE *****
*GET,CPL,ACTIVE,,CP    ! OBTER NUMERO DE ACOPLAMENTOS
ercpl=cpl
*DO,FILA,1,2           ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
  *DO,COL,1,8         ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
    FLST,5,1,5
    FITEM,5,CAMPO(FILA,COL)
    ASEL,S,,P51X       ! SELECIONAR AREAS

```

```

ESLA,S,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
*IF,FILA,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
!***** ACOPLAR CADA UM DOS ENROLAMENTOS DO CAMPO EM EMF *****
*GET,CPL,ACTIVE,,CP ! OBTER NUMERO DE ACOPLAMENTOS
*DO,FILA,1,2 ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
*DO,COL,1,8 ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
FLST,5,1,5
FITEM,5,CAMPO(FILA,COL)
ASEL,S,,P51X ! SELECIONAR AREAS
ESLA,S,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1 ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
*IF,FILA,EQ,1,THEN
CP,CPL+COL,EMF,ALL ! ACOPLAR EM EMF
*ELSE
CP,CPL+8+COL,EMF,ALL ! ACOPLAR EM EMF
*ENDIF
NSEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO
*ENDDO
*GET,CPL,ACTIVE,,CP ! OBTER NUMERO DE ACOPLAMENTOS
ercp2=cpl
FINISH ! TERMINAR
/PREP7 ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
/INPUT,Ser_DampCom,txt,c:\Exemplo\MAQCOMPLETA\TESTE_B\,, 0

```

*% Rotina para configurar as bobinas do enrolamento amortecedor.*

```

!*****
!***** CONEXAO DAS BARRAS DOS POLOS *****
!*****
/PREP7 ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
*GET,NOD,NODE,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NODOS
ERNOD3=NOD
*GET,NELEM3,ELEM,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NODOS
CSYS,0 ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - RETANGULARES
COL1= 1
COL2= 6

```

```

!***** CRIAR OS NÓS PARA O CIRCUITO EXTERNO *****
NOD1= NOD+1
N,NOD1 ! CRIAR UM NODO NO CENTRO
*REPEAT,2,1 ! REPETIR A SENTENCA ANTERIOR 8 VECES
NSEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*GET,ERNOD4,NODE,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NODOS
!***** CONETAR O MODELO COM O CIRCUITO EXTERNO *****
*DO,REP,1,4 ! DEFINIR NUMERO DE REPETIÇÕES
*DO,FILA,1,2 ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
*DO,COL,COL1,COL2 ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
FLST,5,1,5
FITEM,5,DAMPER(FILA,COL)
ASEL,S,,P51X ! SELECIONAR AREA
ESLA,S,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1 ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! OBTER O MENOR NUMERO DE NÓS
TYPE,6 ! DEFINIR O TIPO DE ELEMENTO (MASSIVE CONDUTOR)
*IF,INPUT,EQ,1,THEN
R,8,1 ! DEFINIR AS CARACTERISTICAS
REAL,8 ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISICAS
*ELSE
R,7,1 ! DEFINIR AS CARACTERISTICAS
REAL,7 ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISICAS
*ENDIF
E,NOD1,NOD1+1,N1 ! CRIAR O ELEMENTO (MASSIVE CONDUTOR)
ASEL,ALL ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
ESEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*ENDDO
*IF,FILA,EQ,2,THEN
COL1=COL1+6
COL2=COL2+6
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO
*GET,NELEM4,ELEM,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NODOS
!***** ACOPLAR CADA UMA DAS BARRAS NO POLO *****
*GET,CPLE,ACTIVE,,CP ! OBTER NUMERO DE ACOPLAMENTOS
ercp3=cple
*DO,FILA,1,2 ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
*DO,COL,1,24 ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
FLST,5,1,5
FITEM,5,DAMPER(FILA,COL)
ASEL,S,,P51X ! SELECIONAR AREAS
ESLA,S,1 ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1 ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
*IF,FILA,EQ,1,THEN
CP,CPLE+COL,EMF,ALL ! ACOPLAR EM EMF
CP,CPLE+(24*1)+COL,CURR,ALL ! ACOPLAR EM CORRENTE
*ELSE
CP,CPLE+(24*2)+COL,EMF,ALL ! ACOPLAR EM EMF
CP,CPLE+(24*3)+COL,CURR,ALL ! ACOPLAR EM CORRENTE
*ENDIF
NSEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,ALL ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS

```

```

ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
*ENDDO
*ENDDO
*GET,CPLE,ACTIVE,,CP    ! OBTER NUMERO DE ACOPLAMENTOS
ercp4=cple
FINISH                  ! TERMINAR
/PREP7                  ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
/INPUT,Serie_qcom,txt,c:\Exemplo\MAQCOMPLETA\TESTE_B\,,0

```

*% Rotina para configurar as bobinas do enrolamento de armadura.*

```

!*****
!***** CONEXAO DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR *****
!*****
/PREP7                  ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
CSYS,1                 ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - CILINDRICAS
NSEL,S,LOC,X,R2        ! SELECIONAR OS NÓS DE RADIO R2
NSEL,A,LOC,X,0         ! ADICIONAR OS NÓS NO ORIGEM
D,ALL,AZ,0             ! CONDIÇÃO DE CONTORNO AZ=0
NSEL,ALL               ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
!***** CRIAR OS NÓS PARA O CIRCUITO EXTERNO *****
SCIND= 0
*GET,NOD,NODE,,COUNT ! OBTER O NUMERO DE NÓS
CSYS,0                 ! DEFINIR SISTEMA DE COORDENADAS - CILINDRICAS
NOD1=NOD+1
N,NOD1                 ! CRIAR UM NÓ NO CENTRO
*REPEAT,114,1         ! REPETIR A SENTENCA ANTERIOR 114 VECES
NSEL,ALL               ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,ALL               ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL               ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
!***** CONETAR O MODELO COM O CIRCUITO EXTERNO *****
NODE=NOD
*DO,FILA,1,2           ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
  *DO,COL,1,56         ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
    FLST,5,1,5
    FITEM,5,SERIE(FILA,COL)
    ASEL,S,,P51X       ! SELECIONAR AREA
    ESLA,S,1           ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
    NSLE,S,1           ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
    *GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! OBTER O MAIOR NUMERO DE NÓ
    TYPE,3             ! DEFINIR O TIPO DE ELEMENTO (STRANDED COIL)
    *IF,INPUT,EQ,1,THEN
      R,9,1             ! DEFINIR AS CARACTERISTICAS
      REAL,9            ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 7
    *ELSE
      R,8,1             ! DEFINIR AS CARACTERISTICAS
      REAL,8            ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 7
    *ENDIF
    *IF,FILA,EQ,1,THEN
      E,NODE+COL,NODE+(COL+1),N1 ! CRIAR O ELEMENTO STRANDED COIL
    *ELSE
      E,NODE+COL+(ZZ*2),NODE+(COL+1)+(ZZ*2),N1
    *ENDIF
  *DO,COL,1,56
*DO,FILA,1,2
ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS

```

```

ESEL,ALL          ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL          ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*ENDDO
*ENDDO
!***** CONETAR FONTE DE VOLTAGE AO CIRCUITO *****
TYPE,4           ! DEFINIR O TIPO DE ELEMENTO (VOLTAGE INDEP.)
*IF,INPUT,EQ,1,THEN
R,10,254,0       ! DEFINIR AS CARACTERISTICAS
REAL,10          ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 10
*ELSE
R,9,254,0        ! DEFINIR AS CARACTERISTICAS
REAL,9           ! ENUMERAR O CONJUNTO DE CARACTERISTICAS - 10
*ENDIF
E,NOD1,NOD1+112,NOD1+113 ! CRIAR O ELEMENTO DE TENSAO
ESEL,ALL          ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL          ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ASEL,ALL          ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
!***** ACOPLAR TODOS OS ENROLAMENTOS DO ESTATOR EN CORRENTE *****
*GET,CPL,ACTIVE,,CP ! OBTER NUMERO DE ACOPLAMENTOS
*DO,FILA,1,2      ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
*DO,COL,1,56     ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
FLST,5,1,5
FITEM,5,SERIE(FILA,COL)
ASEL,S,,P51X     ! SELECIONAR AREA
ESLA,S,1         ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
*IF,FILA,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
!***** ACOPLAR CADA UM DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR EM EMF *****
*GET,CPL,ACTIVE,,CP ! OBTER NUMERO DE ACOPLAMENTOS
*DO,FILA,1,2      ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
*DO,COL,1,56     ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
FLST,5,1,5
FITEM,5,SERIE(FILA,COL)
ASEL,S,,P51X     ! SELECIONAR AREA
ESLA,S,1         ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1         ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
*IF,FILA,EQ,1,THEN
CP,CPL+COL,EMF,ALL ! ACOPLAR EM EMF
*ELSE
CP,CPL+(ZZ*2)+COL,EMF,ALL ! ACOPLAR EM EMF
*ENDIF
NSEL,ALL          ! SELECIONAR OS NÓS
ESEL,ALL          ! SELECIONAR OS ELEMENTOS

```

```

ASEL,ALL                ! SELECIONAR AS AREAS
*ENDDO
*ENDDO
D,NOD1+112,VOLT,0      ! ATERRAMENTO
NSEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
ESEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
FINISH                  ! TERMINAR
*GET,NOD,NODE,,COUNT  ! OBTER O NUMERO DE NÓS
NOD1DELE=NOD
*GET,NEL,ELEM,,COUNT  ! OBTER O NUMERO DE ELEMENTOS
NEL1DELE= NEL
/PREP7                  ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
!***** LER OUTRO ARQUIVO *****
/INPUT,VARIA_FREQ,txt,c:\Exemplo\MAQCOMPLETA\TESTE_B\,,0

```

*% Rotina simular em cada frequência o ensaio correspondente e salvar os cálculos num arquivo texto.*

```

!*****
!***** SOLUÇÃO E RESULTADOS *****
!*****
HH=0
/PREP7                  ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
*DO,JJ,1,8  !8
*DO,II,1,9  !9
  /PREP7                ! COMANDO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
  SCIND=0               ! INICIALIZAR AS VARIÁVEIS
  SCRES=0
  CIND=0
  CRES=0
  !***** DEFINIR FREQUENCIAS *****
  /SOLU                  ! COMANDO PARA O PROCESSAMENTO
  ANTYPE,HARMIC
  *IF,JJ,EQ,1,THEN
    HARFRQ,(II)*1E-3    ! DEFINIR A FREQUENCIA
  *ELSE
  *IF,JJ,EQ,2,THEN
    HARFRQ,(II)*1E-2    ! DEFINIR A FREQUENCIA
  *ELSE
  *IF,JJ,EQ,3,THEN
    HARFRQ,(II)*1E-1    ! DEFINIR A FREQUENCIA
  *ELSE
  *IF,JJ,EQ,4,THEN
    HARFRQ,(II)*1E0     ! DEFINIR A FREQUENCIA
  *ELSE
  *IF,JJ,EQ,5,THEN
    HARFRQ,(II)*1E+1    ! DEFINIR A FREQUENCIA
  *ELSE
  *IF,JJ,EQ,6,THEN
    HARFRQ,(II)*1E+2    ! DEFINIR A FREQUENCIA
  *ELSE
  *IF,JJ,EQ,7,THEN
    HARFRQ,(II)*1E+3    ! DEFINIR A FREQUENCIA

```

```

      *ELSE
      HARFRQ, (1) *1E-30          ! DEFINIR A FREQUENCIA
    *ENDIF
  *ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
!***** ENCONTRAR A SOLUÇÃO *****
SOLVE                          ! SOLUÇÃO
FINISH                          ! TERMINAR
!***** RESULTADOS NO ESTATOR *****
/POST1                          ! COMANDO PARA O POST-PROCESSAMENTO
ETABLE, RES, NMISC, 8          ! RESISTENCIA
ETABLE, IND, NMISC, 9          ! INDUTANCIA
*DO, FILA, 1, 2                ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
  *DO, COL, 1, 56              ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
  FLST, 5, 1, 5
  FITEM, 5, SERIE(FILA, COL)
  ASEL, S, , , P51X            ! SELECIONAR AREA
  ESLA, S, 1                    ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
  SSUM                          ! CALCULAR A SUMA DA TABELA
  *GET, CIND, SSUM, , ITEM, IND ! OBTER A INDUTÂNCIA DOS ELEMENTOS
  *GET, CRES, SSUM, , ITEM, RES ! OBTER A RESISTENCIA DOS ELEMENTOS
  SCIND=SCIND+CIND             ! ACUMULAR AS INDUTÂNCIAS OBTIDAS
  SCRES=SCRES+CRES             ! ACUMULAR AS RESISTENCIAS OBTIDAS
  ESEL, ALL                     ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
  ASEL, ALL                     ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
  NSEL, ALL                     ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*ENDDO
*ENDDO
KK= KK+1
ZETA(KK, 1)=SCIND              ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
ZETA(KK, 2)=SCRES              ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
!***** RESULTADOS NO ROTOR *****
*IF, INPUT, EQ, 1, THEN
  SCIND=0
  CIND=0
  SCRES=0
  CRES=0
  *DO, FILA, 1, 2                ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
  *DO, COL, 1, 8                ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
  FLST, 5, 1, 5
  FITEM, 5, CAMPO(FILA, COL)
  ASEL, S, , , P51X            ! SELECIONAR UMA AREA
  ESLA, S, 1                    ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
  SSUM                          ! CALCULAR A SUMA DA TABELA
  *GET, CIND, SSUM, , ITEM, IND ! OBTER A INDUTÂNCIA DOS ELEMENTOS
  *GET, CRES, SSUM, , ITEM, RES ! OBTER A RESISTENCIA DOS ELEMENTOS
  SCIND=SCIND+CIND             ! ACUMULAR AS INDUTÂNCIAS OBTIDAS
  SCRES=SCRES+CRES             ! ACUMULAR AS RESISTENCIAS OBTIDAS
  ESEL, ALL                     ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
  ASEL, ALL                     ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
  NSEL, ALL                     ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*ENDDO
*ENDDO

```

```

ZETA(KK,3)=SCIND          ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
ZETA(KK,4)=SCRES         ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
*ENDIF
*CFOPEN,ZETA,txt         ! CRIAR UM ARQUIVO TXT
!***** ESCRIVIR UM ARREGLO NUM ARQUIVO TXT *****
*VWRITE,ZETA(1,1),ZETA(1,2),ZETA(1,3),ZETA(1,4)
(1X,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12)
*CFCLOS
/INPUT,ansuitmp
!***** RESULTADOS PARTE IMAGINARIA *****
/POST1                   ! COMANDO PARA O POST-PROCESSAMENTO
SET,1,1,,1              ! ESCOLHER RESPOSTA PARTE IMAGINARIA
EMFEST_I=0
*DO,FILA,1,2            ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
*DO,COL,1,56           ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
ASEL,S,,SERIE(FILA,COL) ! SELECIONAR AREA
ESLA,S,1                ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1                ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,NNODEST,NODE,,NUM,MAX ! OBTER O NUMERO DO MAIOR NÓ
ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
ESEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*GET,EMFEST_1,NODE,NNODEST,EMF, ! OBTER VALOR DA EMF NO ESTATOR
EMFEST_I=EMFEST_I+EMFEST_1
*ENDDO
*ENDDO
*IF,INPUT,EQ,1,THEN
ASEL,S,,CAMPO(1,1)     ! SELECIONAR AREA
ESLA,S,1                ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1                ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,NNODROT,NODE,,NUM,MAX ! OBTER O MENOR NUMERO DE NODO ENTRE OS SELECIONADOS
ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
ESEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*ENDIF
ASEL,S,,DAMPER(1,1)    ! SELECIONAR AREA
ESLA,S,1                ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1                ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS
*GET,NNODAMP,NODE,,NUM,MAX ! OBTER O NUMERO DO MAIOR NÓ
ASEL,ALL                ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
ESEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL,ALL                ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*GET,COREST_I,NODE,NNODEST,CURR, ! OBTER VALOR DA CORRENTE NO ESTATOR
*GET,CORDAM_I,NODE,NNODAMP,CURR, ! OBTER VALOR DA CORRENTE NAS BARRAS
*IF,INPUT,EQ,1,THEN
*GET,EMFROT_I,NODE,NNODROT,EMF, ! OBTER VALOR DA EMF NO ROTOR
*GET,CORROT_I,NODE,NNODROT,CURR, ! OBTER VALOR DA CORRENTE NO ROTOR
*ENDIF
!***** RESULTADOS PARTE REAL *****
/POST1                   ! COMANDO PARA O POST-PROCESSAMENTO
SET,1,1,,0              ! ESCOLHER RESPOSTA PARTE REAL
EMFEST_R=0
*DO,FILA,1,2            ! DEFINIR FILA DO ARREGLO
*DO,COL,1,56           ! DEFINIR COLUNA DO ARREGLO
ASEL,S,,SERIE(FILA,COL) ! SELECIONAR AREA
ESLA,S,1                ! SELECIONAR OS ELEMENTOS DA AREA
NSLE,S,1                ! SELECIONAR OS NÓS DOS ELEMENTOS

```

```

*GET, NNODEST, NODE, , NUM, MAX      ! OBTER O NUMERO DO MAIOR NÓ
ASEL, ALL                            ! SELECIONAR TODAS AS AREAS
ESEL, ALL                            ! SELECIONAR TODOS OS ELEMENTOS
NSEL, ALL                            ! SELECIONAR TODOS OS NÓS
*GET, EMFEST_2, NODE, NNODEST, EMF, ! OBTER VALOR DA EMF NO ESTATOR
EMFEST_R=EMFEST_R+EMFEST_2
*ENDDO
*ENDDO
*GET, COREST_R, NODE, NNODEST, CURR, ! OBTER VALOR DA CORRENTE NO ESTATOR
*GET, CORDAM_R, NODE, NNODAMP, CURR, ! OBTER VALOR DA CORRENTE NAS BARRAS
*IF, INPUT, EQ, 1, THEN
  *GET, EMFROT_R, NODE, NNODROT, EMF, ! OBTER VALOR DA EMF NO ROTOR
  *GET, CORROT_R, NODE, NNODROT, CURR, ! OBTER VALOR DA CORRENTE NO ROTOR
*ENDIF
CORR(KK, 1)= COREST_R                ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
CORR(KK, 3)= COREST_I                ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
*IF, INPUT, EQ, 1, THEN
  CORR(KK, 2)= CORROT_R              ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
  CORR(KK, 4)= CORROT_I              ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
*ELSE
  CORR(KK, 2)= CORDAM_R              ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
  CORR(KK, 4)= CORDAM_I              ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
*ENDIF
FEM(KK, 1)= EMFEST_R                 ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
FEM(KK, 3)= EMFEST_I                 ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
*IF, INPUT, EQ, 1, THEN
  FEM(KK, 4)= EMFROT_I               ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
  FEM(KK, 2)= EMFROT_R               ! OS RESULTADOS GUARDAR NUM ARREGLO
*ENDIF
*CFOPEN, COMP_CORR, txt               ! CRIAR UM ARQUIVO TXT
!***** ESCRIVIR UM ARREGLO NUM ARQUIVO TXT *****
*VWRITE, CORR(1, 1), CORR(1, 2), CORR(1, 3), CORR(1, 4)
(1X, ' ', F20.12, ' ', F20.12, ' ', F20.12, ' ', F20.12)
*CFCLOSE
/INPUT, ansuitmp
*CFOPEN, COMP_EMF, txt                ! CRIAR UM ARQUIVO TXT
!***** ESCRIVIR UM ARREGLO NUM ARQUIVO TXT *****
*VWRITE, FEM(1, 1), FEM(1, 2), FEM(1, 3), FEM(1, 4)
(1X, ' ', F20.12, ' ', F20.12, ' ', F20.12, ' ', F20.12)
*CFCLOSE
/INPUT, ansuitmp
!***** APAGAR TODOS OS CALCULOS *****
/POST1                                ! COMANDO PAR O POST-PROCESSAMENTO
RESET                                ! RESETER
*IF, JJ, EQ, 8, THEN
  *EXIT
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO
FINISH

```