

**MODELAGEM E ANÁLISE DE GERADORES  
SÍNCRONOS UTILIZANDO O MÉTODO DE  
RECONSTRUÇÃO DO CAMPO**

**MARCIO LUIZ MAGRI KIMPARA**

**CAMPO GRANDE**

**2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELAGEM E ANÁLISE DE GERADORES  
SÍNCRONOS UTILIZANDO O MÉTODO DE  
RECONSTRUÇÃO DO CAMPO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de  
Mato Grosso do Sul como parte dos requisitos para a obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**MARCIO LUIZ MAGRI KIMPARA**

Campo Grande, Março de 2012.

# MODELAGEM E ANÁLISE DE GERADORES SÍNCRONOS UTILIZANDO O MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DO CAMPO

Marcio Luiz Magri Kimpara

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.



---

João Onofre Pereira Pinto, Dr.  
Orientador



---


Luciana Cambraia Leite, Dra.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



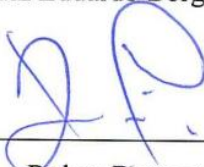
---

João Onofre Pereira Pinto, Dr.  
Presidente



---

Luiz Eduardo Borges da Silva, Dr.



---

Ruben Barros Godoy, Dr.



---

Luigi Galotto Junior, Dr.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida.

Agradeço à minha família, meus pais Luiz e Aparecida, e meus irmãos Éverton e Luciana, pelo apoio, carinho e compreensão pelas horas de convívio que abdiquei por me dedicar a este trabalho.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. João Onofre Pereira Pinto pela valiosa contribuição em minha formação, pela amizade e confiança em mim depositada. Sou imensamente grato pela orientação e esforços dedicados a este trabalho; e também pelas oportunidades dadas a mim, de trabalhar em diversos projetos sob sua orientação ao longo do tempo em que estive no laboratório BATLAB, contribuindo para meu crescimento acadêmico.

Ao professor Dr. Babak Fahimi por me receber e co-orientar em seu laboratório (*REVT – Renewable Energy and Vehicular Technology*) na Universidade do Texas em Dallas (UTD - *University of Texas at Dallas*). O período em que estive lá foi fundamental para compreensão do método utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos pelo companheirismo e apoio.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **MODELAGEM E ANÁLISE DE GERADORES SÍNCRONOS UTILIZANDO O MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DO CAMPO**

**Marcio Luiz Magri Kimpara**

Março/2012

Orientador: João Onofre Pereira Pinto, Phd.

Área de Concentração: Energia Elétrica

Palavras-chave: Geradores síncronos, método de reconstrução do campo, elementos finitos, modelagem.

Número de Páginas: 53

Este trabalho descreve a modelagem de geradores síncronos utilizando o método de reconstrução do campo. Os conceitos do método são apresentados e a metodologia de modelagem é desenvolvida em conformidade com o tipo da máquina síncrona: rotor saliente ou rotor não-saliente. Os modelos obtidos são então utilizados como ferramenta de análise destas máquinas. Especificadamente, a distribuição da densidade de fluxo eletromagnético é determinada para condições arbitrárias de operação e a teoria do tensor de Maxwell aplicada para calcular as forças/torque. Além disso, o conceito do método de reconstrução do campo é utilizado para desenvolver uma formulação de reconstrução do fluxo, na qual o fluxo passando diretamente pelos dentes do estator é utilizado para estimar o fluxo concatenado pelas fases e, por conseguinte, a tensão gerada a vazio. A vantagem em se utilizar a modelagem proposta se deve à rápida e precisa estimativa da distribuição do fluxo magnético no entreferro da máquina. Essa informação da assinatura do fluxo pode então ser utilizada em aplicações como análise de desempenho, otimização na distribuição do fluxo ou monitoramento desta distribuição para fins de diagnóstico. Os resultados de simulação utilizando os modelos obtidos foram comparados com a resposta do método dos

elementos finitos dada pelo software MagNet e demonstram que o modelo de reconstrução de campo proporciona uma solução bastante precisa, com a vantagem de ser muito mais eficiente em termos computacionais.

Abstract of Dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

# **MODELING AND ANALYSIS OF SYNCHRONOUS GENERATORS USING THE FIELD RECONSTRUCTION METHOD**

**Marcio Luiz Magri Kimpara**

March/2012

Advisor: João Onofre Pereira Pinto, Phd.

Area of Concentration: Electric Energy

Keywords: Synchronous generator, field reconstruction method, finite elements, modeling.

Number of Pages: 53

This work describes the synchronous generators modeling using the field reconstruction method. The method concepts are presented and the modeling strategy is developed specifically according each machine type: salient or non-salient poles. The models are then used as a tool of machine analysis. Specifically, the overall air gap flux density distribution was determined for an arbitrary condition and further the Maxwell Stress Tensor was used to perform the forces/torque. Moreover, the concept of field reconstruction method (FRM) was used to develop a flux reconstruction formulation, in which the stator tooth flux was used to estimate the flux linkage and then the voltages under no-load condition. The advantage of the proposed model is due its fast and accurate response for machine air gap flux estimation. Simulation results using the developed models were compared to finite element (FE) solutions given by MagNet software and show that the field reconstruction method provides a very accurate solution with the advantage of high computational efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Família de máquinas síncronas.</i> .....	4
<i>Figura 2.2 – Máquina síncrona de dois pólos.</i> .....	8
<i>Figura 3.1 – Exemplo de discretização do domínio.</i> .....	16
<i>Figura 3.2 – Procedimento de determinação das funções de base para uma máquina síncrona trifásica. (a) Determinação das funções de base do estator. (b) Determinação das funções de base do rotor.</i> .....	20
<i>Figura 4.1 – Modelo da máquina no software MagNet. (a) Máquina síncrona de pólos lisos. (b) Máquina síncrona de pólos salientes.</i> .....	23
<i>Figura 4.2 – Corte transversal da máquina síncrona de pólos lisos.</i> .....	25
<i>Figura 4.3 – Método de reconstrução do campo para a máquina síncrona de pólos lisos.</i> .....	28
<i>Figura 4.4 – Corte transversal da máquina síncrona de pólos salientes.</i> .....	29
<i>Figura 4.5 – Fluxograma para determinação das funções de base para o estator da máquina de pólos salientes.</i> .....	30
<i>Figura 4.6 – Arranjo dos enrolamentos e posição do rotor.</i> .....	32
<i>Figura 4.7 – Fluxograma para determinação das funções de base para o rotor da máquina de pólos salientes.</i> .....	33
<i>Figura 4.8 – Método de reconstrução do campo para a máquina síncrona de pólos salientes.</i> .....	33
<i>Figura 4.9 – Superfície de integração sob cada dente do estator.</i> .....	35
<i>Figura 4.10 – Funções de base do rotor. (a) Pólos salientes. (b) Pólos lisos.</i> .....	38
<i>Figura 4.11 – Funções de base tangencial e normal do estator. (a) Máquina síncrona de pólos lisos. (b) Máquina síncrona de pólos salientes.</i> .....	39



<i>Figura 4.12 – Componente normal do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos lisos.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.13 – Componente tangencial do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos lisos.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.14 – Componente normal do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos salientes.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.15 – Componente tangencial do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos salientes.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.16 – Perfil da densidade de força tangencial na máquina síncrona de pólos lisos.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.17 – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para o torque estabelecido na máquina síncrona de pólos lisos.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.18 – Perfil da densidade de força tangencial na máquina síncrona de pólos salientes.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.19 – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para o torque estabelecido na máquina síncrona de pólos salientes. ..</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.20 – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para a tensão da fase A gerada a vazio pela máquina de pólos lisos... </i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.21 – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para a tensão da fase A gerada a vazio pela máquina de pólos lisos... </i>	<i>47</i>

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introdução .....	1
1.2. Relevância e Motivação .....	2
1.3. Objetivo .....	3
1.4. Organização do Trabalho .....	3
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Introdução .....	5
2.2. Máquinas Síncronas .....	5
2.3. Modelagem da Máquina Síncrona .....	7
2.4. Método de Reconstrução do Campo .....	13
2.5. Considerações Finais .....	13
<b>CAPÍTULO 3 - MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DO CAMPO (<i>FIELD RECONSTRUCTION METHOD</i>)</b> .....	<b>14</b>
3.1. Introdução .....	14
3.2. O Método dos Elementos Finitos .....	14
3.3. Método de Reconstrução do Campo .....	17
3.4. Considerações Finais .....	21
<b>CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DO GERADOR SÍNCRONO VIA MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DO CAMPO</b> .....	<b>22</b>
4.1. Introdução .....	22
4.2. Modelagem da Máquina em Software de Elementos Finitos .....	22
4.3. Determinação das Funções de Base .....	24
4.3.1. Máquina Síncrona de Pólos Lisos .....	24
4.3.2. Máquina Síncrona de Pólos Salientes .....	28
4.4. Determinação da Tensão de Circuito Aberto .....	34
4.5. Resultados Obtidos .....	37
4.6. Considerações Finais .....	47
<b>CAPÍTULO 5 - APLICAÇÕES PARA O MODELO PROPOSTO</b> .....	<b>49</b>
5.1. Introdução .....	49
5.2. Análise de Desempenho .....	49
5.3. Monitoramento e Diagnóstico .....	50
5.4. Otimizações .....	50

5.5. Considerações Finais .....	51
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
6.1. Introdução .....	52
6.2. Trabalhos Futuros .....	52
6.3. Considerações Finais .....	52
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>56</b>

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1. Introdução

Máquinas síncronas são importantes dispositivos de conversão de energia eletromecânica cuja principal aplicação é na geração de energia elétrica. Tradicionalmente o estudo e controle destas e demais máquinas elétricas têm se baseado no chamado modelo de parâmetros concentrados. Embora esses modelos já comprovaram ser eficazes, são apoiados em inúmeras hipóteses, incluindo a de que enrolamentos do estator e do rotor são senoidalmente distribuídos, harmônicos devido às ranhuras do rotor e estator são negligenciados, e que o campo magnético no interior do entreferro é unidirecional (radial). Na realidade, os enrolamentos são raramente senoidalmente distribuídos, harmônicos estão presentes, e as forças agindo dentro da máquina são vetores (ou seja, formadas por uma componente normal e tangencial) [1].

Uma ferramenta alternativa de análise das máquinas elétricas podem ser desenvolvida utilizando-se o campo, ao invés de parâmetros elétricos e energia, se aplicarmos a técnica de análise por elementos finitos [2,3]. Contudo, a complexidade computacional deste método limita sua utilização, até mesmo para o moderno poder de processamento.

Neste contexto, o recentemente proposto, método de reconstrução de campo (MRC), que utiliza soluções via elementos finitos em sua concepção, consiste em “reconstruir” a distribuição do fluxo no entreferro da máquina, em qualquer condição de operação, utilizando funções de base. Isso permite desenvolver um modelo computacionalmente eficiente e capaz de representar a densidade de fluxo e as forças eletromagnéticas com grande precisão quando comparado com a resposta pelo método dos elementos finitos.

Desta forma este método se configura como uma maneira confiável e eficiente de avaliar o desempenho das máquinas elétricas.

Com base nisto, neste trabalho será desenvolvido um modelo para o gerador síncrono utilizando a técnica de reconstrução do campo. Foram considerados ambos os tipos de máquina síncrona: rotor liso e rotor saliente, através da criação de modelos específicos. A validação destes modelos foi realizada por meio de simulação e comparação com a análise por elementos finitos. Conforme demonstram os resultados, os modelos desenvolvidos podem ser aplicados com sucesso na determinação da distribuição da densidade de fluxo e das forças eletromagnéticas agindo no interior do entreferro, bem como na estimação do torque e da forma de onda da tensão gerada.

Os modelos criados representam, em geral, a máquina síncrona, porém o trabalho sugere que a modelagem tem aplicabilidade promissora para os geradores síncronos, pois estas máquinas são utilizadas quase que exclusivamente para este fim, principalmente no Brasil, onde as hidrelétricas (onde estão presentes os geradores síncronos de pólos salientes) ainda detêm o posto de principal fonte de energia elétrica, seguidas pelas termelétricas (onde se encontram os geradores síncronos de pólos lisos).

## **1.2. Relevância e Motivação**

O método de reconstrução do campo é um método ainda recente na literatura e com propensões promissoras. O método ainda não foi estudado no Brasil, o que torna este trabalho pioneiro na abordagem deste método.

Tendo como base a confiabilidade proporcionada pelo consagrado método dos elementos finitos e por constituir um modelo computacionalmente eficiente, o método de reconstrução do campo tem potencial para ser aplicado em diversos problemas práticos, principalmente em problemas de otimização. Neste trabalho a escolha pelas máquinas síncronas de rotor bobinado se deve ao fato de que o modelo desta máquina utilizando o

método de reconstrução do campo ainda é inédito na literatura. Além disso, pretende-se utilizar este modelo como ferramenta de análise dos geradores elétricos, presentes em grande número no setor de geração de energia elétrica. Desta forma, é importante o desenvolvimento de novas metodologias que auxiliem no estudo e operação confiável destas máquinas.

### **1.3. Objetivo**

O objetivo deste trabalho é desenvolver a modelagem de geradores síncronos utilizando a técnica de reconstrução do campo. Através deste modelo, a densidade de fluxo eletromagnético no entreferro da máquina pode ser estimada para qualquer condição de operação com o mesmo grau de precisão do método de elementos finitos, porém com tempo e esforços computacionais muito inferiores. Desta forma, um modelo computacionalmente eficiente e baseado na informação do fluxo eletromagnético, constitui uma poderosa ferramenta para avaliar o desempenho dos geradores e, cria oportunidade para explorar novas metodologias em diferentes aplicações.

### **1.4. Organização do Trabalho**

A dissertação está estruturada em 6 capítulos. No presente capítulo foi descrita a introdução para a contextualização do problema, o objetivo de forma geral, bem como a motivação e relevância para o tema desenvolvido.

No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre as máquinas síncronas, incluindo equacionamento e modelagem. Também é apresentado neste segundo capítulo o estado da arte do método de reconstrução do campo e as vantagens de sua aplicabilidade em problemas práticos.

No capítulo 3 os principais conceitos, equacionamento e restrições do método de reconstrução do campo são discutidos em detalhes. Esta abordagem é feita de modo universal, ou seja, é válida para qualquer máquina elétrica.

No capítulo 4 é desenvolvida a modelagem proposta para as máquinas síncronas. Mais especificadamente, duas máquinas síncronas comerciais serão utilizadas como objeto de estudo. A metodologia de obtenção das funções de base é descrita e os resultados obtidos são comparados com o método dos elementos finitos.

O capítulo 5 traz algumas aplicações possíveis para o modelo proposto. Devido às suas características o modelo desenvolvido fornece vantagens para soluções de problemas e/ou melhorias na operação.

O capítulo 6 por fim, inclui, além das conclusões obtidas com o estudo, trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir deste.

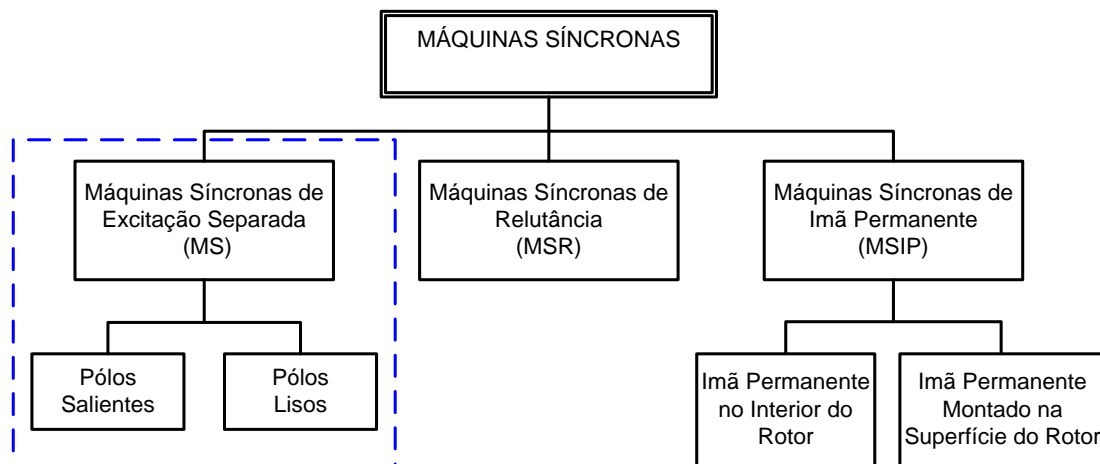
## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

Este capítulo compreende a revisão bibliográfica do conteúdo abordado por este trabalho. O capítulo descreve as máquinas síncronas e algumas de suas características construtivas, bem como a modelagem destas máquinas, com ênfase no modelo d-q. Além disso, é feita uma pequena introdução sobre o estado da arte do método de reconstrução do campo.

### 2.2. Máquinas Síncronas

Máquinas síncronas pertencem à categoria de máquinas rotativas de corrente alternada. Os principais tipos que constituem a família de máquinas síncronas são: máquinas síncronas com excitação separada, máquinas síncronas de relutância e máquinas síncronas de imã permanente [4]. A Figura 2.1 ilustra a classificação das máquinas síncronas e, conforme destacado, este trabalho se limita ao estudo das máquinas síncronas de excitação separada (rotor bobinado), doravante denominada apenas de máquina síncrona.



**Figura 2.1** – Família de máquinas síncronas.



As máquinas síncronas são assim denominadas por funcionarem com velocidade em sincronismo com a frequência da tensão aplicada/gerada. Esta velocidade é constante e conhecida como velocidade síncrona ( $n_s$ ), sendo definida como:

$$n_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (1)$$

onde  $f$  é a frequência e  $P$  é o número de pólos.

Em relação ao aspecto construtivo, as máquinas síncronas, de modo geral, possuem o estator, também conhecido como armadura, formado por chapas laminadas de material ferromagnético justapostas e dotadas de ranhuras axiais onde são alojados os enrolamentos das fases. O enrolamento da armadura pode ser monofásico ou trifásico, sendo ainda possível diferentes arranjos: passo pleno, passo fracionário, conexão em estrela, conexão em delta, camada simples, camada dupla, imbricado, ondulado, dentre outras possibilidades [5].

O rotor também é formado por material ferromagnético laminado de alta permeabilidade e recebe um enrolamento alimentado com corrente contínua. De acordo com o circuito magnético do rotor, as máquinas síncronas são ainda classificadas como salientes ou não salientes (cilíndricas). As máquinas de pólos salientes tem sua aplicação voltada para baixas velocidades, em geral apresentam quatro pólos ou mais e uma relação diâmetro por comprimento axial elevada. Por outro lado, as máquinas síncronas de rotor cilíndrico, ou pólos lisos, são empregadas em altas velocidades, possuem de dois a quatro pólos e apresentam uma relação diâmetro por comprimento axial muito baixa. As máquinas de rotor cilíndrico são caracterizadas por possuir um entreferro constante, enquanto que as de rotor saliente apresentam descontinuidades. Nestas últimas, existem as chamadas regiões interpolares onde o entreferro é muito grande. Assim, máquinas de pólos salientes não podem ser usadas em aplicações com elevadas rotações devido aos problemas mecânicos decorrentes da distribuição desuniforme de massa no rotor, além dos elevados

valores das perdas de atrito com ar dentro da máquina justamente por conta destas regiões interpolares [6].

Independente da forma construtiva, os pólos são alimentados com corrente contínua e criam o campo principal que induz tensão na armadura (modo gerador) ou interage com o campo giratório do estator (modo motor). A alimentação do enrolamento de excitação do rotor pode ser feita por meio de anéis e escovas, no entanto em alguns casos utilizam-se os sistemas de excitação sem escovas, denominados sistemas de excitação *brushless*. Neste caso a excitação é fornecida por meio de excitatrizes auxiliares montadas no eixo da máquina e de dispositivos a base de semicondutores [5].

Na sua maioria, as máquinas síncronas são ainda equipadas com os chamados enrolamentos amortecedores. Trata-se de um conjunto de condutores localizados no rotor e distribuídos em ranhuras na periferia do pólo, ou seja, na extremidade da sapata polar. Estes condutores são curto-circuitados nas extremidades formando uma gaiola similar ao rotor de uma máquina de indução e tem por finalidade criar, durante as variações da velocidade da máquina síncrona ou no arranque, a circulação de corrente elétrica em circuitos fechados e, como consequência, criar um campo magnético adicional no entreferro da máquina [7].

As máquinas síncronas são a escolha primária para setor na geração de energia elétrica. Quando operada em modo gerador, uma corrente contínua é aplicada no enrolamento do rotor para dar origem a um fluxo magnético, que pela natureza da excitação é estático. O rotor é então colocado em movimento por meio de uma máquina primária produzindo um campo magnético girante, o qual, ao concatenar os enrolamentos fixos do estator, induzirá tensões, obedecendo à lei de Faraday [6,8].

Em geral, a máquina síncrona é uma estrutura complexa onde ocorrem os fenômenos físicos responsáveis pela conversão de energia. Por isso, antes de se efetuar a

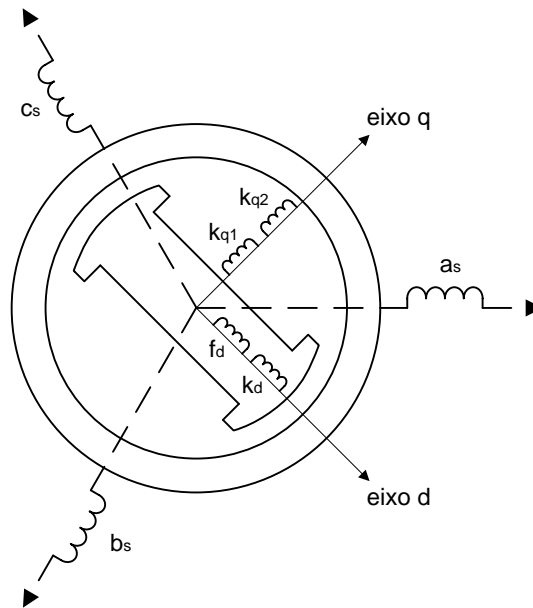
análise do funcionamento da máquina síncrona, é necessário efetuar uma seleção entre os seus muitos e variados aspectos reais e criar um modelo simbólico, onde as suas propriedades elétricas, magnéticas e mecânicas são preservadas e expressas por relações matemáticas [7].

### 2.3. Modelagem da Máquina Síncrona

Uma máquina elétrica, como o a máquina síncrona trifásica, é demasiado complicada para poder ser integralmente modelada; por isso, estabelece-se um conjunto de condições de estudo simplificadoras, tal como desprezar o efeito da saturação. A máquina fica então, representada por um conjunto de equações matemáticas, com os seus parâmetros, formando um sistema de equações fundamentais que traduz, dentro de certos limites, a realidade do sistema [7].

Neste sentido, as diversas partes da máquina elétrica podem ser caracterizadas por parâmetros em função dos quais o comportamento da máquina pode ser estudado. Desta forma os diferentes circuitos elétricos, interligados magneticamente, são representados por parâmetros. Esses parâmetros elétricos são resistências e indutâncias, que devido às simplificações adotadas, são parâmetros concentrados, constantes e lineares.

Sem perda de generalidade, os conceitos a seguir serão referentes à uma máquina síncrona trifásica de dois polos, conforme a Figura 2.2. O circuito do estator é representado por 3 bobinas defasadas de 120 graus mecânicos. Já os circuitos do rotor são representados em dois eixos denominados eixo direto (d) e eixo em quadratura (q). No eixo d está representado o enrolamento de campo e uma componente do enrolamento amortecedor ( $k_d$ ). No eixo q localizam-se outros dois enrolamentos amortecedores ( $k_{q1}$  e  $k_{q2}$ ).



**Figura 2.2** – Máquina síncrona de dois pólos.

As espiras dos enrolamentos do estator da máquina, apresentam uma resistência elétrica que, devido à existência dos circuitos elétricos de diferentes fases, são representadas matricialmente, mesmo estas resistências sendo iguais, ou seja,  $R_a = R_b = R_c$ . Esta matriz de resistências elétricas do estator é uma matriz diagonal. Os circuitos rotóricos apresentam resistências elétricas que por sua vez também são representadas por uma matriz diagonal.

O parâmetro que estabelece a ligação entre as correntes elétricas que percorrem as bobinas do circuito elétrico e o fluxo de indução magnética por elas criado é a indutância. Este parâmetro assume a forma de um coeficiente de auto-indução quando relaciona o fluxo magnético que envolve uma bobina e a corrente elétrica que o cria e que circula nesta mesma bobina, ou assume a forma de coeficiente de indução mútua entre duas bobinas quando relaciona o fluxo magnético totalizado que envolve uma determinada bobina e a corrente elétrica que determina este fluxo ao circular numa outra bobina.

Assumindo-se o sentido da corrente elétrica como sendo positivo quando “sai” dos terminais da máquina (modo gerador), as equações para a tensão elétrica podem ser escritas na forma matricial como nas equações (2) e (3) [7,9]:

$$V_{abc} = -r_s \cdot i_{abcs} + \frac{d\lambda_{abcs}}{dt} \quad (2)$$

$$V_{qdr} = r_r \cdot i_{qdr} + \frac{d\lambda_{qdr}}{dt} \quad (3)$$

onde os índices  $s$  e  $r$  referem-se ao estator e rotor, respectivamente. As matrizes  $r_s$  e  $r_r$  são matrizes diagonais definidas por:

$$r_s = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad r_r = \text{diag}[R_{kq1} \quad R_{kq2} \quad R_{fd} \quad R_{kd}] \quad (4)$$

Já os fluxos concatenados são definidos pela equação (5):

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_{abc} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

em que  $L_{ss}$  e  $L_{rr}$  são matrizes de indutâncias próprias, enquanto que  $L_{sr}$  é a matriz de indutâncias mútuas:

Rotor saliente:

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_A + L_B \cdot \cos(2\theta_r) + l_f & \left(-\frac{L_A}{2}\right) + L_B \cdot \cos(2\theta_r - (2\pi/3)) & \left(-\frac{L_A}{2}\right) + L_B \cdot \cos(2\theta_r + (2\pi/3)) \\ \left(-\frac{L_A}{2}\right) + L_B \cdot \cos(2\theta_r - (2\pi/3)) & L_A + L_B \cdot \cos(2\theta_r + (2\pi/3)) + l_f & \left(-\frac{L_A}{2}\right) + L_B \cdot \cos(2\theta_r) \\ \left(-\frac{L_A}{2}\right) + L_B \cdot \cos(2\theta_r + (2\pi/3)) & \left(-\frac{L_A}{2}\right) + L_B \cdot \cos(2\theta_r) & L_A + L_B \cdot \cos(2\theta_r - (2\pi/3)) + l_f \end{bmatrix}$$

Rotor cilíndrico:

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_A + l_f & (-L_A/2) & (-L_A/2) \\ (-L_A/2) & L_A + l_f & (-L_A/2) \\ (-L_A/2) & (-L_A/2) & L_A + l_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

Com  $L_A = (N_e^2 / (2 \cdot R_{md} \cdot R_{mq})) (R_{md} + R_{mq})$  e  $L_A = (N_e^2 / (2 \cdot R_{md} \cdot R_{mq})) (R_{md} - R_{mq})$ , sendo  $N_e$  o número efetivo de espiras e  $R_m$  a relutância do circuito magnético.

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{skq1} \cdot \cos(\theta_r) & L_{skq2} \cdot \cos(\theta_r) & L_{sfd} \cdot \text{sen}(\theta_r) & L_{skd} \cdot \text{sen}(\theta_r) \\ L_{skq1} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skq2} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sfd} \cdot \text{sen}\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skd} \cdot \text{sen}\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{skq1} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skq2} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sfd} \cdot \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skd} \cdot \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lkq1} + L_{mkq1} & L_{kq1kq2} & 0 & 0 \\ L_{kq1kq2} & L_{lkq2} + L_{mkq2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lfd} + L_{mfd} & L_{fdkd} \\ 0 & 0 & L_{fdkd} & L_{lkd} + L_{mkd} \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde os índices  $l$  e  $m$  referem-se à indutância de dispersão e indutância de magnetização, respectivamente.

As equações fundamentais (1-7) foram estabelecidas em coordenadas de fase e são relativamente difíceis de serem solucionadas. Desta forma, buscou-se uma transformação entre eixos de referência da qual resultasse um sistema de equações de mais fácil tratamento analítico. Como destacado em [7], para que se mantenha a equivalência entre os dois modelos é necessário que os efeitos magnéticos, produzidos pelas bobinas colocadas segundo os dois referenciais sejam iguais. Para que resulte uma simplificação, o novo referencial deverá ter dois eixos coplanares ortogonais, o que faz anular alguns coeficientes de indução mútua, e deve rodar na mesma velocidade do rotor, para que seja constante o ângulo entre o referencial a que está referido o estator e o referencial rotórico, tornando as indutâncias independentes do ângulo de posição do rotor, e, portanto, do movimento.

Assim, R. H. Park introduziu uma nova abordagem na análise de máquinas elétricas ao propor uma transformação de referencial que, como efeito, substitui as variáveis (fluxo,

tensão, corrente) associadas com o estator para dois enrolamentos fictícios localizados no rotor, mais especificadamente no referencial d-q [9].

A transformada de Park revolucionou a análise de máquinas elétricas e tem como propriedade a eliminação da variação das indutâncias no tempo. A formulação de Park é expressa pela matriz K dada na equação (8).

$$K = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

A transformada de Park é aplicada segundo a equação (9).

$$f_{qd0} = K \cdot f_{abc} \quad (9)$$

onde  $f$  representa variáveis como tensão, corrente, fluxo concatenado que se deseja transformar.

Deste sistema de equações, estabelecidas segundos os dois eixos (d-q) de simetria magnética da máquina, é possível deduzir os circuitos elétricos equivalentes, e obter as expressões para a potência e para o torque eletromagnético da máquina [7].

As equações fundamentais da máquina, segundo o novo referencial, ficam definidas como nas equações (10) e (11) [9]:

$$V_{qd0s}^r = -r_s \cdot i_{qd0s}^r + \omega_r \cdot \lambda_{dqsr}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{qd0s}^r \quad (10)$$

$$V_{qdr}^r = r_r \cdot i_{qdr}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{qdr}^r \quad (11)$$

onde:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s}^r \\ \lambda_{qdr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K \cdot L_{ss} \cdot (K^{-1}) & K \cdot L_{sr} \\ \frac{2}{3} \cdot (L_{sr}')^T \cdot (K^{-1}) & L_{rr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0s}^r \\ i_{qdr}^r \end{bmatrix} \quad (12)$$

em que os índices sobrescritos  $r$  indica o referencial no rotor e o apóstrofe ( $'$ ) indica variáveis do rotor referidas ao estator. As submatrizes de indutâncias ficam definidas da seguinte maneira:

$$K.L_{ss} \cdot (K^{-1}) = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K.L'_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\frac{2}{3} \cdot (L'_{sr})^T \cdot (K^{-1}) = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lkq1} + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L'_{lkq2} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lfd} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L'_{lkd} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (16)$$

As indutâncias de magnetização que aparecem nas matrizes acima são definidas por (17) e (18):

$$L_{mq} = \frac{3}{2} (L_A - L_B) \quad (17)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2} (L_A + L_B) \quad (18)$$

É reconhecido que a maneira clássica de caracterizar o desempenho das máquinas é utilizar o modelo d-q acima descrito. Porém existem alguns fatores que limitam este modelo. Primeiro, o modelo d-q é baseado em valores escalares e, além disso, os resultados deste modelo não fornecem valores localizados de densidade de fluxo ou de força.



Finalmente, como o modelo d-q depende de parâmetros concentrados definidos em ensaios em condições específicas, é notada uma deficiência neste modelo em capturar com precisão o desempenho da máquina sobre uma ampla gama de condições de funcionamento.

#### **2.4. Método de Reconstrução do Campo**

O método de reconstrução do campo (*field reconstruction method*) é um método ainda pouco conhecido, recentemente apresentado em trabalhos como [1,10,11]. O método se aplica na modelagem de máquinas elétricas e se resume em determinar funções de base, que são valores da densidade do fluxo amostrados em condições específicas, e utilizá-las para determinar a densidade de fluxo para outras condições de operação a partir de valores instantâneos das correntes elétricas. A informação detalhada do fluxo é então utilizada para proceder a análise da máquina.

Conforme trabalhos disponíveis na literatura, o modelo da máquina representado por meio das funções de base tem se difundido como uma ferramenta promissora para a solução prática de diversos problemas envolvendo máquinas elétricas. Devido à sua alta eficiência e confiabilidade o método tem sido aplicado com sucesso em problemas como análise de faltas, eliminação de *ripple* de torque, cálculo de vibração eletromagnética e ruído acústico, busca pelo perfil de corrente ótima para excitação de motores de imã permanente, novas estratégias para controle de motores de indução lineares, dentre outras [10-14].

O método será descrito em detalhes no próximo capítulo.

#### **2.5. Considerações Finais**

Este capítulo tratou dos principais temas envolvidos nesta dissertação. Com isso, tem-se a base teórica para melhor compreensão do assunto em questão.

## **CAPÍTULO 3 -**

# **MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DO CAMPO (*FIELD RECONSTRUCTION METHOD*)**

### **3.1. Introdução**

Este capítulo visa fornecer o embasamento teórico sobre o método de reconstrução do campo. Os conceitos básicos, condições de aplicabilidade e as equações que descrevem o método serão apresentadas. Também serão apresentadas as formulações para o conceito do tensor de Maxwell e como é aplicado junto ao método de reconstrução do campo.

Inicialmente o método dos elementos finitos será brevemente discutido por ser a base do método de reconstrução de campo.

### **3.2. O Método dos Elementos Finitos**

A análise quantitativa do fluxo magnético no interior das máquinas elétricas pode ser avaliada por meio de equações analíticas. Em geral, são feitas algumas simplificações e assumidas algumas particularidades, de modo que o problema pode ser modelado matematicamente utilizando equações diferenciais parciais e equações integrais. Entretanto, este cálculo é um procedimento complicado que envolve, por exemplo, geometrias irregulares, tornando impraticável ou até mesmo impossível a obtenção de soluções por meios algébricos. Por esta razão, em problemas desta natureza os métodos analíticos são substituídos por métodos numéricos. Dentre eles, o método de elementos finitos (MEF) é o mais conhecido e aceito para este propósito.

Originalmente, o método dos elementos finitos foi desenvolvido para análise de forças em estruturas complexas nas áreas civil e aeronáutica e a utilização do método era condicionada a supercomputadores. Com o aumento na capacidade de processamento dos

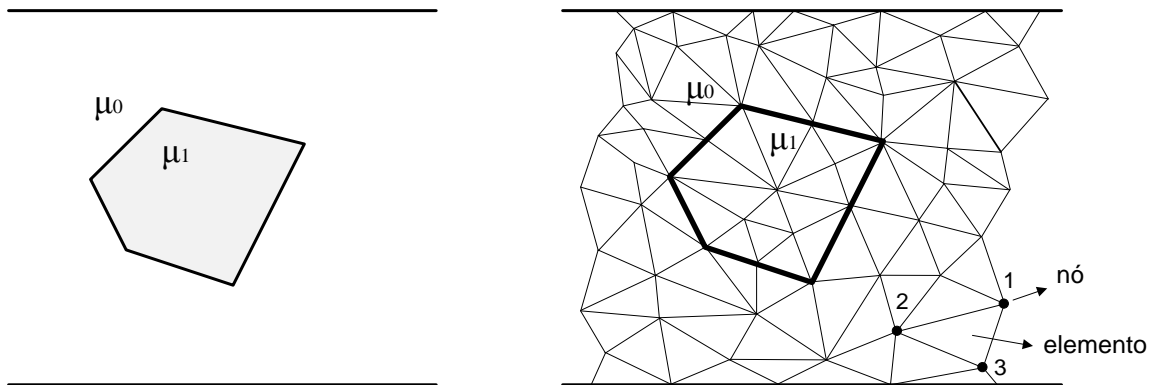
computadores e maior acessibilidade, o método dos elementos finitos é, hoje, uma ferramenta utilizada em várias áreas [8]. Na área do eletromagnetismo, os primeiros trabalhos datam de 1970, com destaque para o artigo “*Finite Elements Solution of Saturable Magnetic Fields Problems*”, publicado por P. P. Silvester e M. V. K. Chari [2].

Em geral, o método dos elementos finitos é uma técnica computacional utilizada para obter soluções aproximadas de problemas de valor de contorno. Problemas deste tipo consistem em determinar a função que satisfaz a uma determinada equação diferencial em todo um dado domínio, conhecendo de antemão os valores que a função e/ou suas derivadas assumem na fronteira deste domínio. A idéia básica do método consiste em discretizar o domínio de estudo em pequenos elementos de tamanhos finitos, resultando numa malha de  $n$  pontos nodais. Cada nó é o ponto de encontro de duas arestas dos elementos, ou seja, é o ponto de ligação entre elementos adjacentes [3].

Para esta subdivisão do domínio, o MEF não requer uma topologia de malha estruturada como no Método das Diferenças Finitas (MDF), isto é, pode-se descrever problemas com geometria 2D usando elementos triangulares ou retangulares com dimensões diferenciadas entre os elementos discretos [3,15]. Com elementos de tamanhos diferentes, é possível que, numa sub-região do domínio onde, a priori, espera-se grandes variações do campo, possa ser utilizada uma maior densidade de elementos. Ao contrário, em zonas de pouco interesse menor quantidade de elementos possa ser utilizada [2]. Além disso, cada elemento só pode conter um tipo de meio, portanto a fronteira entre dois meios será também, obrigatoriamente, a fronteira entre elementos, conforme ilustra a Figura 3.1.

A utilização de elementos com dimensões triangulares é a maneira mais comum de discretizar um domínio 2D. Como na Figura 3.1, os vértices do elemento triangular são numerados para indicar que estes pontos são nós. Um nó é um ponto específico no elemento finito no qual o valor da variável dependente de interesse deve ser calculado. Os

valores computados nos nós são então, utilizados para aproximar os valores em pontos não-nodais, isto é, no interior dos elementos, através da interpolação dos valores obtidos nos nós [3].



**Figura 3.1** – Exemplo de discretização do domínio.

Considerando a variável de interesse como sendo o vetor potencial magnético  $\delta$  e tomando como exemplo o elemento mostrado na Figura 3.1, em qualquer ponto no interior do elemento, o valor de  $\delta$  é obtido, aproximadamente, como na equação (19):

$$\delta(x, y) = N_1(x, y)\delta_1 + N_2(x, y)\delta_2 + N_3(x, y)\delta_3 \quad (19)$$

onde  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , e  $\delta_3$  são valores do potencial calculado nos nós 1, 2 e 3, respectivamente e  $N_1$ ,  $N_2$ , e  $N_3$  são funções de interpolação.

Desta forma, na abordagem por elementos finitos, os valores nodais da variável são tratados como constantes desconhecidas a serem determinadas. Já as funções de interpolação são, geralmente, funções polinomiais das variáveis independentes, derivadas para satisfazer determinadas condições nos nós. Estas funções são pré-determinadas e descrevem a variação da variável de interesse no interior do elemento [3,15].

Foge ao escopo deste trabalho apresentar minuciosamente o método de elementos finitos, dando-se apenas uma visão geral de como proceder a fim de calcular grandezas eletromagnéticas já que o método é uma ferramenta utilizada parcialmente no desenvolvimento do modelo.

### 3.3. Método de Reconstrução do Campo

O método de reconstrução do campo é derivado do método dos elementos finitos. Na realidade, este método utiliza um conjunto mínimo de soluções via elementos finitos para estabelecer funções de base para a densidade de fluxo eletromagnético no entreferro da máquina elétrica. Uma vez definidas, estas funções são utilizadas para “reconstruir” a distribuição do fluxo para condições arbitrárias de excitação e velocidade. Como resultado, o tempo e custo computacional são reduzidos significadamente, enquanto mantém a mesma eficácia nos resultados.

Desta forma, o método de reconstrução do campo se apresenta como uma ferramenta poderosa no estudo de máquinas elétricas, pois fornece a mesma análise baseada no fluxo proporcionada pelos elementos finitos, porém com a vantagem de ser muito mais eficiente em termos computacionais. Utilizando a informação do fluxo eletromagnético, a análise torna-se independente de parâmetros concentrados como indutância e resistência elétrica dos enrolamentos e, além disso, o cálculo do torque é baseado no campo, ao invés da energia.

Basicamente, o método consiste em definir funções de base para o estator e para o rotor. Através destas funções, as contribuições destes componentes para o fluxo total no entreferro são computadas separadamente. A partir daí, admitindo-se a não-saturação, o princípio da superposição pode ser aplicado e a componente normal ( $B_n$ ) e tangencial ( $B_t$ ) da densidade de fluxo total no entreferro pode ser estimada de acordo com as equações (20) e (21):

$$B_n = B_{nS} + B_{nR} \quad (21)$$

$$B_t = B_{tS} + B_{tR} \quad (22)$$

onde  $B_{nS}$ ,  $B_{tS}$  e  $B_{nR}$ ,  $B_{tR}$  são as componentes normal e tangencial da densidade de fluxo devido à excitação do estator e do rotor, respectivamente.

O fluxo eletromagnético criado pelo estator é a soma dos fluxos devido à corrente circulando em cada fase. Portanto, a contribuição do estator nas equações (20) e (21) pode ser calculada por (22) e (23):

$$B_{nS} = \frac{i_a}{i_{base}} \times K_{nA} + \frac{i_b}{i_{base}} \times K_{nB} + \frac{i_c}{i_{base}} \times K_{nC} \quad (22)$$

$$B_{tS} = \frac{i_a}{i_{base}} \times K_{tA} + \frac{i_b}{i_{base}} \times K_{tB} + \frac{i_c}{i_{base}} \times K_{tC} \quad (23)$$

Em que  $K_{nA}$ ,  $K_{nB}$  e  $K_{nC}$  são as funções de base normal do estator, enquanto  $K_{tA}$ ,  $K_{tB}$  e  $K_{tC}$  são as funções de base tangenciais do estator para as fases A, B e C, respectivamente. As correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  nas equações (22) e (23) são correntes trifásicas arbitrárias e a corrente  $i_{base}$  é a corrente aplicada durante a determinação das funções de base.

A contribuição do rotor para o fluxo total estabelecido em (20) e (21) é dada diretamente pela corrente aplicada no enrolamento de campo e pode ser contabilizada como em (24) e (25):

$$B_{nR} = \frac{i_f}{i_{fb}} \times K_{nR} \quad (24)$$

$$B_{tR} = \frac{i_f}{i_{fb}} \times K_{tR} \quad (25)$$

onde  $K_{nR}$  e  $K_{tR}$  são as funções de base do rotor,  $i_f$  é a corrente de campo arbitrária e  $i_{fb}$  é a corrente aplicada na determinação das funções de base.

As funções de base nas equações (23-25) são obtidas a partir da análise por elementos finitos para condições específicas. Para determinar as funções de base do estator, mais especificadamente as funções de base da fase A, aplica-se uma corrente

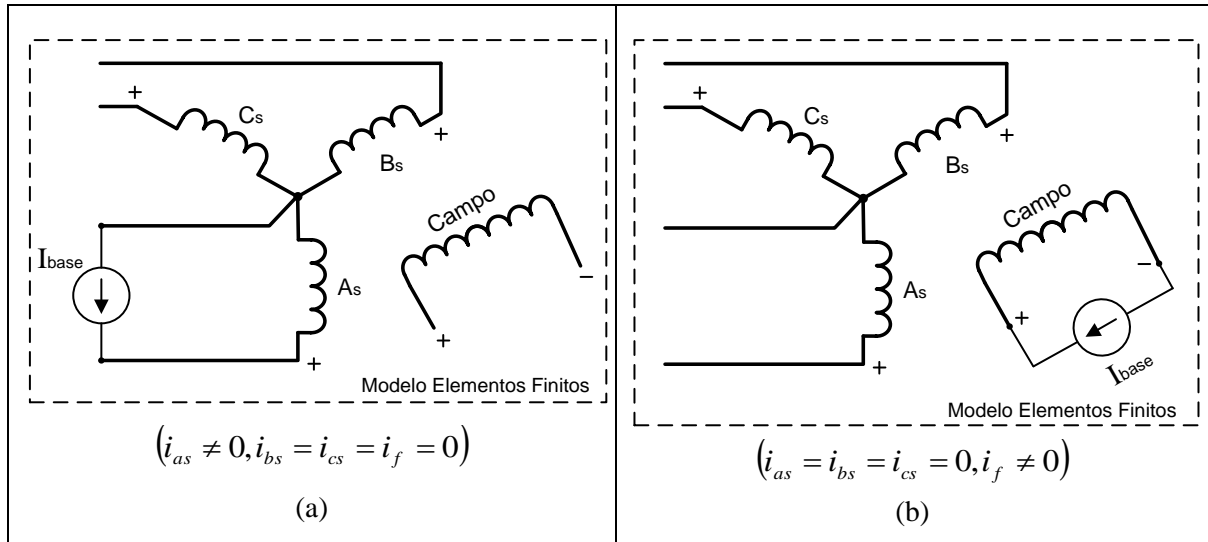
contínua conhecida ( $i_{base}$ ) apenas no enrolamento desta fase. Os demais enrolamentos do estator e o enrolamento de campo devem permanecer em circuito aberto. A solução através do método dos elementos finitos é, então, obtida para esta condição e com o rotor bloqueado. Esta solução é armazenada como funções de base da fase A do estator ( $K_{nA}$ ,  $K_{tA}$ ) e representa a contribuição particular deste enrolamento para a distribuição total do fluxo.

Procedimento semelhante pode ser realizado para obtenção das funções de base dos demais enrolamentos do estator, entretanto uma vez definidas as funções de base para uma das fases, as funções de base das demais podem ser estimadas a partir da primeira em função da simetria e disposição dos enrolamentos no estator. Com isso o número de soluções necessárias via elementos finitos é reduzido. Este passo será melhor explicado no próximo capítulo.

Analogamente, as funções de base do rotor são obtidas a partir do resultado por elementos finitos para o caso em que apenas o enrolamento de campo é excitado, enquanto todos os enrolamentos do estator são mantidos desenergizados.

A Figura 3.2 ilustra o procedimento para a obtenção das funções de base, acima descrito. É importante lembrar que o sentido da corrente aplicada ao enrolamento de fase para determinar as funções de base tem correlação direta com o modo de operação da máquina: motor ou gerador.

Depois de obtidas as funções de base, o modelo por elementos finitos é dispensado e qualquer análise é agora realizada por meio das equações (21-25). Desta forma as funções de base substituem o modelo por elementos finitos.



**Figura 3.2** – Procedimento de determinação das funções de base para uma máquina síncrona trifásica. (a) Determinação das funções de base do estator. (b) Determinação das funções de base do rotor.

Conhecendo-se o campo eletromagnético, o tensor de Maxwell pode ser aplicado para o cálculo das forças eletromagnéticas [16,17]. Segundo [2], este conceito tem sido utilizado com grande frequência pelos modernos sistemas informáticos de determinação de campo por métodos numéricos. Matematicamente, as componentes tangencial e normal da densidade de força eletromagnética podem ser computadas através das equações (26) e (27).

$$f_t = (B_n \cdot B_t) / \mu_0 \quad (26)$$

$$f_n = (B_n^2 - B_t^2) / 2\mu_0 \quad (27)$$

onde  $B_n, B_t$  são as componentes normal e tangencial da densidade de fluxo, respectivamente e  $\mu_0$  é a permeabilidade do ar.

Integrando a densidade de força tangencial ao longo do contorno no entreferro, o torque pode ser estimado através da equação (28).

$$T = \int_{\Gamma} f_t \cdot R \cdot L_z \quad (28)$$



onde  $R$  é o raio do contorno  $\Gamma$  e  $L_z$  é o comprimento axial da máquina.

Na abordagem através do método de reconstrução do campo, além da não-saturação, são assumidas ainda, as seguintes condições:

- As estruturas do estator e do rotor não se deformam devido à ação de forças internas;
- A densidade de fluxo na direção axial (eixo-z) é assumida como sendo zero, ou seja, o efeito das cabeças de bobina é desprezado;
- Histerese e correntes de Foucault são desprezadas.

### 3.4. Considerações Finais

Neste capítulo o método de reconstrução do campo foi discutido em sua forma geral, sendo a análise e equacionamento válidos para qualquer máquina elétrica que se deseje modelar. A ideia básica por detrás do método é obter funções de base que representem a contribuição do estator e do rotor para o fluxo total e para isso, utiliza inicialmente soluções via elementos finitos.

O tensor de Maxwell é uma ferramenta que deve ser utilizada em conjunto com a informação do fluxo fornecida pelo método de reconstrução do campo, para análise do perfil das densidades de força e para estimação do torque.

## **CAPÍTULO 4 -**

# **MODELAGEM DO GERADOR SÍNCRONO VIA MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DO CAMPO**

### **4.1. Introdução**

Neste capítulo, o método de reconstrução do campo será aplicado na modelagem de geradores síncronos. Duas máquinas síncronas comerciais, uma de pólos lisos e outra de pólos salientes, serão utilizadas para validar a técnica. A metodologia de modelagem de cada uma destas máquinas será detalhada separadamente e os resultados de simulação comparados com a resposta obtida através do método dos elementos finitos.

### **4.2. Modelagem da Máquina em Software de Elementos Finitos**

Como mencionado no capítulo 3, as funções de base nada mais são do que soluções através de elementos finitos. Portanto, o primeiro passo para analisar a máquina sob a perspectiva do método de reconstrução de campo é construir o modelo da máquina utilizando um software de elementos finitos. Neste trabalho, tal modelo foi desenvolvido no software comercial MagNet da Infolytica Corporation<sup>®</sup>.

É importante destacar também que as funções de base estão associadas com a geometria e características construtivas da máquina, o que as tornam únicas para cada máquina em particular. Por esta razão, quanto maiores as informações a respeito do *design* da máquina, mais realistas serão as funções de base.

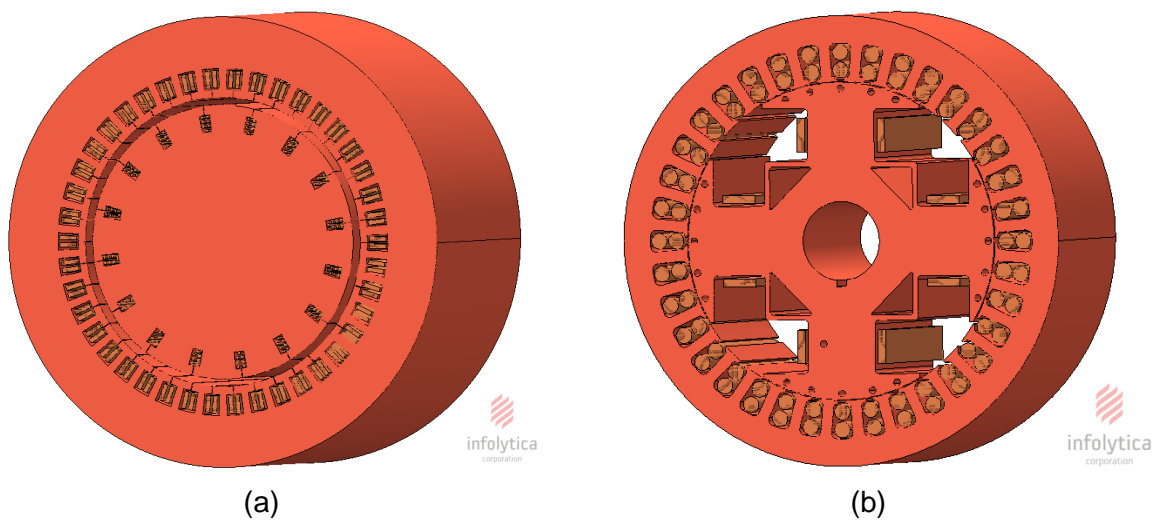
As principais características das máquinas utilizadas neste trabalho estão reunidas na Tabela I. A máquina de pólos lisos é um turbogerador de alta potência e dimensões elevadas enquanto que a máquina de pólos salientes é uma máquina síncrona de baixa potência. No Anexo I é disponibilizado o desenho da máquina síncrona de pólos salientes

onde é possível obter informações sobre a dimensão da máquina. Maiores detalhes do projeto construtivos de ambas as máquinas foram obtidas junto ao fabricante que, por motivo de sigilo industrial, será preservado.

TABELA I  
PARÂMETROS DAS MÁQUINAS

Parâmetro	Pólos Salientes	Pólos Lisos
Potência nominal	15 KVA	675 MVA
Numero de fases	3	3
Numero de pólos	4	2
Numero de <i>slots</i> no estator	36	42
Enrolamento do estator	Camada dupla, passo completo, conexão Y	Camada dupla, passo completo, conexão Y
Material do núcleo	M-19	M-19
Material dos condutores	Cobre	Cobre
Corrente de campo nominal	5,1 A	200 A
Comprimento do entreferro	0,5 mm	20 mm
Comprimento axial da máquina	112 mm	1000 mm

A Figura 4.1 mostra a vista em 3D dos modelos das máquinas desenvolvidos no software MagNet. Apesar dos modelos serem em 3D, os fluxos serão avaliados no domínio 2D, ou seja, apenas as componentes nos eixos x e y serão consideradas, desprezando-se assim, os fenômenos de dispersão que ocorrem em função das cabeças de bobina.



**Figura 4.1** – Modelo da máquina no software MagNet. (a) Máquina síncrona de pólos lisos. (b) Máquina síncrona de pólos salientes.

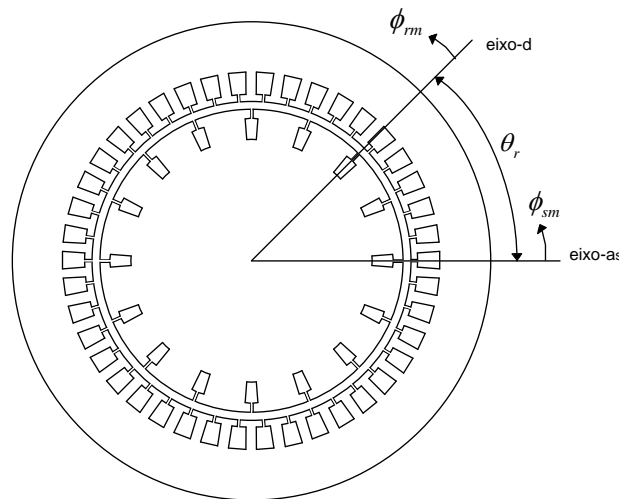
### 4.3. Determinação das Funções de Base

A metodologia para determinação das funções de base está relacionada ao princípio de funcionamento e à geometria da máquina. Assim, em [1] as funções de base são definidas para uma máquina de indução utilizando convolução e resposta ao impulso. Para uma máquina síncrona de ímã permanente é possível utilizar apenas uma única e constante função de base para o rotor (ímã permanente) que, em conjunto com uma única função de base para o estator, permite estimar as demais funções para outras posições do rotor [10]. Por outro lado, em [13] ao se aplicar o método em uma máquina de relutância variável, utilizou várias funções de base em função da geometria variável do entreferro para cada posição do rotor.

Já a metodologia para obtenção das funções de base das máquinas síncronas de rotor bobinado, apesar de apresentar algumas semelhanças com a de outras máquinas, é algo inédito na literatura e será detalhada a seguir.

#### 4.3.1. Máquina Síncrona de Pólos Lisos

A Figura 4.2 ilustra o corte transversal da máquina síncrona de pólos lisos sob estudo. O deslocamento angular ao longo da circunferência do estator é denotado por  $\phi_{sm}$ . Similarmente,  $\phi_{rm}$  representa o deslocamento angular ao longo da circunferência do rotor. A diferença entre os dois ângulos mecânicos definidos acima é o ângulo  $\theta_r$ , que define a posição do rotor. Os ângulos elétricos correspondentes são obtidos multiplicando os ângulos mecânicos pelo número de pares de pólos.



**Figura 4.2** – Corte transversal da máquina síncrona de pólos lisos.

Como primeiro passo na obtenção das funções de base da máquina de pólos lisos aplica-se uma corrente de 1A (CC) no enrolamento da fase A, enquanto os enrolamentos das fases B e C e também do rotor são mantidos desenergizados (circuito aberto). A análise por elementos finitos é então calculada para esta configuração e com o rotor bloqueado na posição  $\theta_r = 0$  (eixo-d alinhado com eixo magnético da fase A). Em seguida o vetor densidade de fluxo é amostrado no entreferro por meio de  $n$  pontos discretos em função de  $\phi_{sm}$ . Esta solução representa a função de base da fase A, designada por  $K_A(\phi_{sm}, \theta_r = 0)$ . A corrente no valor de 1A foi escolhida por conveniência.

Devido à forma cilíndrica do rotor, a geometria do entreferro se mantém constante durante o movimento de rotação do rotor. Aliado a isso, como a alimentação aplicada é constante (corrente contínua) e o enrolamento excitado é fixo (estator), é possível concluir que a função de base será a mesma para qualquer posição do rotor. Portanto, a densidade de fluxo obtida pode ser armazenada de forma geral e independente da posição do rotor decomposta em componentes normal e tangencial, ou seja,  $K_{nA}(\phi_{sm})$  e  $K_{tA}(\phi_{sm})$ .

Procedimento semelhante pode ser utilizado para determinar funções de base relacionadas às outras fases do estator. Entretanto, conhecida as funções de base da fase A,

as funções de base da fase B e C podem ser facilmente deduzidas da primeira em decorrência da disposição destes enrolamentos e da simetria dos circuitos magnéticos do rotor e do estator. Como se trata de uma máquina trifásica, basta deslocar a função da fase A em 120 graus conforme as equações (29 – 32):

$$K_{nB}(\phi_{sm}) = K_{nA}\left(\phi_{sm} - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (29)$$

$$K_{nC}(\phi_{sm}) = K_{nA}\left(\phi_{sm} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (30)$$

$$K_{tB}(\phi_{sm}) = K_{tA}\left(\phi_{sm} - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (31)$$

$$K_{tC}(\phi_{sm}) = K_{tA}\left(\phi_{sm} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (32)$$

onde  $K_{nB}(\phi_{sm})$ ,  $K_{nC}(\phi_{sm})$  e  $K_{tB}(\phi_{sm})$ ,  $K_{tC}(\phi_{sm})$ , são funções de base normais e tangenciais das fases B e C, respectivamente.

O próximo passo é derivar a função de base do rotor. Para este propósito, a corrente de 1A (CC) é agora aplicada ao enrolamento de campo, enquanto que todas as fases do estator permanecem em circuito aberto. A posição inicial do rotor é denotada por  $\theta_r = 0$ .

Como para o caso do estator, o entreferro é discretizado em  $n$  pontos e a resposta para a densidade de fluxo dada pelo software para esta nova configuração é armazenada como funções de base do rotor, obtendo  $K_{nR}(\phi_{sm}, 0)$  e  $K_{tR}(\phi_{sm}, 0)$ .

Novamente, o vetor densidade de fluxo é amostrado em relação a  $\phi_{sm}$ , que tem posições fixas no eixo de referência. Ocorre que quando o rotor gira, os condutores do enrolamento de campo se movem e em consequência as linhas de fluxo serão restabelecidas. Entretanto, como os pontos amostrados continuam fixos no mesmo referencial, os valores amostrados formam uma nova distribuição de fluxo, ou seja, uma

nova função de base. Conclui-se, portanto, que as funções de base dependem da posição do rotor.

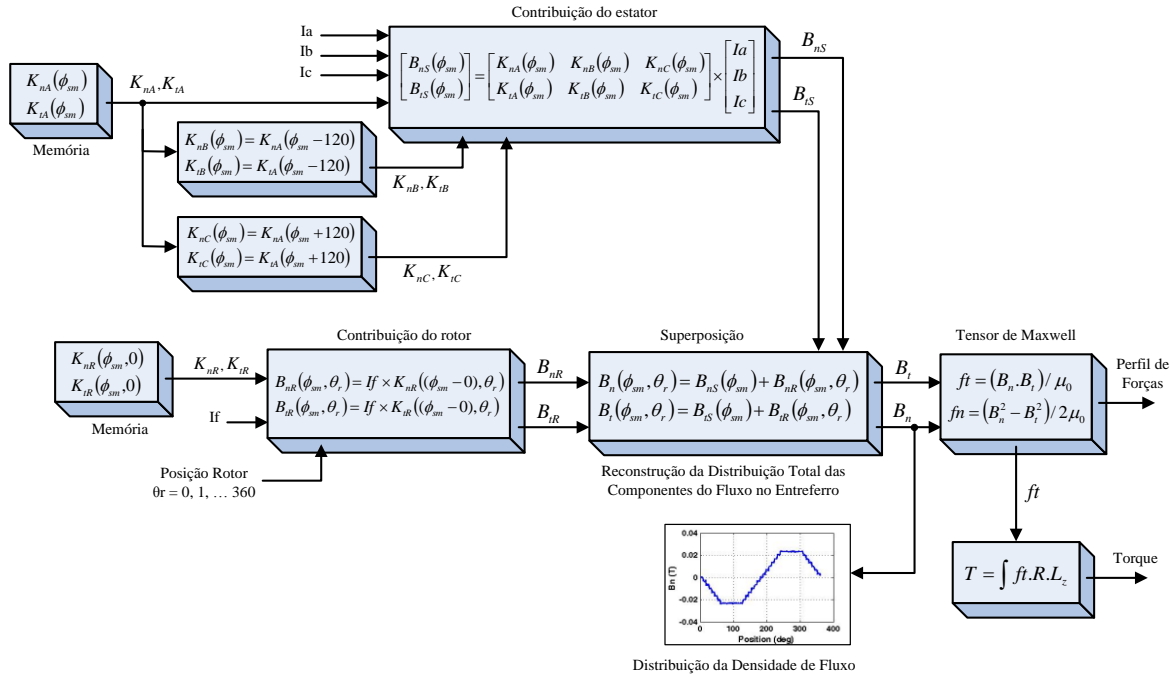
Entretanto, em termos de soluções via elementos finitos, é necessária apenas a solução para a posição inicial, pois o caminho para o fluxo no entreferro é uniforme durante todo o tempo. Com isso, para obter as funções de base para uma determinada posição do rotor, é suficiente fazer um deslocamento nos pontos amostrados da função de base obtida para a posição  $\theta_r = 0$  em um valor igual à diferença entre o ângulo da nova posição e da posição inicial. Equacionando:

$$K_{nR}(\phi_{sm}, \theta_r) = K_{nR}((\phi_{sm} - \theta_r), 0) \quad (33)$$

$$K_{tR}(\phi_{sm}, \theta_r) = K_{tR}((\phi_{sm} - \theta_r), 0) \quad (34)$$

Isto pode ser melhor compreendido se imaginarmos que os pontos amostrados também giram na mesma velocidade do rotor. Desta forma, se um determinado ponto estiver alinhado com o eixo-d, por exemplo, sempre que o rotor se mover e este ponto se mover na mesma velocidade, a magnitude do fluxo naquele ponto será sempre constante. Porém, como o referencial dos pontos amostrados é fixo, é necessário realizar o deslocamento proposto nas equações (33) e (34). O sinal de negativo nestas equações se deve ao movimento no sentido anti-horário.

A Figura 4.3 apresenta o método de reconstrução de campo na forma de diagrama de blocos quando aplicado à máquina síncrona de pólos lisos, resumindo todo o procedimento para utilização do método.



**Figura 4.3** – Método de reconstrução do campo para a máquina síncrona de pólos lisos.

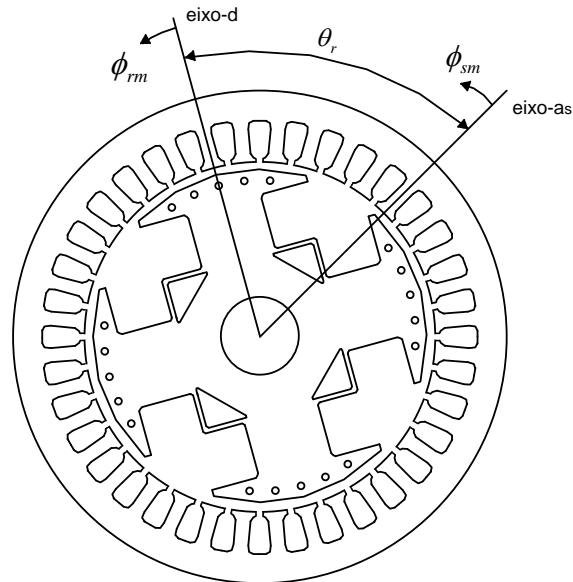
### 4.3.2. Máquina Síncrona de Pólos Salientes

Diferentemente para o caso anterior, considerando uma máquina síncrona de pólos salientes, as funções de base deverão ser definidas para cada posição diferente que o rotor assumir, uma vez que, a saliência dos pólos define uma geometria diferente para o caminho do fluxo em diferentes posições. A Figura 4.4 ilustra o corte transversal do gerador síncrono de pólos saliente em estudo e onde os ângulos  $\phi_{sm}$ ,  $\phi_{rm}$  e  $\theta_r$  foram definidos da mesma maneira como no gerador de pólos lisos.

Considerando a posição inicial para o rotor como  $\theta_r = 0$  (eixo-d alinhado com o eixo magnético da fase A), aplica-se uma corrente de 1A (CC) no enrolamento da fase A. A solução magnetostática dada pelo método de elementos finitos é, então, obtida e o vetor densidade de fluxo é amostrado no meio do entreferro, sendo que cada ponto amostrado tem uma posição definida em relação a  $\phi_{sm}$ . A densidade de fluxo amostrada nas direções



normal e tangencial são as funções de base da fase A, denotadas por  $K_{nA}(\phi_{sm}, 0)$ ,  $K_{tA}(\phi_{sm}, 0)$ .



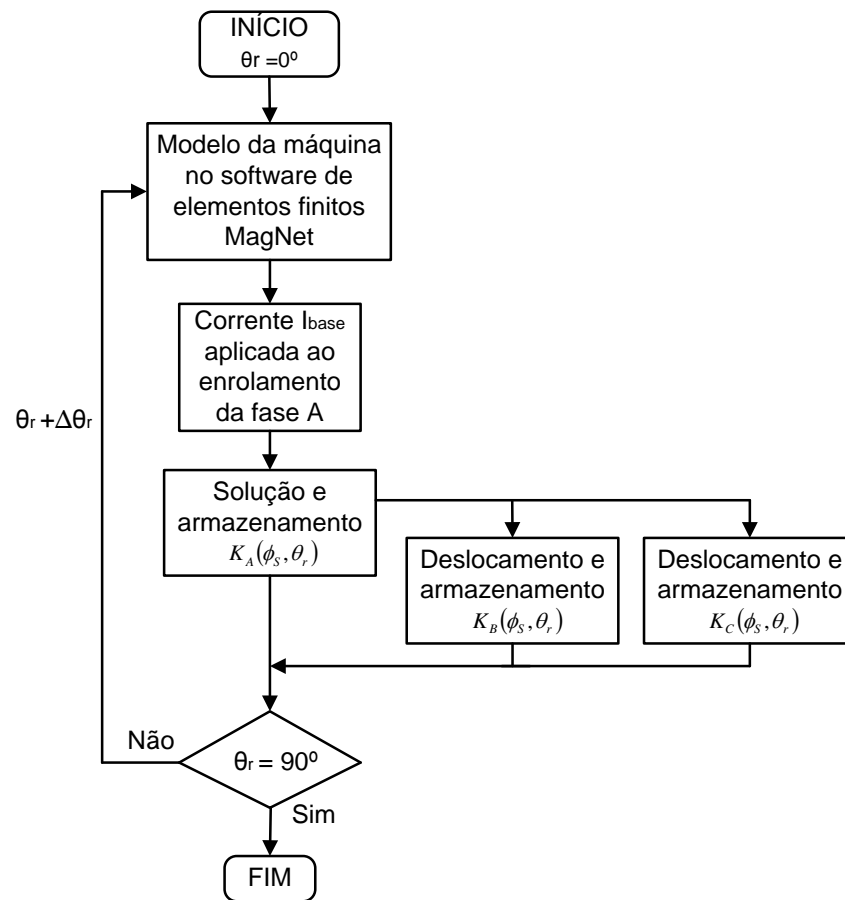
**Figura 4.4** – Corte transversal da máquina síncrona de pólos salientes.

Para uma nova posição, uma geometria diferente é estabelecida no entreferro e conseqüentemente um novo caminho para as linhas de fluxo. Isso significa que as funções de base são dependentes da posição do rotor para este tipo de máquina e, portanto, outra função de base deve ser definida. De modo geral, as funções de base da fase A ficam definidas como  $K_{nA}(\phi_{sm}, \theta_r)$  e  $K_{tA}(\phi_{sm}, \theta_r)$ , onde  $\theta_r$  é a posição mecânica do rotor, desde 0 até 360 graus.

Em termos de soluções utilizando elementos finitos, é necessário um número de soluções para cobrir, pelo menos, um par de pólos. Isso porque, para a máquina de quatro pólos em estudo, quando  $\theta_r = 90^\circ$  a geometria do entreferro será a mesma que em  $\theta_r = 0$ , de onde concluímos que as funções de base neste caso também serão as mesmas.

Definidas as funções de base para a fase A, as funções de base para as fases B e C podem ser obtidas da primeira, evitando executar mais soluções via elementos finitos. A

Figura 4.5 ilustra o fluxograma para determinação das funções de base do estator para a máquina síncrona em estudo.



**Figura 4.5** – Fluxograma para determinação das funções de base para o estator da máquina de pólos salientes.

O deslocamento ilustrado na Figura 4.5 para as funções da fase B e C são referentes a dois fatores: i) um deslocamento na posição do rotor para levar em conta a geometria do entreferro e; ii) um deslocamento nos pontos amostrados devido a disposição dos enrolamentos na periferia do estator. Uma posição particular do rotor produz uma geometria particular no entreferro. Considerando que uma das funções de base da fase A seja adquirida para a posição do rotor mostrada na Figura 4.6(a). Pode-se notar que nesta posição específica, os pólos Norte e Sul criados pela excitação da fase A estão alinhados com o ponto médio da sapata polar. Além disso, observe que a máquina possui 36 ranhuras e, portanto, o espaçamento entre ranhuras adjacentes é de 10 graus mecânicos. Desta

forma, considerando a rotação como sendo anti-horária, quando o rotor se mover 30 graus à frente, a mesma geometria será alcançada sob o ponto de vista da fase C. Em outras palavras o ponto médio da sapata polar se encontrará alinhado com os pólos da fase C, conforme demonstra a Figura 4.6(b). Entretanto, a polaridade dos pólos está invertida. Isto se deve à forma como os enrolamentos das fases estão distribuídos e, portanto, um deslocamento de 120 graus deve ser efetuado nos pontos amostrados. Resumindo, enquanto a posição mostrada na Figura 4.6(b) é considerada  $\theta_r = 30$  para a fase A, enquanto que para a fase C, a mesma é considerada  $\theta_r = 0$ .

As funções de base da fase B podem ser obtidas de modo similar, no entanto, neste caso a geometria do entreferro mostrada na Figura 4.6(a) é a mesma sob o ponto de vista da fase B apenas quando o rotor se mover 60 graus. O deslocamento de 30 e 60 graus se deve ao fato desta máquina possuir 3 *slots* por fase por pólo. Em geral, a idéia pode ser estendida para outras máquinas com diferentes características de acordo com:

$$K_{nB}(\phi_s, \theta_r) = K_{nA}\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}, \theta_r + 2\gamma^\circ\right) \quad (35)$$

$$K_{nC}(\phi_s, \theta_r) = K_{nA}\left(\phi_s + \frac{2\pi}{3}, \theta_r + \gamma^\circ\right) \quad (36)$$

onde:

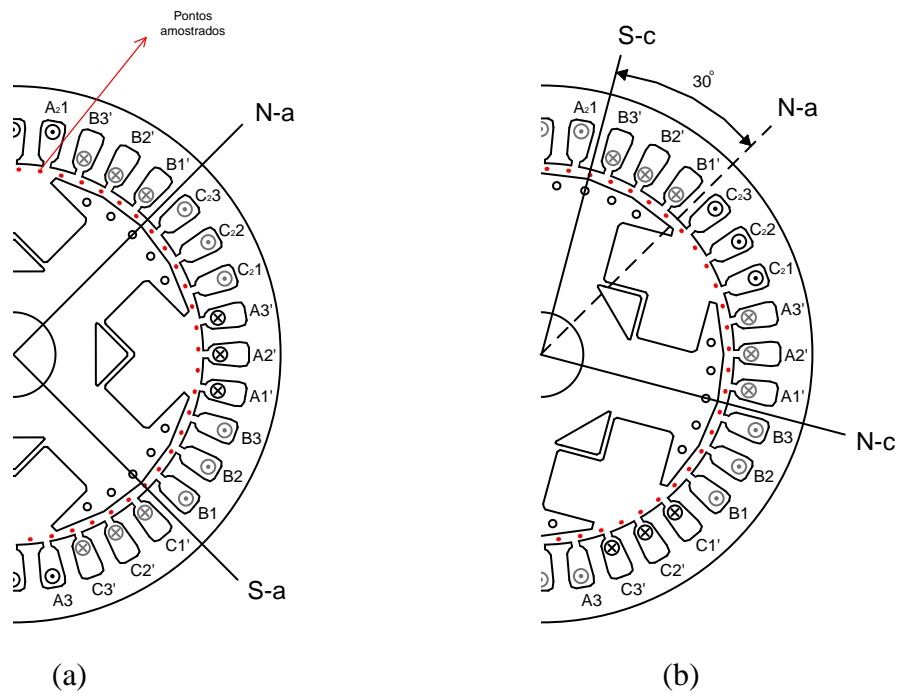
$$\gamma = \frac{s}{P \times q} \times \alpha \quad (\text{ângulo mecânico entre as fases do estator})$$

s = numero de *slots* no estator

P = numero de pólos

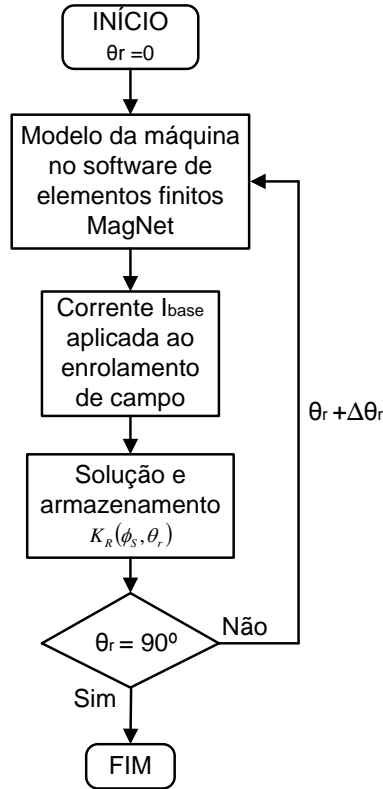
q = numero de fases

$\alpha$  = ângulo mecânico entre *slots* adjacentes



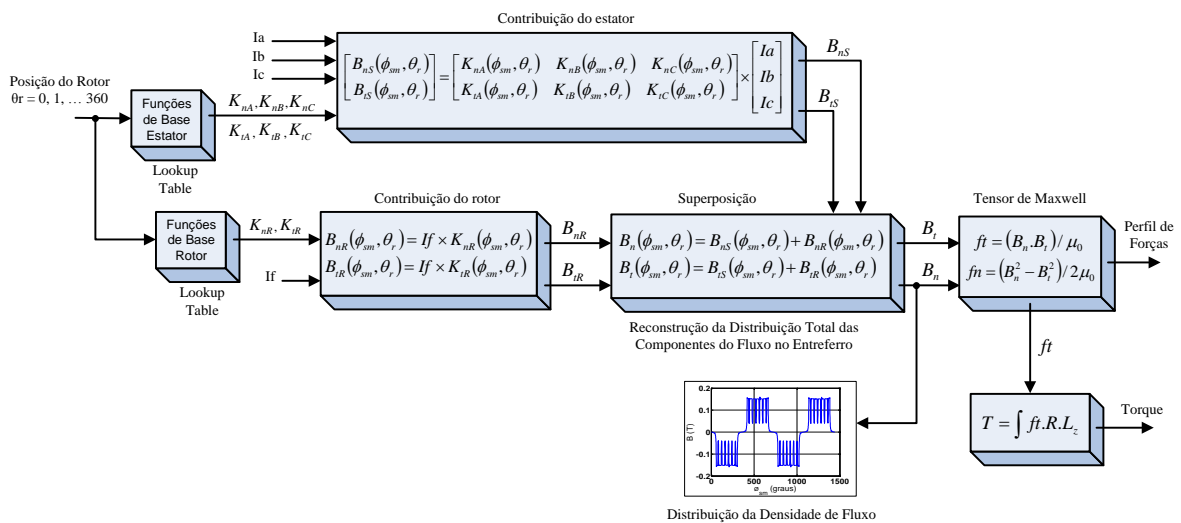
**Figura 4.6** – Arranjo dos enrolamentos e posição do rotor.

As funções de base do rotor são obtidas aplicando 1A no enrolamento de campo enquanto os enrolamentos do estator são mantidos em aberto. Similarmente para o caso das funções de base do estator, soluções via elementos finitos são executadas para cada posição do rotor, no entanto, novamente apenas até cobrir 1 par de pólos. Com a discretização do entreferro, as funções de base são amostradas em relação à  $\phi_{sm}$ , obtendo  $K_{nR}(\phi_{sm}, \theta_r)$  e  $K_{tR}(\phi_{sm}, \theta_r)$ . A Figura 4.7 apresenta o fluxograma para o processo de obtenção das funções de base do rotor.



**Figura 4.7** – Fluxograma para determinação das funções de base para o rotor da máquina de pólos salientes.

Como são definidas funções de base para cada posição do rotor, é conveniente utilizar *lookup tables* como forma de armazenamento. A Figura 4.8 resume o modelo de reconstrução de campo para a máquina de pólos salientes.



**Figura 4.8** – Método de reconstrução do campo para a máquina síncrona de pólos salientes.

Como a análise de desempenho do gerador será para o funcionamento em regime permanente, os enrolamentos amortecedores foram desprezados em ambas as máquinas modeladas. Entretanto, na presença destes enrolamentos é possível conduzir uma investigação similar à feita para máquinas de indução utilizando a função de convolução. De acordo com [1]:

$$B_{nd} = i(t) * K_{nd} \quad (37)$$

$$B_{td} = i(t) * K_{td} \quad (38)$$

Onde “\*” denota a operação de convolução.  $B_{nd}$  e  $B_{td}$  são as componentes da densidade de fluxo devido à corrente  $i(t)$  induzida nos enrolamentos amortecedores e  $K_{nd}$  e  $K_{td}$  são as funções de base obtidas a partir da resposta ao impulso unitário.

#### 4.4. Determinação da Tensão de Circuito Aberto

Como o foco de análise da máquina síncrona é no modo gerador, os conceitos do método de reconstrução de campo é utilizado para derivar uma formulação para reconstruir o fluxo concatenado, através do qual se pode estimar a tensão de circuito aberto. Como descrito por [18] a idéia consiste em trabalhar diretamente com a densidade de fluxo passando pelos dentes do estator, ao invés da densidade de fluxo no entreferro. Utilizando estes fluxos nos dentes do estator como fluxos bases, o fluxo total concatenado pelos enrolamentos do estator pode ser calculado e então utilizado para estimar a tensão de saída.

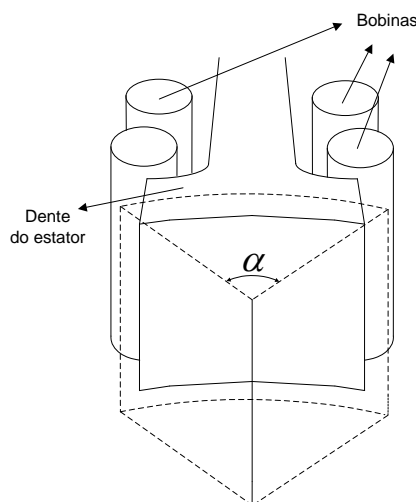
Para definir os fluxos base, o procedimento explicado no tópico anterior é repetido, porém a amostragem do vetor densidade de fluxo é agora realizada no ponto médio de cada dente do estator. Desta forma, a máquina de pólos salientes terá 36 pontos amostrados para cada posição do rotor enquanto a máquina de pólos lisos terá 42 pontos amostrados.

É importante destacar que para esta análise, a densidade de fluxo deverá ser amostrada também de acordo com a posição do rotor para a máquina de pólos lisos. Isso se deve em função da diferença entre a resolução da amostragem e a resolução da posição do rotor. Por exemplo, se a resolução para a posição do rotor for de 1 grau irá diferir da amostragem nos dentes do estator, que ocorre a cada 8,57 graus (360/42). Diferentemente como para o caso da amostragem no entreferro, quando a amostragem no dente do estator é feita para uma determinada posição, a próxima posição do rotor será 1 grau à frente, porém não é possível fazer um deslocamento de 1 grau no fluxo amostrado anteriormente e defini-lo como sendo o fluxo para esta nova posição. Com isso, para cobrir 1 par de pólos, 180 funções base serão necessárias.

A densidade de fluxo ( $\vec{B}$ ) amostrada em cada dente pode ser integrada em toda área de uma superfície  $S$  que é atravessada pelas linhas de fluxo, obtendo-se o fluxo através de (39). A Figura 4.9 mostra a superfície de integração em cada dente do estator.

$$\Phi_j = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (39)$$

onde  $j$  é o índice do dente do estator e  $S$  é a superfície concêntrica com a superfície do rotor e que cobre toda a dimensão do dente  $j$  do estator.



**Figura 4.9** – Superfície de integração sob cada dente do estator.

Assumindo que todas as linhas de fluxo passem através do dente do estator (desconsiderando o fluxo disperso), a equação (39) é aplicada para cada dente  $j$  em cada posição do rotor até cobrir um par de pólos, sendo armazenadas como  $\Phi_R(j, \theta_r)$  onde  $j=1,2,\dots,36$  e  $\theta_r = 0,1,\dots,89$  para a máquina de pólos salientes e  $j=1,2,\dots,42$  e  $\theta_r = 0,1,\dots,179$  para a máquina de pólos lisos.

De maneira similar às equações (24) e (25), para uma excitação arbitrária do rotor  $i_f$  o fluxo em cada dente pode ser obtido pela equação (40):

$$\Phi_j(\theta_r) = i_f \times \Phi_R(j, \theta_r) \quad (40)$$

Depois, os fluxos dos dentes que concatenam a fase A são somados, resultado em:

$$\lambda_A = \frac{P}{2} \sum_{j=1}^m \Phi_j(\theta_r) \quad (41)$$

em que  $P$  é o número do polos e  $m$  é o número de *slots* do estator formando um passo polar completo.

Seguindo o mesmo raciocínio,

$$\lambda_B = \frac{P}{2} \sum_{j=m+1}^{2m} \Phi_j(\theta_r) \quad (42)$$

$$\lambda_C = \frac{P}{2} \sum_{j=2m+1}^{3m} \Phi_j(\theta_r) \quad (43)$$

Finalmente a tensão induzida  $e$ , pode ser obtida da equação (44):

$$e_{abc} = \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (44)$$



#### 4.5. Resultados Obtidos

O desempenho do modelo de reconstrução de campo para ambas as máquinas sob estudo será avaliado por meio de comparação com o método dos elementos finitos. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir de uma amostragem da densidade do fluxo no entreferro realizada com resolução de 0,25 graus mecânicos (1440 pontos), enquanto que a resolução para a posição do rotor foi considerada 1 grau, ou seja:

$$\begin{aligned} \phi_{sm} &= 0,0.25,0.5,\dots,359.75 \\ \theta_r &= 0,1,2,\dots,359 \quad (\Delta\theta_r = 1^\circ \text{ nas figuras 4.5 e 4.7}) \end{aligned}$$

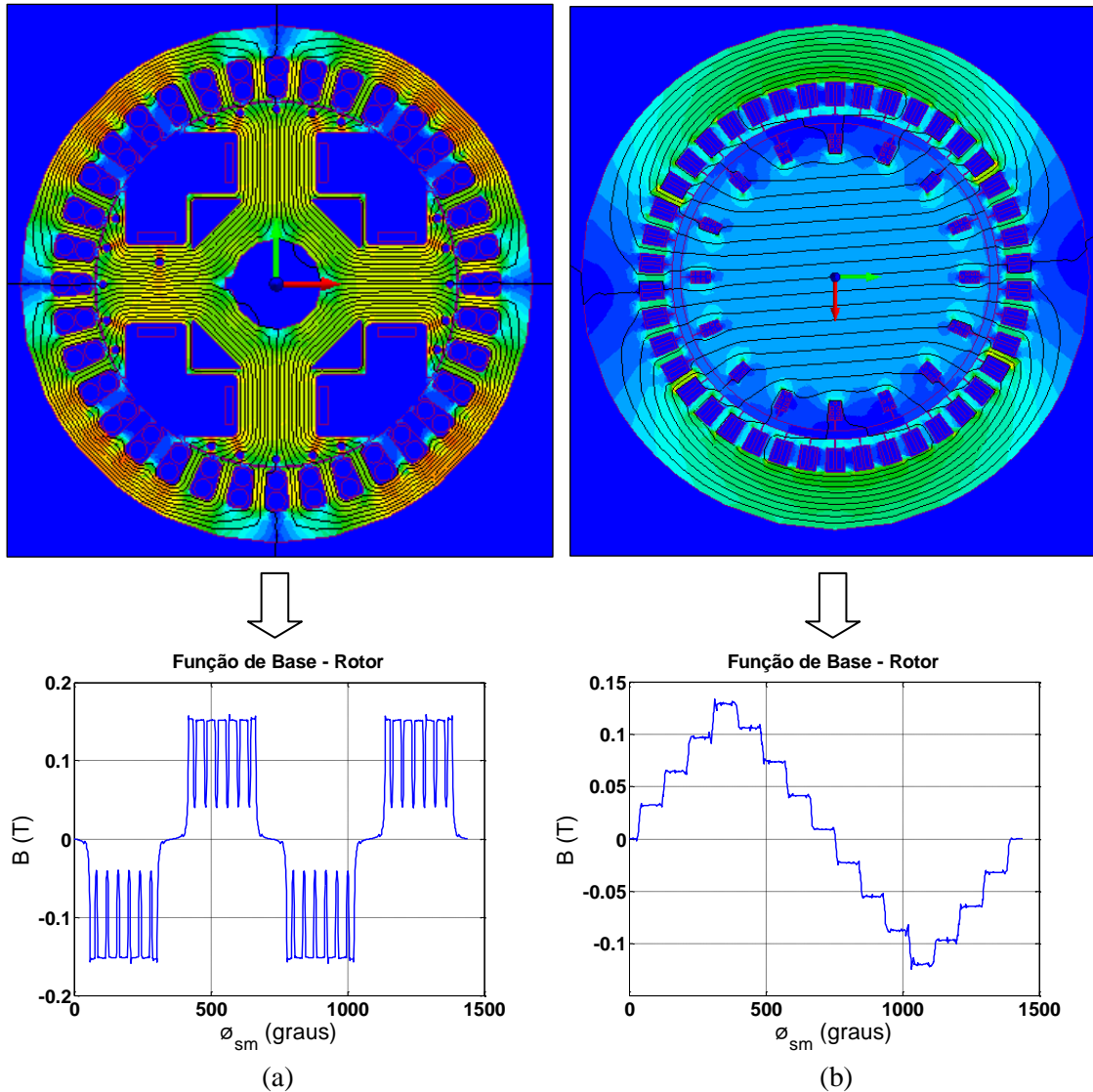
As funções de base foram salvas e utilizadas com o auxílio do software Matlab para realizar os deslocamentos discutidos nos tópicos 4.3 e para solucionar as equações apresentadas no capítulo 3.

A Figura 4.10 demonstra a componente normal da função de base do rotor, tanto da máquina pólos lisos quanto da máquina de pólos salientes.

A Figura 4.11 mostra as funções de base normal e tangencial para estator da máquina de pólos lisos e da máquina de pólos salientes. Como mencionado anteriormente, para o caso da máquina cilíndrica, somente as duas funções do estator mostradas na Figura 4.11 somadas a mais duas funções para o rotor, são suficientes para determinar a distribuição do fluxo para qualquer situação e a partir do qual se pode avaliar o desempenho da máquina. Já a máquina de pólos salientes possui um conjunto de 90 funções de base. Na Figura 4.11 as funções de base mostradas se referem especificamente para a posição do rotor  $\theta_r = 0^\circ$ .

A Figura 4.12 ilustra a comparação entre o método de reconstrução de campo e o método dos elementos finitos para a componente normal da densidade do fluxo total no entreferro da máquina de rotor cilíndrico. A mesma comparação é feita na Figura 4.13 para a componente tangencial da densidade do fluxo. Esta distribuição é alcançada para o caso

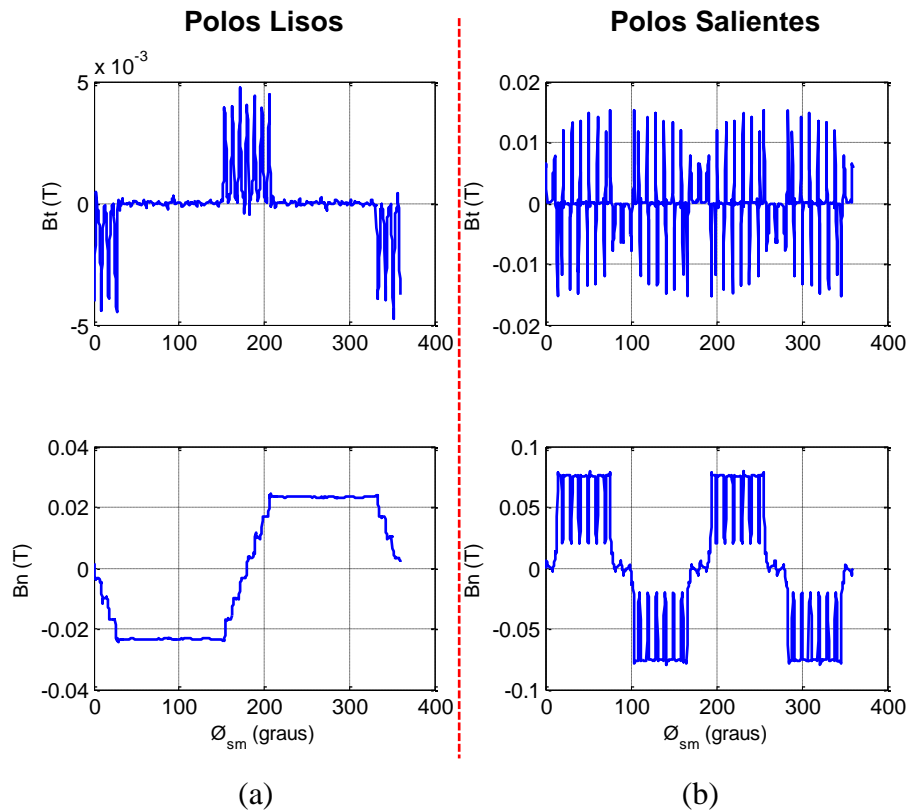
em que a corrente de campo é ajustada em 80A enquanto que os enrolamentos da armadura são alimentados com correntes trifásicas balanceadas de 5,4A de pico.



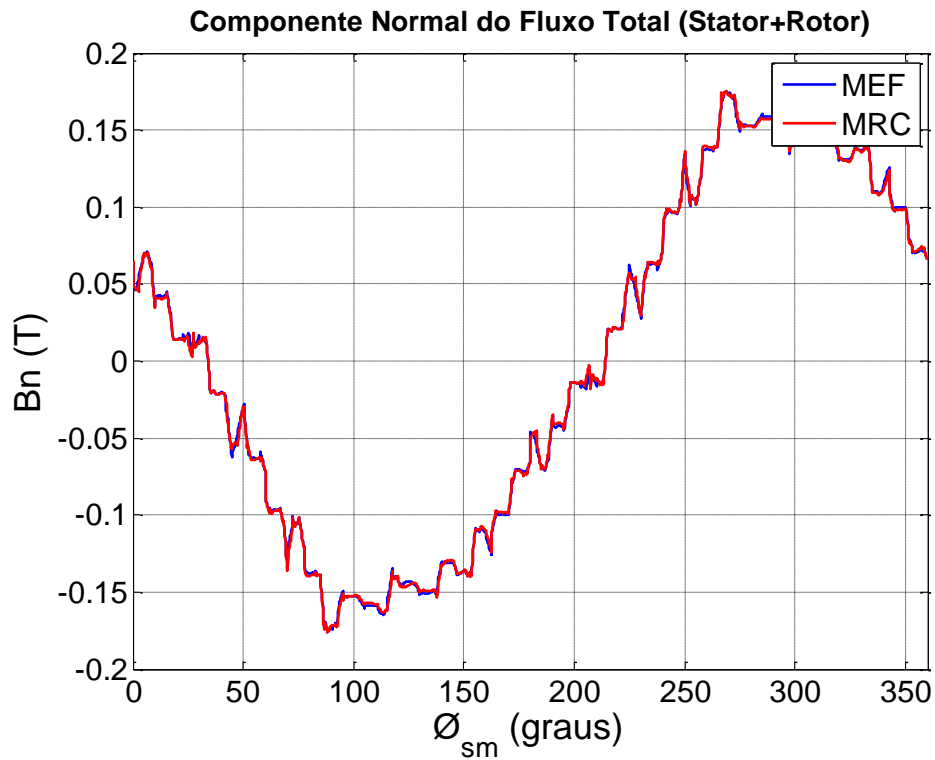
**Figura 4.10** – Funções de base do rotor. (a) Pólos salientes. (b) Pólos lisos.

Na Figura 4.14 a comparação entre os métodos é feita para a componente normal densidade do fluxo no entreferro da máquina de pólos salientes, enquanto que na Figura 4.15, a componente tangencial da densidade de fluxo também é avaliada. Neste caso, a corrente de campo aplicada foi de 0,8A e as correntes nos enrolamentos estáticos tem valor de 2,4A de pico.

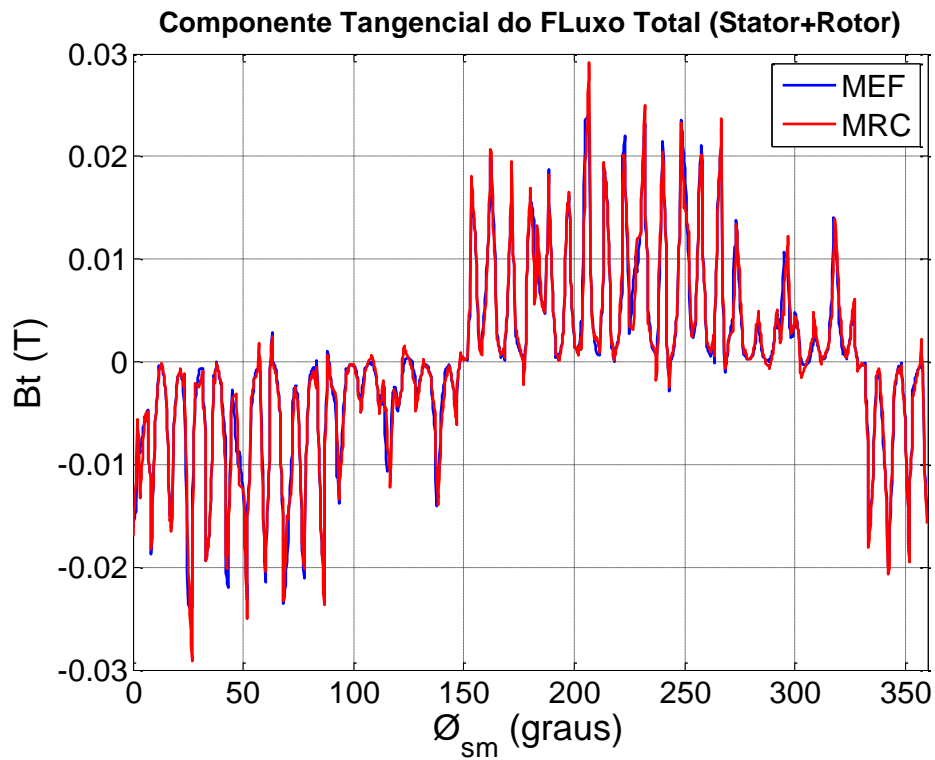
Como se pode notar, utilizando as funções de base a distribuição do fluxo magnético total no entreferro da máquina pode ser estimado com precisão compatível ao do método de elementos finitos, mesmo em condições arbitrárias.



**Figura 4.11** – Funções de base tangencial e normal do estator. (a) Máquina síncrona de pólos lisos. (b) Máquina síncrona de pólos salientes.



**Figura 4.12** – Componente normal do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos lisos.



**Figura 4.13** – Componente tangencial do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos lisos.

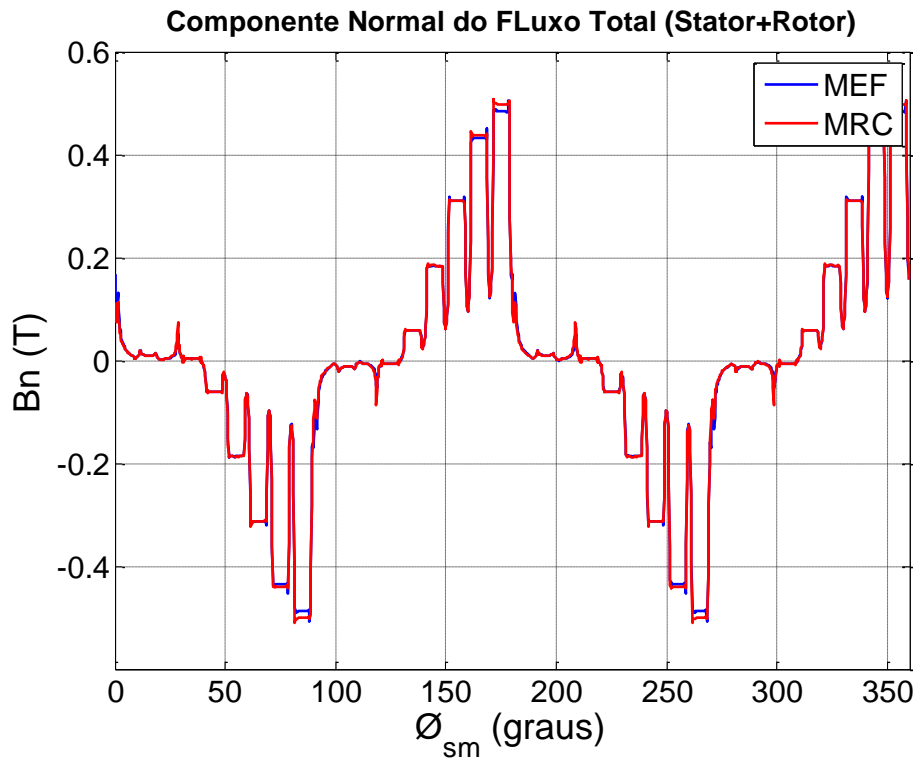


Figura 4.14 – Componente normal do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos salientes.

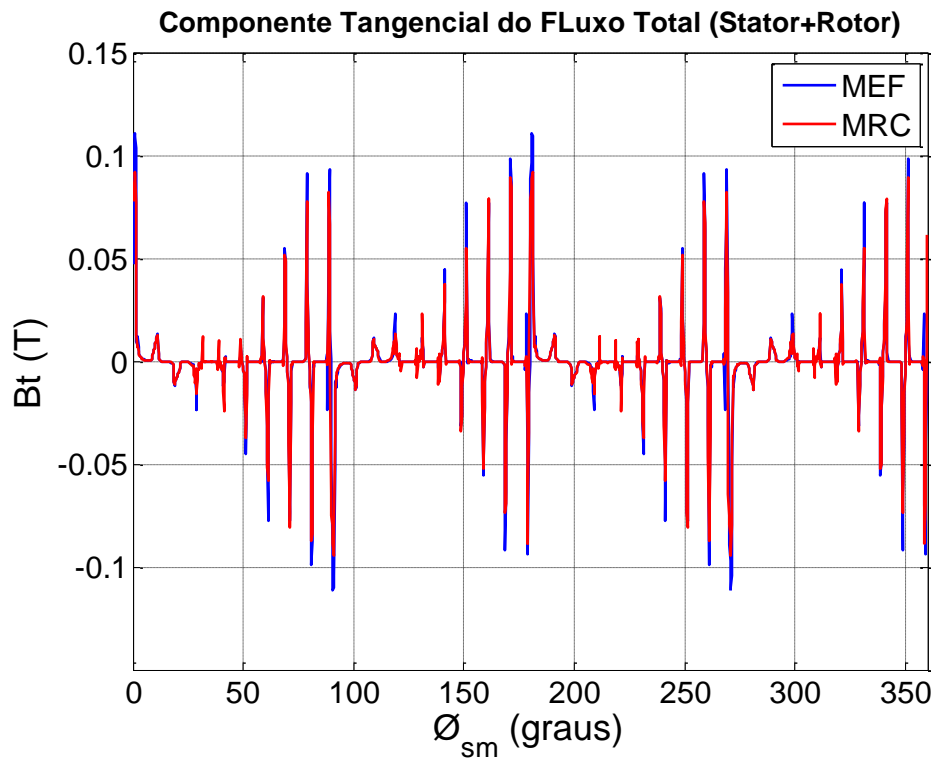


Figura 4.15 – Componente tangencial do vetor densidade de fluxo total no entreferro da máquina de pólos salientes.

Em adição, o tensor de Maxwell pode ser aplicado para avaliar as forças eletromagnéticas e o torque desenvolvido. A Figura 4.16 retrata o perfil da força eletromagnética durante um determinado instante de operação da máquina de pólos lisos. A integração desta força ao longo da superfície do rotor dá origem ao torque. O torque é calculado em relação à solução do campo no entreferro e por esta razão a malha de elementos finitos deve ser suficientemente densa nesta área. Como recomendado em [4], neste trabalho, a malha de elementos no entreferro foi dividida em 3 camadas para alcançar resultados mais precisos.

Na Figura 4.17 é mostrada a estimativa do torque para a máquina de pólos lisos após a aplicação da formulação de Maxwell à distribuição de força da Figura 4.16. Como observado, em comparação com a resposta dada pelo software MagNet, o erro é aceitável, sobretudo se o tempo computacional for considerado. Utilizando o modelo de elementos finitos, o perfil do torque levou 12 minutos para ser avaliado durante 70 milisegundos de operação da máquina em regime permanente. Em contrapartida a análise do torque foi realizada pelo modelo de reconstrução de campo em conjunto com o Matlab em apenas 1,1 segundos.

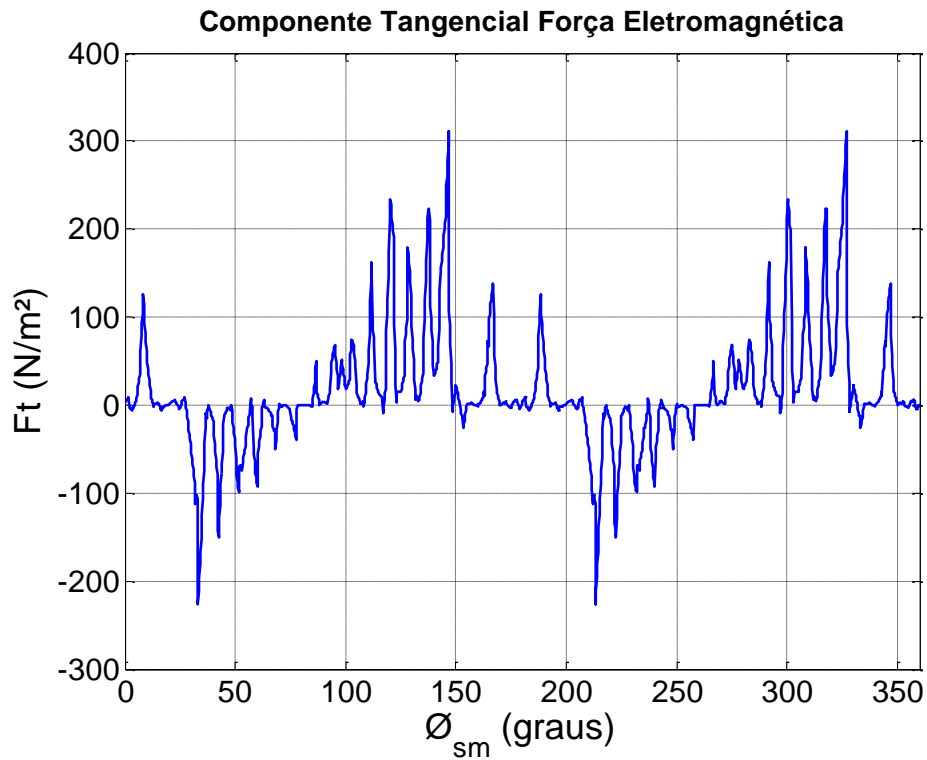


Figura 4.16 – Perfil da densidade de força tangencial na máquina síncrona de pólos lisos.

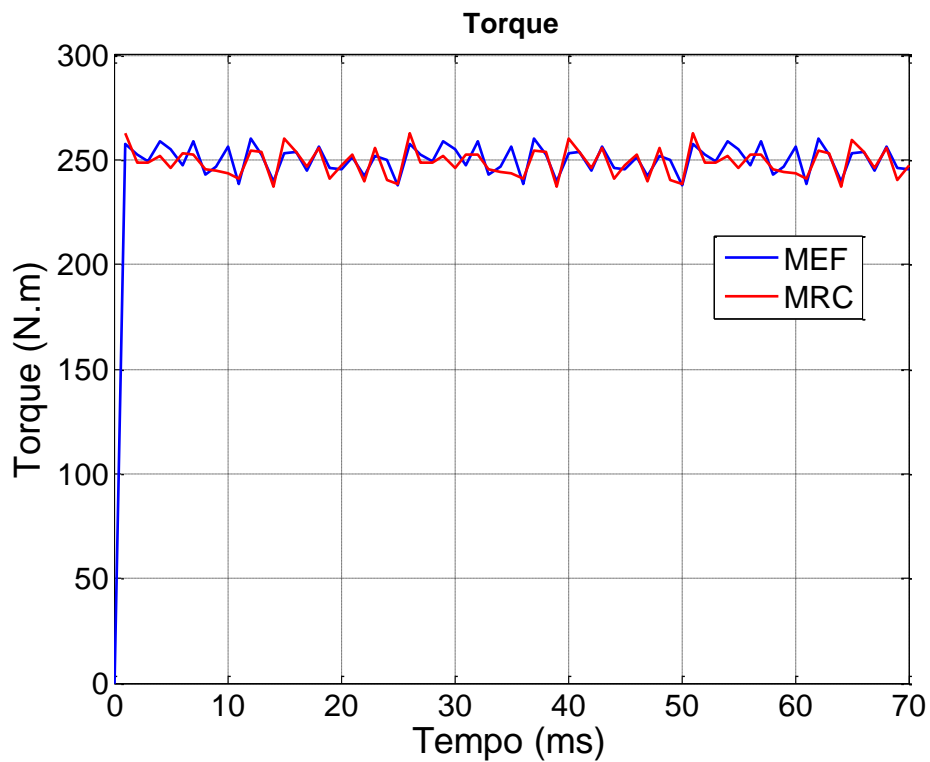
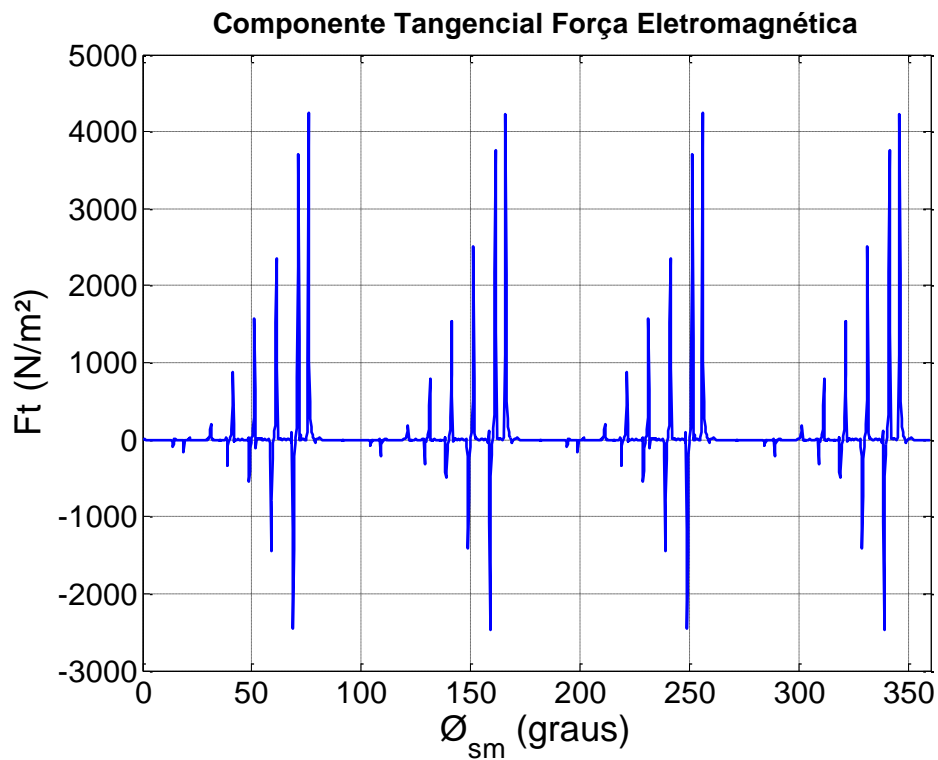


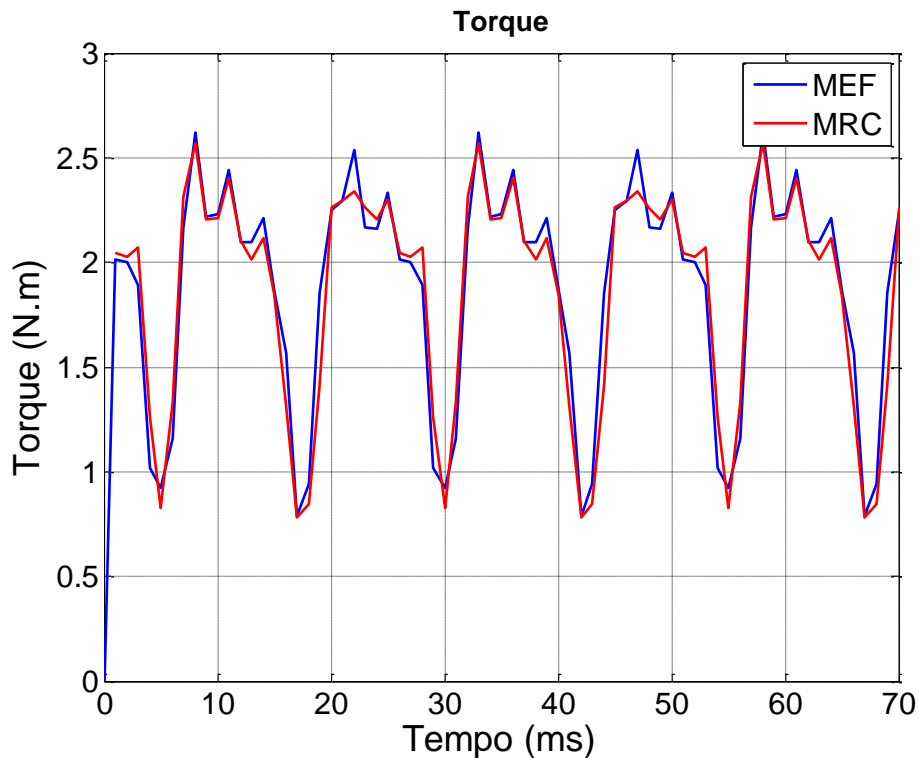
Figura 4.17 – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para o torque estabelecido na máquina síncrona de pólos lisos.

O perfil da densidade de força tangencial da máquina síncrona de pólos salientes é mostrado na Figura 4.18. O torque também é analisado para esta máquina obtendo-se a resposta conforme mostrado na Figura 4.19. Neste caso, novamente o modelo se mostrou adequado, com erro admissível em comparação com a resposta do MagNet, porém com ampla vantagem em termos de tempo consumido. Enquanto o modelo no MagNet levou 80 minutos (mais de 1 hora) para levantar o perfil de torque para 70 milisegundos de operação da máquina, o modelo proposto forneceu uma curva muito próxima em 4,6 segundos.



**Figura 4.18** – Perfil da densidade de força tangencial na máquina síncrona de pólos salientes.





**Figura 4.19** – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para o torque estabelecido na máquina síncrona de pólos salientes.

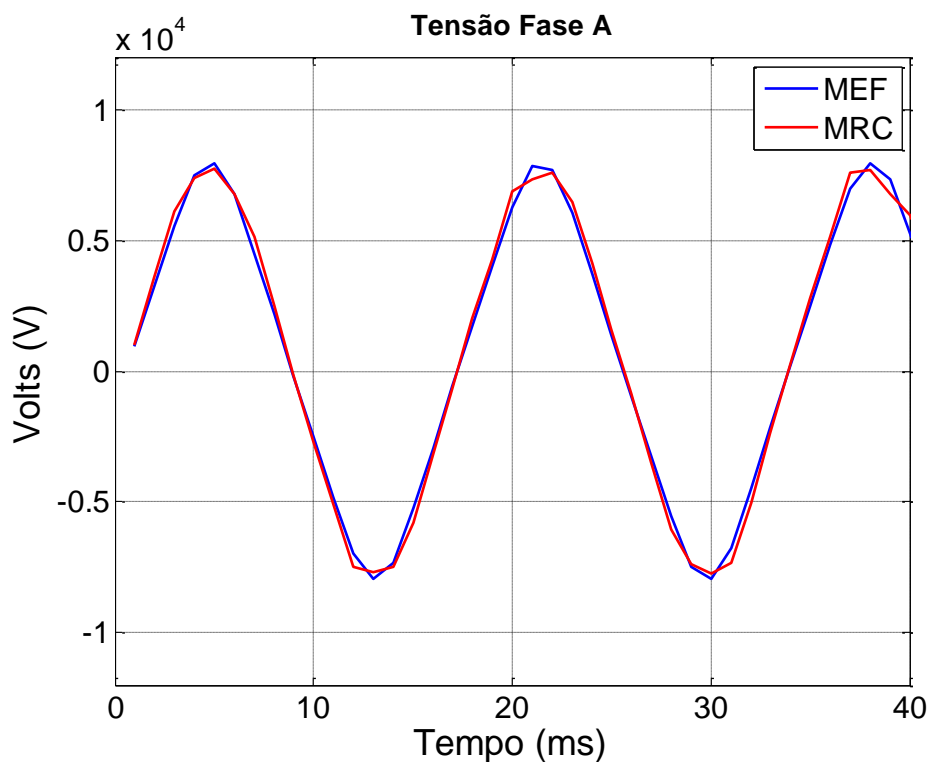
O elevado tempo requerido pelo método dos elementos finitos em uma máquina de pólos salientes se deve ao fato de que quando em movimento, a geometria do entreferro muda a cada instante. Em conseqüência, a malha (*mesh grid*) de elementos finitos precisa ser restabelecida em cada instante. Em se tratando de uma máquina de pólos lisos, a geometria do entreferro se mantém constante. O tempo gasto neste caso é necessário para recalculer o valor do campo nos nós da malha de acordo com a alteração do fluxo. Já no modelo de reconstrução do campo o tempo consumido no modelo da máquina de pólos salientes é maior em razão das buscas nas *lookkup tables*.

É importante destacar que a precisão na determinação da densidade do fluxo e conseqüentemente na estimação do torque pode ser melhorada se uma maior densidade de elementos finitos for utilizada durante o procedimento de determinação das funções de base. Outro fator associado à precisão do método é a resolução com que o fluxo é

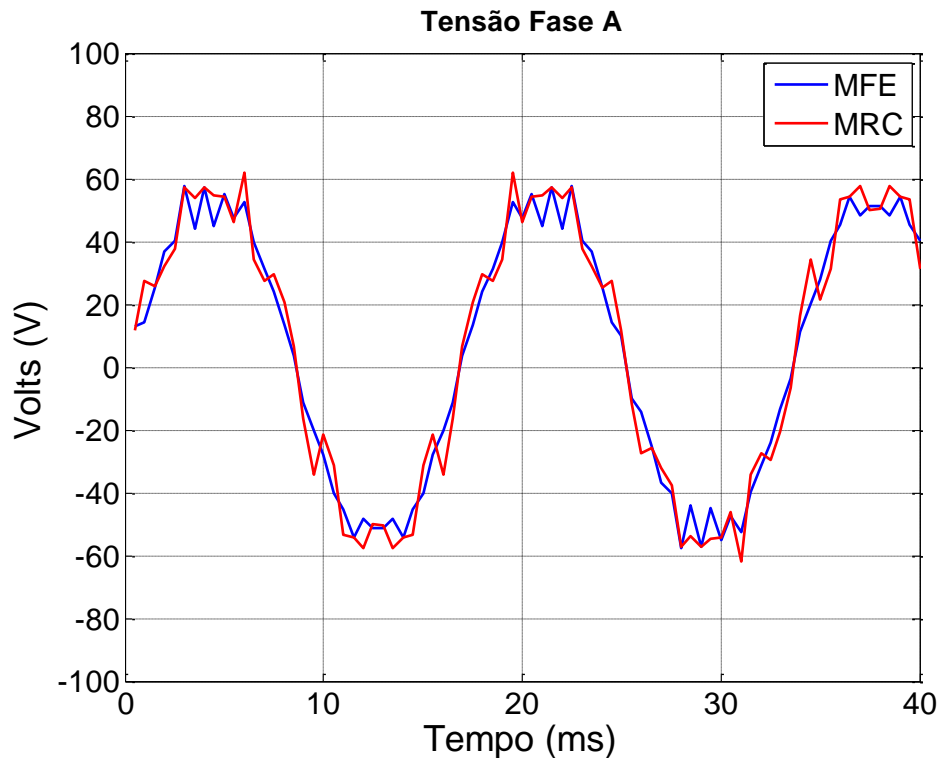
amostrado, ou seja, pode-se aumentar o número de pontos amostrados. Além disso, no caso das máquinas de pólos salientes, a resolução das *lookup tables* pode ser aumentada com o aumento na resolução para a posição do rotor, assim um maior número de funções de base é utilizado e a posição do rotor fica melhor representada durante o movimento de rotação.

Os modelos também são utilizados para estimar a tensão gerada a vazio. Operando como gerador, apenas o circuito do rotor é alimentado. No caso da máquina de pólos lisos a corrente de campo aplicada foi de 80A e para a máquina de pólos salientes aplicou-se uma corrente de 0,8A. As tensões de circuito aberto foram obtidas com a máquina operando em regime permanente, ou seja, com velocidade síncrona.

A Figura 4.20 apresenta a tensão da fase A entre fase e neutro obtida com a máquina de rotor liso, enquanto que a Figura 4.21 ilustra a tensão da fase A para a máquina de pólos salientes.



**Figura 4.20** – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para a tensão da fase A gerada a vazio pela máquina de pólos lisos.



**Figura 4.21** – Comparação entre o método de reconstrução do campo e o método dos elementos finitos para a tensão da fase A gerada a vazio pela máquina de pólos lisos.

Como é possível notar, os modelos apresentaram boa estimativa para a forma de onda da tensão. Observa-se também que a da tensão da máquina de pólos salientes tem forma de onda um pouco mais distante de uma senóide, isso porque, esta máquina tem dimensões pequenas e, além disso, a saliência do rotor provoca harmônicos.

#### 4.6. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia detalhada para modelar os geradores síncronos utilizando o método de reconstrução de campo. A diferença entre os procedimentos de modelagem se deve às características construtivas de cada máquina. A modelagem das máquinas de pólos salientes é mais exaustiva devido à necessidade de obter funções de base para diferentes posições do rotor.

Os resultados fornecidos pelos modelos desenvolvidos comprovaram a eficiência do método em determinar com rapidez e precisão valores para densidade de fluxo, densidade de força eletromagnética, torque e tensão gerada.

## **CAPÍTULO 5 -**

# **APLICAÇÕES PARA O MODELO PROPOSTO**

### **5.1. Introdução**

O modelo desenvolvido neste trabalho é uma ferramenta alternativa no estudo das máquinas elétricas. Porém, não se restringe apenas para análise de desempenho. A elevada eficiência computacional pode ser explorada em aplicações de tempo real, como no caso de monitoramento e diagnóstico. Outra possibilidade é a implementação de rotinas de otimização, pois, uma vez que a distribuição do campo é rapidamente calculada, pode-se modificar a excitação da máquina para que a distribuição do fluxo se estabeleça de tal maneira que satisfaça uma função custo visando melhorar o desempenho da operação da máquina.

### **5.2. Análise de Desempenho**

O método de reconstrução de campo é derivado do método dos elementos finitos e com isso é capaz de fornecer a mesma análise baseada no campo eletromagnético. Devido à alta capacidade de processamento requerido pelo método dos elementos finitos, este tipo de análise se limitava quase que exclusivamente para o projeto de *design* da máquina, onde o fluxo é observado para avaliar/definir as especificações. Com o desenvolvimento do método de reconstrução de campo, esta mesma análise pode ser alcançada sem esforços computacionais críticos e com boa precisão.

O estudo da máquina através da informação do fluxo eletromagnético não depende de parâmetros concentrados, resultando num perfil de torque e das tensões geradas, mais realistas.

### 5.3. Monitoramento e Diagnóstico

É cada vez mais comum a prática da chamada manutenção preditiva de equipamentos relevantes na operação de uma planta. Neste sentido, o monitoramento, detecção e diagnóstico de faltas incipientes em máquinas elétricas são importantes e desafiantes tópicos no campo da engenharia. A partir de monitoramento e esquemas de detecção de faltas, prévias advertências a respeito da condição da máquina podem ser obtidas objetivando uma manutenção preditiva e com isso, maior confiabilidade e redução de custos e intervenções desnecessárias [18].

Com o propósito de detectar sinais indicativos de faltas em máquinas elétricas, diversos métodos podem ser encontrados na literatura [18,19]. Em [20] é apresentada uma metodologia de monitoramento e diagnóstico para a detecção de faltas em um gerador síncrono de pólos salientes na qual o autor propõe detectar a avaria com base na mudança do fluxo concatenado. Com isso, diferentes tipos de faltas entre espiras podem ser detectadas em função da influência da falta na distribuição do fluxo magnético no interior do gerador. Entretanto, a técnica é implementada através de sensores, ou seja, bobinas auxiliares são instaladas no interior da máquina, caracterizando-se como uma técnica invasiva.

Por outro lado, o método de reconstrução do campo também é capaz de fornecer a distribuição do campo em tempo real, dispensando o uso de sensores de fluxo. Portanto, o método pode ser utilizado para observar a assinatura do fluxo eletromagnético e detectar possíveis anormalidades de acordo com mudanças no padrão de comportamento do fluxo.

### 5.4. Otimizações

A otimização de máquinas elétricas pode ser tratada sob dois aspectos diferentes: alteração na geometria da máquina ou através da modificação da excitação da máquina [11]. Devido aos processos bem definidos de fabricação das partes construtivas das

máquinas, em determinadas aplicações, a alteração no *design* das peças não é economicamente viável. Por outro lado, alterar a excitação é um procedimento mais simples e barato. Assim, a alta eficiência computacional do método de reconstrução do campo permite implementar uma rotina iterativa de busca pela excitação ótima de modo a satisfazer alguma condição de otimização. Em [10] este conceito foi utilizado para eliminar o *ripple* de torque de uma máquina de ímã permanente. No caso da máquina síncrona de pólos salientes poderia se tentar, por exemplo, reduzir total ou parcialmente o torque relutante, ou na operação como gerador, avaliar a eliminação seletiva de harmônicos na tensão gerada.

Outra possibilidade seria otimizar a capacidade de excitação da máquina. Sabe-se que o fabricante impõe limites na corrente de excitação como fator de segurança. No entanto, em alguns casos este fator definido pelo fabricante é maior do que realmente as margens de segurança exigem. Assim, visualizando a distribuição do fluxo através do método de reconstrução do campo é possível avaliar se é possível aumentar a excitação, respeitando um limite que ultrapasse o fator de segurança imposto pelo fabricante, mas seguro o suficiente para não interferir na vida útil da máquina. Desta forma, seria possível explorar a máxima capacidade da máquina.

### **5.5. Considerações Finais**

Neste capítulo foram analisados possíveis casos onde o modelo desenvolvido pode ser aplicado. Com isso, observa-se que o modelo tem potencial para ser aplicado em diferentes áreas.

# **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO**

## **6.1. Introdução**

Neste último capítulo são propostos alguns temas para trabalhos futuros e apresentadas as considerações finais do trabalho. Por se tratar de um modelo inovador, muitos trabalhos ainda podem ser desenvolvidos tendo como base o estudo aqui apresentado.

## **6.2. Trabalhos Futuros**

No modelo desenvolvido, foram assumidas algumas idealizações, tais como ausência de saturação e negligência dos enrolamentos amortecedores. Portanto, como trabalho futuro pode-se incorporar estas questões ao modelo atual tornando-o mais completo.

Além disso, a implementação prática do método em um sistema embarcado é de grande interesse. Através de testes no sistema real pode-se efetivamente medir as limitações do método e do modelo proposto.

## **6.3. Considerações Finais**

A idéia de se trabalhar com a densidade de fluxo eletromagnético obtida no entreferro da máquina elétrica pode parecer algo complexo e de difícil manipulação. Entretanto o método de reconstrução do campo é de fácil abordagem, utiliza conceitos e equacionamentos simples, constituindo-se como uma ferramenta acessível para o estudo dos geradores síncronos.



A desvantagem do método fica por conta da dependência do método dos elementos finitos. Mais especificamente o método depende do projeto de *design* da máquina real que se deseja modelar, pois só assim as características da máquina serão transmitidas às funções de base de maneira fiel. Ocorre que em muitos casos o fabricante não disponibiliza essas informações, dificultando a abordagem pelo método proposto.

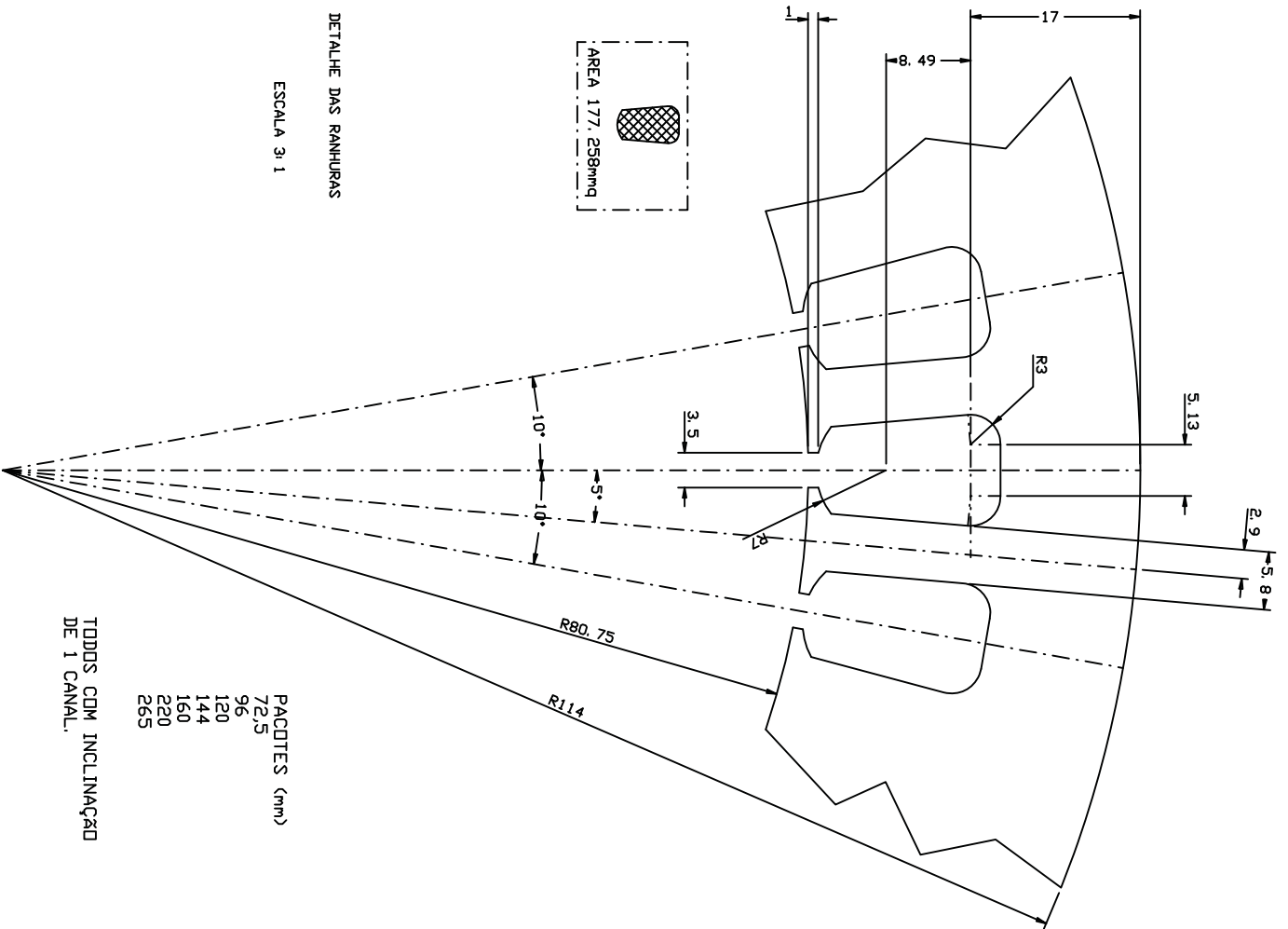
Em conformidade com os resultados apresentados, os modelos desenvolvidos neste trabalho se mostraram aptos para analisar o desempenho dos geradores síncronos. O baixo tempo/esforço computacional consumido para esta análise justifica a adoção do método. Desta forma, este trabalho contribui para a inserção de um modelo inédito na literatura e com potencial para ser aplicado em diferentes áreas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WU, D.; PEKAREK, S. D.; FAHIMI, B. A field reconstruction technique for efficient modeling of the fields and forces within induction machines. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 24, no. 2, pp. 366-374, Jun. 2009.
- [2] BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. 2. Ed, Editora da UFSC, 1992.
- [3] HUTTON, D. *Fundamentals of Finite Element Analysis*, McGraw, New York, 2004.
- [4] PYRHONEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVA, V. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, 2008.
- [5] KOSOW, I. L. *Electric Machinery and Transformers*. Prentice-Hall, 4. Ed., 1982.
- [6] MASCIOTRO, J. C.; DILBURT, J. L. *Conversão de Energia II – Máquina Síncrona*. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2010.
- [7] GUEDES, M. V. *O Alternador Síncrono Trifásico – modelização*. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, 1996.
- [8] TAN, C. M.; LI, W.; GAN, Z.; HOU, Y. *Applications of Finite Element Methods for Reability Studies on ULSI Interconnections*. Spring-Verlag London, 2011.
- [9] KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOLF, S. D. *Analysis of electric machinery and drive systems*, 2. Ed., John Wiley & Sons, 2002.
- [10] ZHU, W.; FAHIMI, B.; PEKAREK, S. D. A field reconstruction method for optimal excitation of permanent magnet synchronous machines. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 305-313, Jun. 2006.
- [11] KHOOBROO, A.; FAHIMI, B.; PEKAREK, S. D. A New Field Reconstruction Method for Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Industrial Electronics – IECON*, 2008.
- [12] TORREGROSSA D.; FAHIMI, B.; PEYRAUT, F.; MIRAOU, A. Fast computation of electromagnetic vibrations in electric machines via field reconstruction method and knowledge of mechanical impulse response, *accepted for publication in IEEE Trans. Ind. Appl.*.

- [13] LIN, C.; FAHIMI, B. Reduction of torque ripple in switched reluctance motor drives using field reconstruction method. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC2011)*, Chicago, USA, 2011.
- [14] HAIDONG, Y.; FAHIMI, B. A Novel Control Strategy of Linear Induction Motor Drives Based on Dynamic Maximum Force Production. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference – VPPC*, 2009.
- [15] RIBEIRO, F. L. B. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, 2004.
- [16] HUMPHRIES, S. Theory and applications of the Maxwell stress tensor, Field Precision, Albuquerque, NM, USA, 2010.
- [17] POPESCU, M. Prediction of the electromagnetic torque in synchronous machines through Maxwell stress harmonic filter method. Glasgow University, United Kingdom, 2006.
- [18] LEITE, D. F. *Sistema de Diagnóstico de Falhas em Máquinas Elétricas de Corrente Alternada*. Belo Horizonte, 2007. Dissertação de mestrado – PUC – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- [19] NANDI, S.; TOLIYAT, A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp: 719-729, 2005.
- [20] YAGHOBI, H.; ANSARI, K.; MASHHADI, H. R. Analysis of Magnetic Flux Linkage Distribution in Salient-Pole Synchronous Generator with Different Kinds of Inter-Turn Winding Faults. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 7, no. 4, 2011.
- [21] KHOOBROO, A. *Fault detection and optimal treatment of the permanent magnet synchronous machine using field reconstruction method*, Arlington, 2010. Phd dissertation, University of Texas at Arlington.

**ANEXO 1 – PROJETO DE *DESIGN* DA MÁQUINA SÍNCRONA DE  
PÓLOS SALIENTES**



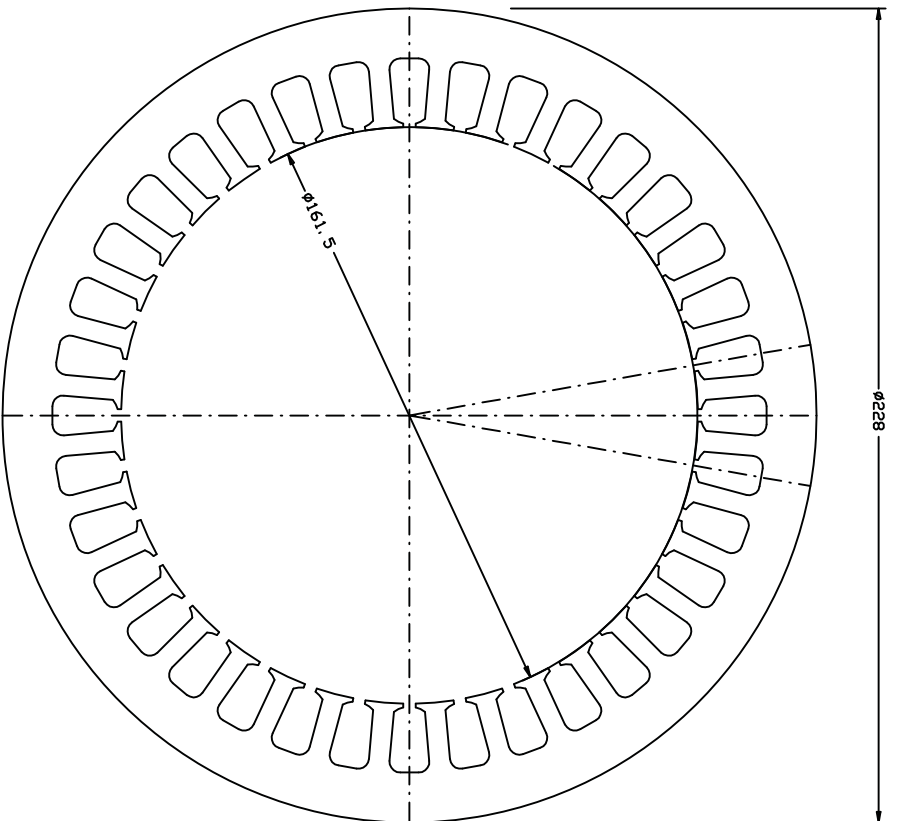
AREA 177,258mm<sup>2</sup>

DETALHE DAS RANHURAS

ESCALA 3: 1

TODOS COM INCLINAÇÃO DE 1 CANAL.

- PACOTES (mm)
- 72,5
  - 96
  - 120
  - 144
  - 160
  - 220
  - 265



MATERIAL: CHAPA SAE 1006/08 0,50mm  
TOLERANCIA DA REBARBA: < 15% DA ESPESSURA

REF. PROJ. 250-45627		REF. PROJ. 250-45627	
PERTENCE A LIQUIDO: 0048891		PERTENCE A LIQUIDO: 0048891	
ITEM	QTD.	DISCRIMINACAO	SPECIACOES
DISCO DO ESTATOR 36 CANAIS			0,50mm
Ø INT. 161,5mm.			
ESTAMPADO No 1-40852DI			
PREÇOS	RELA.	TERCID.	
01	01	01	
MATERIAL		MEIDIMS	DES. NÚC.
ESCALAS-1:1			CDD. ALMIX
FIG. Nº	DESIGNISTA	RANIS	DATA
01	VERIFICADO		17/02/00
APROVADO			
NÚ. DESBND		250-45627	

