

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS DE OLIVEIRA MOURA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE REDES DE RELUTÂNCIAS
ESTÁTICAS PARA GERADORES SÍNCRONOS**

**CURITIBA
2022**

VINICIUS DE OLIVEIRA MOURA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE REDES DE RELUTÂNCIAS
ESTÁTICAS PARA GERADORES SÍNCRONOS**

**METHODOLOGY FOR DEVELOPMENT OF STATIC RELUCTANCE NETWORKS
FOR SYNCHRONOUS GENERATORS**

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistema de Energia (PPGSE) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Thiago de Paula Machado Bazzo.

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



VINICIUS DE OLIVEIRA MOURA

METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE REDES DE RELUTÂNCIAS ESTÁTICAS PARA GERADORES SÍNCRONOS

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 28 de Julho de 2022

Dr. Thiago De Paula Machado Bazzo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ma. Elissa Soares De Carvalho, Mestrado - Weg Equipamentos Elétricos S. A.

Dr. Fabiano Gustavo Silveira Magrin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Nelson Jhoe Batistela, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 28/07/2022.

Dedico este trabalho à minha família, meus amigos e
meu professor orientador.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio incondicional que me deram ao longo de toda a minha trajetória. Sou grato pois eles sempre me incentivarem e acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou.

Sou grato pela confiança depositada na minha proposta de projeto pelo meu professor Dr Thiago Bazzo, orientador do meu trabalho. Obrigado por me manter motivado durante todo o processo. Agradeço também por toda dedicação e paciente em me ensinar a evoluir como pesquisador.

Gostaria também de agradecer aos meus amigos pelo apoio e suporte e por entenderem todos os meus momentos de ausência para se dedicar a essa dissertação.

Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, eles são a abertura para achar as que estão certas.

Carl Sagan.

RESUMO

MOURA, V. O. Criação de uma Rede de Relutâncias para o Projeto de Geradores Síncronos de Polos Salientes. 137f. Dissertação em andamento – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2022.

Este trabalho apresenta um procedimento para o desenvolvimento de redes de relutâncias para calcular as reatâncias de eixos direto e em quadratura de máquinas síncronas de polos salientes. O cálculo destas reatâncias é imprescindível para o projeto de geradores síncronos, pois elas são utilizadas para calcular a queda de tensão devido à reação de armadura, sendo necessárias para se obter a tensão terminal do gerador operando em carga. Existem três modos de se calcular as estas reatâncias: simulação por elementos finitos, que requer grande tempo de processamento; método analítico, que apresenta baixa precisão para máquinas com geometrias complexas; e rede de relutâncias. Existem poucas redes de relutâncias que apresentam precisão aceitável para esta finalidade, principalmente envolvendo máquinas de polos salientes. Por este motivo, as redes de relutâncias desenvolvidas neste trabalho se propõem ser simples, para permitir fácil reprodução; robustas, para representar máquinas com dimensões distintas; e precisas, para fornecer resultados adequados. Além disso, as redes de relutâncias são mais versáteis que o método de simulação por elementos finitos, pois são mais simples de acoplar com softwares de otimização. Obtiveram-se resultados que foram validados através de simulação eletromagnética com *software* cálculo por de elementos finitos. Por fim, pode-se ratificar a metodologia desenvolvida para a elaboração de redes de relutâncias destinadas ao cálculo das reatâncias do eixo direto e em quadratura.

Palavras-chave: Gerador Síncrono; Rede de Relutâncias; Elementos Finitos; Reatâncias de eixo direto e em quadratura.

ABSTRACT

MOURA, V. O. Design of a Reluctance Network for the Salient Pole Synchronous Generator Project. 137f. Dissertation in progress – Postgraduate Program in Energy Systems (PPGSE), Federal Technological University of Paraná (UTFPR). Curitiba, 2022.

This work presents a design approach of reluctance networks in order to calculate the direct and quadrature axis reactances of salient pole synchronous machines. The calculation of these reactances is essential for the design of synchronous generators, as they are used to calculate the voltage drop due to the armature reaction, being essential to obtain the terminal voltage of the generator operating under load. There are three ways to calculate these reactances: finite-element simulation, which requires a long processing time; analytical method, which presents low precision for machines with complex geometries; and reluctance network. There are few reluctance networks that present good accuracy for this purpose, mainly involving salient pole machines. For this reason, the reluctance networks developed in this work are intended to be simple, allowing easy reproduction; robust, representing machines with different dimensions; and accurate to provide adequate results. In addition, reluctance networks are more versatile than the finite element simulation method, as they are simpler to couple with optimization software. Obtained results were validated through electromagnetic simulation with finite element software. Finally, the methodology developed for the elaboration of reluctance networks for the calculation of direct and quadrature axis reactances can be ratified.

Keywords: Synchronous Generator; Network of Reluctances; Finite Element; Direct and quadrature axis reactances.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipo de rotor: (a) Rotor de polos lisos e (b) Rotor de polos salientes	30
Figura 2 – Representação dos eixos direto e em quadratura em uma máquina de dois polos	31
Figura 3 – Exemplo de um estator de uma máquina síncrona	36
Figura 4 – Escovas e anéis deslizantes	37
Figura 5 – Estrutura de uma excitatriz	39
Figura 6 – Enrolamento de amortecimento	40
Figura 7 – Fasores sobre uma máquina de polos lisos	43
Figura 8 – Campos magnéticos: (a) Campo principal, (b) Campo de reação de armadura e (c) Campo resultante (a) + (b)	44
Figura 9 – Circuito equivalente de um gerador síncrono trifásico de polos lisos	46
Figura 10 – Diagramas fasoriais de gerador de polos lisos: (a) Fator de potência unitário; (b) Fator de potência adiantado e (c) Fator de potência atrasado	47
Figura 11 – Fasores sobre uma máquina de polos salientes	48
Figura 12 – Diagrama fasorial de uma máquina de polos salientes	49
Figura 13 – Dispositivo eletromagnético utilizado como exemplo	53
Figura 14 – Dispositivo eletromagnético simulado no EFCAD	53
Figura 15 – Rede de relutâncias que representa o dispositivo eletromagnético	54
Figura 16 – Interface do reluctool	56
Figura 17 – Rede de relutâncias do dispositivo eletromagnético implementada no reluctool	57
Figura 18 – Esquema de bobinagem	60
Figura 19 – Curva saturação do ferro	62
Figura 20 – Simulação em elementos finitos com o rotor em eixo direto	63
Figura 21 – Simulação em elementos finitos com o rotor em quadratura	64
Figura 22 – Indutância em função da posição do rotor	65
Figura 23 – Tabela de harmônicas	65
Figura 24 – Análise das forças magnetomotrizes	66
Figura 25 – Rede para obtenção do enlace de fluxo de eixo direto	69
Figura 26 – Relutância do ferro do dente 1	70
Figura 27 – Dimensões da relutância do ferro do dente 1	71
Figura 28 – Rede para obtenção do enlace de fluxo de eixo em quadratura	72
Figura 29 – Relutância do ferro do dente 7	72
Figura 30 – Dimensões da relutância do ferro do dente 7	73
Figura 31 – Rede L_d sem ferro para máquina de entreferro constante	74
Figura 32 – Rede L_q sem ferro para máquina de entreferro constante	74
Figura 33 – Fluxos medidos para a rede L_d sem ferro para máquina de entreferro constante	75
Figura 34 – Fluxos medidos para a rede L_q sem ferro para máquina de entreferro constante	75
Figura 35 – Rede L_d com ferro para máquina de entreferro constante	78
Figura 36 – Rede L_q com ferro para máquina de entreferro constante	78

Figura 37 – Fluxos medidos para a rede Ld com ferro para máquina de entreferro constante	79
Figura 38 – Fluxos medidos para a rede Lq com ferro para máquina de entreferro constante	79
Figura 39 – Fluxos medidos para a rede Ld para máquina de entreferro variável	84
Figura 40 – Fluxos medidos para a rede Lq para máquina de entreferro variável	85
Figura 41 – Relutâncias da coroa do estator	94
Figura 42 – Dimensões das relutâncias da coroa	95
Figura 43 – Dimensões das relutâncias do corpo da ranhura.....	95
Figura 44 – Dimensões das relutâncias da abertura e do colarinho da ranhura	96
Figura 45 – Dimensões das relutâncias radiais do polo.....	97
Figura 46 – Dimensões das relutâncias tangenciais do polo.....	102
Figura 47 – Relutâncias presentes no entreferro	104
Figura 48 – Dimensões das relutâncias presentes no entreferro sobre o polo	104
Figura 49 – Relutâncias presentes no entreferro	107
Figura 50 – Dimensões das relutâncias presentes nos dentes 1 e 13.....	109
Figura 51 – Dimensões das relutâncias presentes nos dentes: 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11 e 12	111
Figura 52 – Dimensões das relutâncias radiais presentes nos dentes 6 e 8 ...	113
Figura 53 – Dimensões das relutâncias tangenciais presentes nos dentes 6 e 8	115
Figura 54 – Dimensões das relutâncias do dente 7	116
Figura 55 – Dimensões das relutâncias do corpo da ranhura entre dentes 6 e 7	118
Figura 56 – Dimensões das relutâncias da abertura e do colarinho da ranhura entre dentes 6 e 7	119
Figura 57 – Dimensões das relutâncias radiais do polo.....	120
Figura 58 – Dimensões das relutâncias tangenciais do polo.....	124
Figura 59 – Dimensões da relutância tangencial do pescoço do polo	126
Figura 60 – Dimensões das relutâncias radiais do pescoço do polo	126
Figura 61 – Relutâncias do entreferro	127
Figura 62 – Dimensões das relutâncias do entreferro fora do polo	128
Figura 63 – Dimensões das relutâncias sobre o polo.....	130
Figura 64 – Dimensões das relutâncias sobre o polo.....	134
Figura 65 – Dimensões das relutâncias tangenciais fora do polo	136
Gráfico 1 - Matriz energética mundial.....	26
Gráfico 2 – Evolução da utilização das fontes energéticas.....	28
Gráfico 3 - Análise de robustez para redes Ld com e sem ferro para máquina de entreferro constante	82
Gráfico 4 - Análise de robustez para redes Lq com e sem ferro para máquina de entreferro constante	83
Gráfico 5 - Análise de robustez para redes Ld para máquina de entreferro variável.....	87
Gráfico 6 - Análise de robustez para redes Lq para máquina de entreferro variável.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de fontes.....	27
Tabela 2 – Publicações	33
Tabela 3 – Parâmetros da rede de relutâncias do dispositivo eletromagnético	55
Tabela 4 – Comparativo de fluxo	58
Tabela 5 - Tabela com as especificações técnicas da máquina de entreferro constate.....	60
Tabela 6 – Mapa de ranhuras com 3 enrolamentos – parte 1	61
Tabela 7 – Mapa de ranhuras com 3 enrolamentos – parte 2	61
Tabela 8 – Mapa de ranhuras com 2 enrolamentos em série – parte 1	62
Tabela 9 – Mapa de ranhuras com 2 enrolamentos em série – parte 2	62
Tabela 10 – Valores dos elementos da rede de eixo direto	71
Tabela 11 – Valores dos elementos da rede de eixo direto	73
Tabela 12 – Tabela comparativa de fluxos rede L_d sem ferro para máquina de entreferro constante	76
Tabela 13 – Tabela comparativa de fluxos rede L_q sem ferro para máquina de entreferro constante	76
Tabela 14 – Comparação dos resultados das redes propostas sem ferro com as simulações em elementos finitos para máquina de entreferro constante	77
Tabela 15 – Tabela comparativa de fluxos rede L_d com ferro para máquina de entreferro constante	80
Tabela 16 – Tabela comparativa de fluxos rede L_q com ferro para máquina de entreferro constante	80
Tabela 17 – Comparação dos resultados das redes propostas com ferro com as simulações em elementos finitos para máquina de entreferro constante	81
Tabela 18 – Análise de robustez para redes L_d com e sem ferro para máquina de entreferro constante	82
Tabela 19 – Análise de robustez para redes L_q com e sem ferro para máquina de entreferro constante	82
Tabela 20 – Tabela com as especificações técnicas da máquina de entreferro variável.....	84
Tabela 21 – Tabela comparativa de fluxos rede L_d para máquina de entreferro variável.....	85
Tabela 22 – Tabela comparativa de fluxos rede L_q para máquina de entreferro variável.....	86
Tabela 23 – Comparação dos resultados das redes propostas com as simulações em elementos finitos para máquina de entreferro variável.....	86
Tabela 24 – Análise de robustez para rede L_d para máquina de entreferro variável.....	87
Tabela 25 – Análise de robustez para rede L_q para máquina de entreferro variável.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CADES	Component Architecture for the Design of Engineering Systems
EFCAD	Electromagnetic Fields Computer Aided Design
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	International Energy Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Campo magnético
I	Corrente elétrica
dl	Elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração
E	Tensão
N	Número de espiras
Φ	Fluxo magnético
t	Tempo
ef_{se}	Frequência elétrica
n_m	Velocidade mecânica
P	Número de polos
ΔV_X	Queda de tensão devido a reação de armadura
ΔV_{RA}	Queda de tensão devido a resistência
ΔV_{XA}	Queda de tensão devido a auto indutância
\dot{E}_A	Tensão Interna
\dot{I}_A	Corrente de reação de armadura
X_A	Auto reatância
R_A	Resistência
X_S	Reatância síncrona
\dot{I}_d	Componente da corrente elétrica no eixo direto
\dot{I}_q	Componente da corrente elétrica no eixo em quadratura
δ	Ângulo de carga
ϕ	Ângulo entre a tensão e a corrente
V_d	Componente da tensão no eixo direto
V_q	Componente da tensão no eixo em quadratura
X_d	Componente da reatância síncrona no eixo direto
X_q	Componente da reatância síncrona no eixo em quadratura
x_d	Componente da reatância de reação de armadura no eixo direto
x_q	Componente da reatância de reação de armadura no eixo em quadratura
F_{mm}	Força magnetomotriz
\mathcal{R}	Relutância
μ_o	Permeabilidade do vácuo
μ_r	Permeabilidade relativa do material
l_R	Comprimento do elemento
A_R	Área do elemento
λ	Fluxo concatenado por uma bobina
L_{bob}	Indutância da bobina
C_E	Comprimento externa
C_I	Comprimento interno
L	Largura
P	Profundidade
E_F	Entreferro
P_S	Potência de saída
V_S	Tensão de saída
FP	Fator de potência
L_d	Indutância do eixo direto

L_q	Indutância do eixo em quadratura
FC	Fluxo concatenado
α_r	Passo angular da ranhura
C_{ax}	Comprimento axial da máquina
$D1_{P1_flux}$	Fluxo presente no dente 1
$D1_{P2_flux}$	Fluxo presente no dente 2
$D1_{P3_flux}$	Fluxo presente no dente 3
$D1_{P4_flux}$	Fluxo presente no dente 4
$D1_{P5_flux}$	Fluxo presente no dente 5
$D1_{P6_flux}$	Fluxo presente no dente 6
D_{if}	Diferença entre os valores encontrados através do EFCAD e do CADES
$D_{if\text{significativa}}$	Diferença poderada entre os valores encontrados através do EFCAD e do CADES
E_F	Entreferro
T_{hd}	Diferença entre o passo da ranhura e o ângulo ocupado pela ranhura no topo
D_1	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 1
D_2	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 2
D_3	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 3
D_4	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 4
D_5	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 5
D_6	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 6
D_7	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 7
D_8	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 8
D_9	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 9
D_{10}	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 10
D_{11}	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 11
D_{12}	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 12
D_{13}	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 13
D_{14}	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 14
D_{15}	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 15
D_{16}	Parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 16
Co_{D1_D2}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 1 e 2
Co_{D2_D3}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 2 e 3
Co_{D3_D4}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 3 e 4
Co_{D4_D5}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 4 e 5
Co_{D5_D6}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 5 e 6
Co_{D6_D7}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 6 e 7
Co_{D7_D8}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 7 e 8
Co_{D8_D9}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 8 e 9
Co_{D9_D10}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 9 e 10
Co_{D10_D11}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 10 e 11
Co_{D11_D12}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 11 e 12
Co_{D12_D13}	Relutância da coroa do estator entre os dentes 12 e 13
$Ran_{D1_D2_P1}$	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 1 e 2
$Ran_{D2_D3_P1}$	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 2 e 3
$Ran_{D3_D4_P1}$	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 3 e 4
$Ran_{D4_D5_P1}$	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 4 e 5

<i>Ran</i> _{D5_D6_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 5 e 6
<i>Ran</i> _{D6_D7_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran</i> _{D7_D8_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 7 e 8
<i>Ran</i> _{D8_D9_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 8 e 9
<i>Ran</i> _{D9_D10_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 9 e 10
<i>Ran</i> _{D10_D11_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 10 e 11
<i>Ran</i> _{D11_D12_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 11 e 12
<i>Ran</i> _{D12_D13_P1}	Relutância da parte superior da ranhura entre os dentes 12 e 13
<i>Ran</i> _{D1_D2_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 1 e 2
<i>Ran</i> _{D2_D3_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 2 e 3
<i>Ran</i> _{D3_D4_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 3 e 4
<i>Ran</i> _{D4_D5_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 4 e 5
<i>Ran</i> _{D5_D6_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 5 e 6
<i>Ran</i> _{D6_D7_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran</i> _{D7_D8_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 7 e 8
<i>Ran</i> _{D8_D9_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 8 e 9
<i>Ran</i> _{D9_D10_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 9 e 10
<i>Ran</i> _{D10_D11_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 10 e 11
<i>Ran</i> _{D11_D12_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 11 e 12
<i>Ran</i> _{D12_D13_P2}	Relutância da parte inferior da ranhura entre os dentes 12 e 13
<i>Ran</i> _{D1_D2_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 1 e 2
<i>Ran</i> _{D2_D3_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 2 e 3
<i>Ran</i> _{D3_D4_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 3 e 4
<i>Ran</i> _{D4_D5_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 4 e 5
<i>Ran</i> _{D5_D6_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 5 e 6
<i>Ran</i> _{D6_D7_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran</i> _{D7_D8_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 7 e 8
<i>Ran</i> _{D8_D9_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 8 e 9
<i>Ran</i> _{D9_D10_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 9 e 10
<i>Ran</i> _{D10_D11_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 10 e 11
<i>Ran</i> _{D11_D12_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 11 e 12
<i>Ran</i> _{D12_D13_P3}	Relutância do colarinho da ranhura entre os dentes 12 e 13
<i>Ran</i> _{D1_D2_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 1 e 2
<i>Ran</i> _{D1_D2_P5}	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 1 e 2
<i>Ran</i> _{D2_D3_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 2 e 3
<i>Ran</i> _{D2_D3_P5}	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 2 e 3
<i>Ran</i> _{D3_D4_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 3 e 4
<i>Ran</i> _{D3_D4_P5}	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 3 e 4
<i>Ran</i> _{D4_D5_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 4 e 5
<i>Ran</i> _{D4_D5_P5}	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 4 e 5
<i>Ran</i> _{D5_D6_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 5 e 6
<i>Ran</i> _{D5_D6_P5}	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 5 e 6
<i>Ran</i> _{D6_D7_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran</i> _{D6_D7_P5}	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran</i> _{D7_D8_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 7 e 8
<i>Ran</i> _{D7_D8_P5}	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 7 e 8
<i>Ran</i> _{D8_D9_P4}	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 8 e 9

$Ran_{D8_D9_P5}$	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 8 e 9
$Ran_{D9_D10_P4}$	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 9 e 10
$Ran_{D9_D10_P5}$	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 9 e 10
$Ran_{D10_D11_P4}$	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 10 e 11
$Ran_{D10_D11_P5}$	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 10 e 11
$Ran_{D11_D12_P4}$	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 11 e 12
$Ran_{D11_D12_P5}$	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 11 e 12
$Ran_{D12_D13_P4}$	Relutância esquerda da abertura da ranhura entre os dentes 12 e 13
$Ran_{D12_D13_P5}$	Relutância direita da abertura da ranhura entre os dentes 12 e 13
$P01_{P1}$	Relutância 1 do polo
$P01_{P2}$	Relutância 2 do polo
$P01_{P3}$	Relutância 3 do polo
$P01_{P4}$	Relutância 4 do polo
$P01_{P5}$	Relutância 5 do polo
$P01_{P6}$	Relutância 6 do polo
$P01_{P7}$	Relutância 7 do polo
$P01_{P8}$	Relutância 8 do polo
$P01_{P9}$	Relutância 9 do polo
$P01_{P10}$	Relutância 10 do polo
$P01_{P11}$	Relutância 11 do polo
$P01_{P12}$	Relutância 12 do polo
$P01_{P13}$	Relutância 13 do polo
$P01_{P14}$	Relutância 14 do polo
$P01_{P15}$	Relutância 15 do polo
$P01_{P16}$	Relutância 16 do polo
$P01_{P17}$	Relutância 17 do polo
$P01_{P18}$	Relutância 18 do polo
$P01_{P19}$	Relutância 19 do polo
$P01_{P20}$	Relutância 20 do polo
$P01_{P21}$	Relutância 21 do polo
$P01_{P22}$	Relutância 22 do polo
$P01_{P23}$	Relutância 23 do polo
$P01_{P24}$	Relutância 24 do polo
$P01_{P25}$	Relutância 25 do polo
$P01_{P26}$	Relutância 26 do polo
$P01_{P27}$	Relutância 27 do polo
$P01_{P28}$	Relutância 28 do polo
$P01_{P29}$	Relutância 29 do polo
$P01_{P30}$	Relutância 30 do polo
$P01_{P31}$	Relutância 31 do polo
$P01_{P32}$	Relutância 32 do polo
$P01_{P33}$	Relutância 33 do polo
$P01_{P34}$	Relutância 34 do polo
$P01_{P35}$	Relutância 35 do polo
$P01_{P36}$	Relutância 36 do polo
$P01_{P37}$	Relutância 37 do polo
$P01_{P38}$	Relutância 38 do polo
$P01_{P39}$	Relutância 39 do polo
$P01_{P40}$	Relutância 40 do polo

<i>P01_{p41}</i>	Relutância 41 do polo
<i>EF_{D1_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 1
<i>EF_{D1_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 1
<i>EF_{D1_D2}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 1 e 2
<i>EF_{D2_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 2
<i>EF_{D2_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 2
<i>EF_{D2_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 2
<i>EF_{D2_D3}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 2 e 3
<i>EF_{D3_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 3
<i>EF_{D3_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 3
<i>EF_{D3_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 3
<i>EF_{D3_D4}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 3 e 4
<i>EF_{D4_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 4
<i>EF_{D4_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 4
<i>EF_{D4_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 4
<i>EF_{D4_D5}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 4 e 5
<i>EF_{D5_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 5
<i>EF_{D5_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 5
<i>EF_{D5_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 5
<i>EF_{D5_D6}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 5 e 6
<i>EF_{D6_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 6
<i>EF_{D6_P2_1}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 6 parte 1
<i>EF_{D6_P2_2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 6 parte 2
<i>EF_{D6_P3_1}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 6 parte 1
<i>EF_{D6_P3_2}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 6 parte 2
<i>EF_{D7_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 7
<i>EF_{D7_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 7
<i>D1_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 1
<i>D1_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 1
<i>D1_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 1
<i>D1_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 1
<i>D1_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 1
<i>D1_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 1
<i>D1_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 1
<i>D1_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 1
<i>D1_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 1
<i>D2_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 2
<i>D2_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 2
<i>D2_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 2
<i>D2_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 2
<i>D2_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 2
<i>D2_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 2
<i>D2_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 2
<i>D2_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 2
<i>D2_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 2
<i>D2_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 2
<i>D2_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 2
<i>D2_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 2

<i>D2_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 2
<i>D3_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 3
<i>D3_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 3
<i>D3_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 3
<i>D3_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 3
<i>D3_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 3
<i>D3_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 3
<i>D3_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 3
<i>D3_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 3
<i>D3_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 3
<i>D3_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 3
<i>D3_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 3
<i>D3_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 3
<i>D3_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 3
<i>D4_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 4
<i>D4_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 4
<i>D4_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 4
<i>D4_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 4
<i>D4_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 4
<i>D4_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 4
<i>D4_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 4
<i>D4_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 4
<i>D4_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 4
<i>D4_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 4
<i>D4_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 4
<i>D4_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 4
<i>D4_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 4
<i>D5_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 5
<i>D5_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 5
<i>D5_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 5
<i>D5_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 5
<i>D5_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 5
<i>D5_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 5
<i>D5_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 5
<i>D5_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 5
<i>D5_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 5
<i>D5_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 5
<i>D5_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 5
<i>D5_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 5
<i>D5_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 5
<i>D6_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 6
<i>D6_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 6
<i>D6_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 6
<i>D6_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 6
<i>D6_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 6
<i>D6_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 6
<i>D6_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 6
<i>D6_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 6
<i>D6_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 6

<i>D6_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 6
<i>D6_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 6
<i>D6_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 6
<i>D6_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 6
<i>D6_{p14}</i>	Relutância 14 do dente 6
<i>D6_{p15}</i>	Relutância 15 do dente 6
<i>D6_{p16}</i>	Relutância 16 do dente 6
<i>D6_{p17}</i>	Relutância 17 do dente 6
<i>D6_{p18}</i>	Relutância 18 do dente 6
<i>D6_{p19}</i>	Relutância 19 do dente 6
<i>D6_{p20}</i>	Relutância 20 do dente 6
<i>D6_{p21}</i>	Relutância 21 do dente 6
<i>D6_{p22}</i>	Relutância 22 do dente 6
<i>D6_{p23}</i>	Relutância 23 do dente 6
<i>D7_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 7
<i>D7_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 7
<i>D7_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 7
<i>D7_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 7
<i>D8_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 8
<i>D8_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 8
<i>D8_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 8
<i>D8_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 8
<i>D8_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 8
<i>D8_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 8
<i>D8_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 8
<i>D8_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 8
<i>D8_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 8
<i>D8_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 8
<i>D8_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 8
<i>D8_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 8
<i>D8_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 8
<i>D8_{p14}</i>	Relutância 14 do dente 8
<i>D8_{p15}</i>	Relutância 15 do dente 8
<i>D8_{p16}</i>	Relutância 16 do dente 8
<i>D8_{p17}</i>	Relutância 17 do dente 8
<i>D8_{p18}</i>	Relutância 18 do dente 8
<i>D8_{p19}</i>	Relutância 19 do dente 8
<i>D8_{p20}</i>	Relutância 20 do dente 8
<i>D8_{p21}</i>	Relutância 21 do dente 8
<i>D8_{p22}</i>	Relutância 22 do dente 8
<i>D8_{p23}</i>	Relutância 23 do dente 8
<i>D9_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 9
<i>D9_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 9
<i>D9_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 9
<i>D9_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 9
<i>D9_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 9
<i>D9_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 9
<i>D9_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 9
<i>D9_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 9

<i>D9_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 9
<i>D9_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 9
<i>D9_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 9
<i>D9_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 9
<i>D9_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 9
<i>D10_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 10
<i>D10_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 10
<i>D10_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 10
<i>D10_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 10
<i>D10_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 10
<i>D10_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 10
<i>D10_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 10
<i>D10_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 10
<i>D10_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 10
<i>D10_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 10
<i>D10_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 10
<i>D10_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 10
<i>D10_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 10
<i>D11_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 11
<i>D11_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 11
<i>D11_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 11
<i>D11_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 11
<i>D11_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 11
<i>D11_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 11
<i>D11_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 11
<i>D11_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 11
<i>D11_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 11
<i>D11_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 11
<i>D11_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 11
<i>D11_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 11
<i>D11_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 11
<i>D12_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 12
<i>D12_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 12
<i>D12_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 12
<i>D12_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 12
<i>D12_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 12
<i>D12_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 12
<i>D12_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 12
<i>D12_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 12
<i>D12_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 12
<i>D12_{p10}</i>	Relutância 10 do dente 12
<i>D12_{p11}</i>	Relutância 11 do dente 12
<i>D12_{p12}</i>	Relutância 12 do dente 12
<i>D12_{p13}</i>	Relutância 13 do dente 12
<i>D13_{p1}</i>	Relutância 1 do dente 13
<i>D13_{p2}</i>	Relutância 2 do dente 13
<i>D13_{p3}</i>	Relutância 3 do dente 13
<i>D13_{p4}</i>	Relutância 4 do dente 13
<i>D13_{p5}</i>	Relutância 5 do dente 13

<i>D13_{p6}</i>	Relutância 6 do dente 13
<i>D13_{p7}</i>	Relutância 7 do dente 13
<i>D13_{p8}</i>	Relutância 8 do dente 13
<i>D13_{p9}</i>	Relutância 9 do dente 13
<i>Ran_{D6_D7_P1}</i>	Relutância 1 da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran_{D6_D7_P2}</i>	Relutância 2 da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran_{D6_D7_P3}</i>	Relutância 3 da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran_{D6_D7_P4}</i>	Relutância 4 da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>Ran_{D6_D7_P5}</i>	Relutância 5 da ranhura entre os dentes 6 e 7
<i>P01_{p1}</i>	Relutância 1 do polo
<i>P01_{p2}</i>	Relutância 2 do polo
<i>P01_{p3}</i>	Relutância 3 do polo
<i>P01_{p4}</i>	Relutância 4 do polo
<i>P01_{p5}</i>	Relutância 5 do polo
<i>P01_{p6}</i>	Relutância 6 do polo
<i>P01_{p7}</i>	Relutância 7 do polo
<i>P01_{p8}</i>	Relutância 8 do polo
<i>P01_{p9}</i>	Relutância 9 do polo
<i>P01_{p10}</i>	Relutância 10 do polo
<i>P01_{p11}</i>	Relutância 11 do polo
<i>P01_{p12}</i>	Relutância 12 do polo
<i>P01_{p13}</i>	Relutância 13 do polo
<i>P01_{p14}</i>	Relutância 14 do polo
<i>P01_{p15}</i>	Relutância 15 do polo
<i>P01_{p16}</i>	Relutância 16 do polo
<i>P01_{p17}</i>	Relutância 17 do polo
<i>P01_{p18}</i>	Relutância 18 do polo
<i>P01_{p19}</i>	Relutância 19 do polo
<i>P01_{p20}</i>	Relutância 20 do polo
<i>P01_{p21}</i>	Relutância 21 do polo
<i>P01_{p22}</i>	Relutância 22 do polo
<i>P01_{p23}</i>	Relutância 23 do polo
<i>P01_{p24}</i>	Relutância 24 do polo
<i>P01_{p25}</i>	Relutância 25 do polo
<i>P01_{p26}</i>	Relutância 26 do polo
<i>P01_{p27}</i>	Relutância 27 do polo
<i>P01_{p28}</i>	Relutância 28 do polo
<i>P01_{p29}</i>	Relutância 29 do polo
<i>P01_{p30}</i>	Relutância 30 do polo
<i>P01_{p31}</i>	Relutância 31 do polo
<i>P01_{p32}</i>	Relutância 32 do polo
<i>P01_{p33}</i>	Relutância 33 do polo
<i>P01_{p34}</i>	Relutância 34 do polo
<i>P01_{p35}</i>	Relutância 35 do polo
<i>P01_{p36}</i>	Relutância 36 do polo
<i>P01_{p37}</i>	Relutância 37 do polo
<i>P01_{p38}</i>	Relutância 38 do polo
<i>P01_{p39}</i>	Relutância 39 do polo
<i>P01_{p40}</i>	Relutância 40 do polo

<i>P01_{p41}</i>	Relutância 41 do polo
<i>P01_{p42}</i>	Relutância 42 do polo
<i>P01_{p43}</i>	Relutância 43 do polo
<i>P01_{p44}</i>	Relutância 44 do polo
<i>P01_{p45}</i>	Relutância 45 do polo
<i>P01_{p46}</i>	Relutância 46 do polo
<i>P01_{p47}</i>	Relutância 47 do polo
<i>P01_{p48}</i>	Relutância 48 do polo
<i>P01_{p49}</i>	Relutância 49 do polo
<i>P01_{p50}</i>	Relutância 50 do polo
<i>P01_{p51}</i>	Relutância 51 do polo
<i>P01_{p52}</i>	Relutância 52 do polo
<i>P01_{p53}</i>	Relutância 53 do polo
<i>P01_{p54}</i>	Relutância 54 do polo
<i>P01_{p55}</i>	Relutância 55 do polo
<i>P01_{p56}</i>	Relutância 56 do polo
<i>P01_{p57}</i>	Relutância 57 do polo
<i>P01_{p58}</i>	Relutância 58 do polo
<i>P01_{p59}</i>	Relutância 59 do polo
<i>P01_{p60}</i>	Relutância 60 do polo
<i>P01_{p61}</i>	Relutância 61 do polo
<i>P01_{p62}</i>	Relutância 62 do polo
<i>P01_{p63}</i>	Relutância 63 do polo
<i>P01_{p64}</i>	Relutância 64 do polo
<i>P01_{p65}</i>	Relutância 65 do polo
<i>P01_{p66}</i>	Relutância 66 do polo
<i>P01_{p67}</i>	Relutância 67 do polo
<i>P01_{p68}</i>	Relutância 68 do polo
<i>P01_{p69}</i>	Relutância 69 do polo
<i>P01_{p70}</i>	Relutância 70 do polo
<i>P01_{p71}</i>	Relutância 71 do polo
<i>P01_{p72}</i>	Relutância 72 do polo
<i>P01_{p73}</i>	Relutância 73 do polo
<i>P01_{p74}</i>	Relutância 74 do polo
<i>P01_{p75}</i>	Relutância 75 do polo
<i>P01_{p76}</i>	Relutância 76 do polo
<i>P01_{p77}</i>	Relutância 77 do polo
<i>P01_{p78}</i>	Relutância 78 do polo
<i>P01_{p79}</i>	Relutância 79 do polo
<i>P01_{p80}</i>	Relutância 80 do polo
<i>P01_{p81}</i>	Relutância 81 do polo
<i>P01_{p82}</i>	Relutância 82 do polo
<i>P01_{p83}</i>	Relutância 83 do polo
<i>P01_{p84}</i>	Relutância 84 do polo
<i>P01_{p85}</i>	Relutância 85 do polo
<i>P01_{p86}</i>	Relutância 86 do polo
<i>P01_{p87}</i>	Relutância 87 do polo
<i>P01_{p88}</i>	Relutância 88 do polo
<i>P01_{p89}</i>	Relutância 89 do polo

<i>Po1_{p90}</i>	Relutância 90 do polo
<i>Po1_{p91}</i>	Relutância 91 do polo
<i>Po1_{p92}</i>	Relutância 92 do polo
<i>Po1_{p93}</i>	Relutância 93 do polo
<i>Po1_{p94}</i>	Relutância 94 do polo
<i>Po1_{p95}</i>	Relutância 95 do polo
<i>Po1_{p96}</i>	Relutância 96 do polo
<i>Po1_{p97}</i>	Relutância 97 do polo
<i>Po1_{p98}</i>	Relutância 98 do polo
<i>Po1_{p99}</i>	Relutância 99 do polo
<i>Po1_{p100}</i>	Relutância 100 do polo
<i>Po1_{p101}</i>	Relutância 101 do polo
<i>EF_{D1_P1_1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 1 parte 1
<i>EF_{D1_P1_2}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 1 parte 2
<i>EF_{D1_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 1
<i>EF_{D1_D2_1}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 1 e 2 parte 1
<i>EF_{D1_D2_2}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 1 e 2 parte 2
<i>EF_{D2_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 2
<i>EF_{D2_P2_1}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 2 parte 1
<i>EF_{D2_P2_2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 2 parte 2
<i>EF_{D2_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 2
<i>EF_{D2_D3_1}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 2 e 3 parte 1
<i>EF_{D2_D3_2}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 2 e 3 parte 2
<i>EF_{D3_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 3
<i>EF_{D3_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 3
<i>EF_{D3_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 3
<i>EF_{D3_D4}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 3 e 4
<i>EF_{D4_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 4
<i>EF_{D4_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 4
<i>EF_{D4_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 4
<i>EF_{D4_D5}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 4 e 5
<i>EF_{D5_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 5
<i>EF_{D5_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 5
<i>EF_{D5_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 5
<i>EF_{D5_D6}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 5 e 6
<i>EF_{D6_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 6
<i>EF_{D6_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 6
<i>EF_{D6_P3_1}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 6 parte 1
<i>EF_{D6_P3_2}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 6 parte 2
<i>EF_{D7}</i>	Relutância do entreferro presente abaixo do dente 7
<i>EF_{D8_P1_1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 8 parte 1
<i>EF_{D8_P1_2}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 8 parte 2
<i>EF_{D8_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 8
<i>EF_{D8_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 8
<i>EF_{D9_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 9
<i>EF_{D9_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 9
<i>EF_{D9_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 9

<i>EF_{D10_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 10
<i>EF_{D10_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 10
<i>EF_{D10_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 10
<i>EF_{D11_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 11
<i>EF_{D11_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 11
<i>EF_{D11_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 11
<i>EF_{D11_D12_1}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 11 e 12 parte 1
<i>EF_{D11_D12_2}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 11 e 12 parte 2
<i>EF_{D12_P1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 12
<i>EF_{D12_P2_1}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 12 parte 1
<i>EF_{D12_P2_2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 12 parte 2
<i>EF_{D12_P3}</i>	Relutância 3 do entreferro presente abaixo do dente 12
<i>EF_{D12_D13_1}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 12 e 13 parte 1
<i>EF_{D12_D13_2}</i>	Relutância do entreferro entre os dentes 12 e 13 parte 2
<i>EF_{D13_P1_1}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 13 parte 1
<i>EF_{D13_P1_2}</i>	Relutância 1 do entreferro presente abaixo do dente 13 parte 2
<i>EF_{D13_P2}</i>	Relutância 2 do entreferro presente abaixo do dente 13
<i>EF₁</i>	Relutância 1 do entreferro
<i>EF₂</i>	Relutância 2 do entreferro
<i>EF₃</i>	Relutância 3 do entreferro
<i>EF₄</i>	Relutância 4 do entreferro
<i>EF₅</i>	Relutância 5 do entreferro
<i>EF₆</i>	Relutância 6 do entreferro
<i>EF₇</i>	Relutância 7 do entreferro
<i>EF₈</i>	Relutância 8 do entreferro
<i>EF₉</i>	Relutância 9 do entreferro
<i>EF₁₀</i>	Relutância 10 do entreferro
<i>EF₁₁</i>	Relutância 11 do entreferro
<i>EF₁₂</i>	Relutância 12 do entreferro
<i>EF₁₃</i>	Relutância 13 do entreferro
<i>EF₁₄</i>	Relutância 14 do entreferro
<i>EF₁₅</i>	Relutância 15 do entreferro
<i>EF₁₆</i>	Relutância 16 do entreferro
<i>EF₁₇</i>	Relutância 17 do entreferro
<i>EF₁₈</i>	Relutância 18 do entreferro
<i>EF₁₉</i>	Relutância 19 do entreferro
<i>EF₂₀</i>	Relutância 20 do entreferro
<i>D7_{P1}</i>	Relutância 1 do dente 7
<i>D7_{P2}</i>	Relutância 2 do dente 7
<i>D7_{P3}</i>	Relutância 3 do dente 7
<i>D7_{P4}</i>	Relutância 4 do dente 7
<i>D7_{P5}</i>	Relutância 5 do dente 7

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Contextualização do tema	26
1.2	Proposta da dissertação	28
1.3	Justificativa	29
1.4	Objetivos	32
1.4.1	Objetivo geral	32
1.4.2	Objetivos específicos.....	32
1.5	Contribuições	32
1.6	Publicações	33
1.7	Organização da dissertação	33
2	GERADOR SÍNCRONO	35
2.1	Aspectos construtivos	35
2.1.1	Estator	35
2.1.2	Rotor.....	36
2.2	Princípio de funcionamento do gerador síncrono	40
2.2.1	Criação do campo magnético	40
2.2.2	Indução de tensão na armadura.....	41
2.2.3	Tensão Terminal.....	42
<u>2.2.3.1</u>	<u>Quedas de tensão nas máquinas</u>	<u>42</u>
2.2.3.1.1	<i>Tensão terminal em máquinas de polos lisos</i>	45
2.2.3.1.2	<i>Tensão terminal em máquinas de polos salientes</i>	47
3	REDE DE RELUTÂNCIA	51
3.1	Exemplo de modelagem de um circuito eletromagnético com rede de relutâncias	52
3.1.1	Implementação no reluctool	55
3.2	Aplicação de redes de relutâncias á análise e projeto de geradores síncronos	58
4	METODOLOGIA PARA A CONSTRUÇÃO DA REDE DE RELUTÂNCIAS PROPOSTA	60
4.1	Método de obtenção das reatâncias	60
4.2	Análise do comportamento do fluxo magnético	62
4.3	Construção de rede de relutâncias	65
4.3.1	Definição das fontes de força magnetomotrizes.....	65
4.3.2	Definição da geometria da rede de relutâncias	68

<u>4.3.2.1</u>	<u>Rede de relutâncias para o cálculo da reatância do eixo direto</u>	<u>68</u>
<u>4.3.2.2</u>	<u>Rede de relutâncias para o cálculo da reatância do eixo em quadratura</u>	<u>71</u>
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1	Análise de robustez.....	81
5.1.1	Variação de densidade de corrente para máquina de entreferro constante	81
5.1.2	Verificação e variação de densidade de corrente para máquina de entreferro variável	83
6	CONCLUSÃO	89

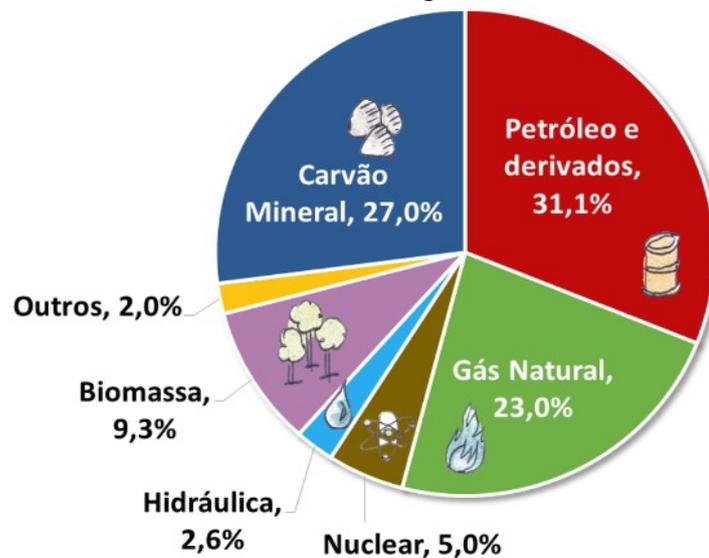
1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

A segunda revolução industrial, que teve início em meados do século XVIII, representou uma etapa de intensas e profundas mudanças na sociedade. Dentre essas transformações pode-se citar o surgimento das indústrias decorrente do avanço tecnológico vivido na época, que causou a substituição do trabalho manual humano pelo trabalho gerado por máquinas que utilizavam, para a produção de energia, recursos naturais como vento, vapor e água (HOBSBAWM, 2012).

Como ilustrado no Gráfico 1, os combustíveis fósseis (carvão, gás natural e petróleo) são responsáveis por, aproximadamente, 81% de toda a energia elétrica mundial produzida (IEA, 2021). Entretanto, essas fontes de energia, além de serem prejudiciais ao planeta, são classificadas como não renováveis, ou seja, sua reposição natural é mais lenta que sua utilização, de modo que isso pode levar ao seu esgotamento.

Gráfico 1 - Matriz energética mundial



Fonte: IEA (2021)

As fontes de energia, vistas na Tabela 1, podem ser classificadas como não renováveis ou renováveis, ou seja, as que não se regeneram ao longo do tempo e as que se regeneram ao passar do tempo. Além disso, elas também podem ser categorizadas como fontes primárias ou secundárias. As fontes ditas primárias são aquelas provenientes diretamente da natureza, ou seja, não passaram por nenhum

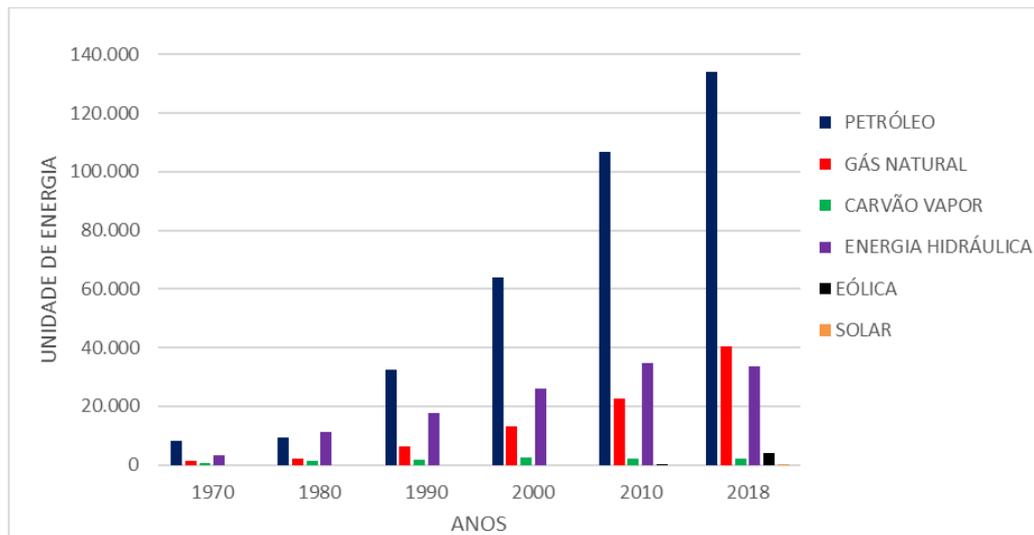
processo de mudança ou transformação. Já as fontes classificadas como secundárias são as fontes primárias que passaram por um processo de transformação.

Tabela 1 – Tipos de fontes

Fontes		Energia primária	Energia secundária	
Não-renováveis	Fósseis	carvão mineral	termoelectricidade, calor, combustível para transporte	
		petróleo e derivados		
		gás natural		
	Nuclear	materiais físséis	termoelectricidade, calor	
Renováveis	"Tradicionais"	biomassa primitiva: lenha de desmatamento	calor	
	"Convencionais"	potenciais hidráulicos de médio e grande porte	hidreletricidade	
		potenciais hidráulicos de pequeno porte		
	"Novas"	biomassa "moderna": lenha replantada, culturas energéticas (cana-de-açúcar, óleos vegetais)	biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoelectricidade, calor	
		outros	energia solar	calor, eletricidade fotovoltaica
			geotermal	calor e eletricidade
			eólica	eletricidade
maremotriz e das ondas				

Fonte: Goldemberg e Lucon (2007)

Considerando os problemas de esgotamento de reserva natural, impactos ambientais e problemas climáticos causados pela liberação de gases poluentes na queima dos combustíveis fósseis, ocorreu, então, uma preocupação em se iniciar um processo de substituição das fontes não renováveis e poluentes pelas fontes de energias renováveis e não poluentes para a geração de energia elétrica. Apesar de ainda existir uma ampla utilização dos combustíveis fósseis para a produção de energia, percebe-se, através da Gráfico 2 (EPE, 2019), um aumento do aproveitamento das fontes ditas limpas para geração de energia.

Gráfico 2 – Evolução da utilização das fontes energéticas

Fonte: Baseado nas informações do EPE (2019)

O principal modo de geração de energia elétrica é através da utilização de máquinas elétricas. Segundo Chapman (2013), uma máquina elétrica é um dispositivo que pode converter energia elétrica em mecânica ou vice-versa. Quando uma máquina converte energia elétrica em mecânica ela é chamada de motor; quando esse dispositivo faz o procedimento inverso, é denominado gerador.

Na grande maioria das unidades de geração de energia são utilizados geradores síncronos (DEL TORO, 1999). Geralmente essas máquinas são empregadas em usinas hidrelétricas, nucleares, centrais térmicas e eólicas para a produção de energia elétrica. Estima-se que, apesar das constantes pesquisas para o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologia de conversão de energia, o gerador síncrono ainda vai continuar sendo utilizado até o próximo século (PCSEN, 2013).

1.2 Proposta da dissertação

Geradores síncronos são de extrema importância para a humanidade, pois além de serem o principal componente para a geração de energia elétrica mundial, conseguem fornecer energia elétrica de forma emergencial (normalmente acionados por motores diesel) para locais como hospitais, aeroportos e prédios comerciais, que não podem ficar sem o abastecimento de energia. No setor industrial, os geradores de emergência conseguem reduzir prejuízos financeiros gerados pela falta de energia e reduzir o consumo durante o horário de pico. Por fim, eles também são empregados em regiões onde o acesso à rede elétrica é difícil ou inexistente, levando energia elétrica a diversas cidades e vilas remotas.

Além dos fatos já citados, que mostram a importância dessas máquinas para a sociedade, a utilização de novas fontes limpas para a produção de energia requer novos projetos de geradores. Assim, torna-se interessante conhecer o processo para o desenvolvimento desses dispositivos. Os geradores síncronos podem ser de polos lisos ou de polos salientes. Muitas aplicações, como as hidrelétricas, empregam geradores de polos salientes (mais adequados à operação em baixa rotação), enquanto outras, como as termelétricas, utilizam geradores de polos lisos (mais adequados à operação em alta rotação).

Segundo Pyrhönen, Jokinen e Hrabovcová (2008), o projeto de gerador síncrono de polos salientes é complexo e possui diversas etapas, sendo o cálculo das reatâncias dos eixos direto e de quadratura uma delas. O cálculo destas reatâncias é imprescindível para o projeto de geradores síncronos, pois representam a queda de tensão devido à reação de armadura, sendo necessárias para se obter a tensão terminal do gerador.

De acordo com Hendershot e Miller (2010), existem três modos de se calcular as referidas reatâncias. A primeira maneira é através da simulação por elementos finitos. Porém, apesar de possuir boa precisão, essa solução requer grande tempo de processamento computacional e tempo para o desenvolvimento do modelo. O segundo modo é por método analítico. Este método é muito rápido, mas ele apresenta baixa precisão para máquinas com geometrias complexas, como geradores síncronos de polos salientes. Por fim, o terceiro método é através da implementação de uma rede de relutâncias (circuitos magnéticos), que possui velocidade e precisão adequadas em seus cálculos.

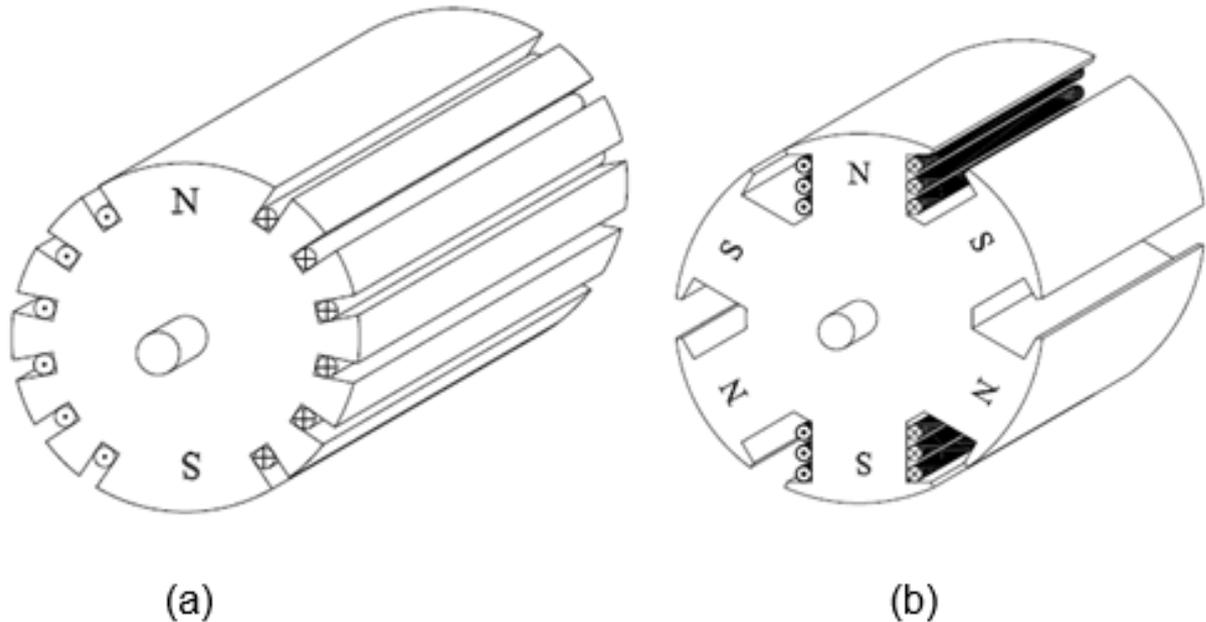
Assim, por existir pouca bibliografia referente a essa utilidade, o objetivo dessa dissertação é o de desenvolver uma metodologia para a criação de duas redes de relutâncias para máquinas síncronas de polos salientes: uma dedicada ao cálculo da reatância do eixo direto e outra destinada ao cálculo da reatância de eixo em quadratura.

1.3 Justificativa

Segundo Bim (2014), as máquinas síncronas se dividem em dois grupos em relação ao tipo de rotor, sendo eles: polos salientes e polos lisos. O rotor de polos salientes apresenta relutâncias variáveis no entreferro em função de sua posição,

enquanto o rotor de polos lisos apresenta relutância constante no entreferro. Pode-se distinguir através da Figura 1, um rotor de polos lisos e um rotor de polos salientes.

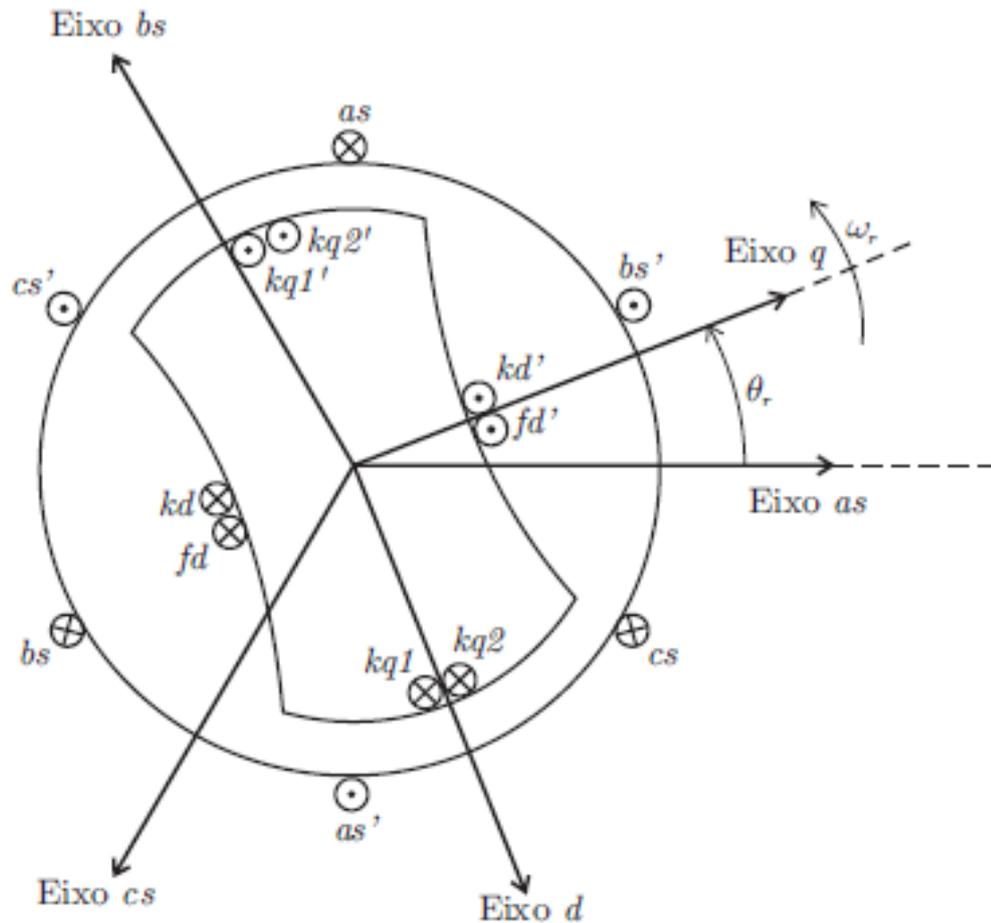
Figura 1 – Tipo de rotor: (a) Rotor de polos lisos e (b) Rotor de polos salientes



Fonte: Bim (2014)

O projeto para a criação de um gerador síncrono de polos lisos, como proposto por Hebala, Ghoneim e Ashour (2019), é mais simples e fácil de se conceber, visto que o rotor de polos lisos possui relutância constante no entreferro, o que possibilita que a relutância seja calculada analiticamente com boa precisão. Já as máquinas elétricas com rotor de polos salientes têm relutância variável, pois a região entre dois polos é bem mais distante do estator que a região central do polo. Desse modo há a necessidade de se aplicar um modelo que possibilite o cálculo das reatâncias nos eixos de quadratura (eixo q) e direto (eixo d). O eixo de quadratura corresponde ao eixo entre dois polos, ou entre duas saliências, perpendicular ao eixo do rotor, enquanto o eixo direto corresponde ao eixo na direção do polo, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Representação dos eixos direto e em quadratura em uma máquina de dois polos



Fonte: Sadowski (2012)

Para máquinas síncronas de polos salientes, não é aconselhado realizar o cálculo das reatâncias de eixo direto e quadratura de forma analítica, uma vez que qualquer equação desenvolvida pode não apresentar bons resultados para máquinas de diferentes topologias (HENDERSHOT; MILLER, 2010). Assim, para máquinas que possuam uma geometria mais complexa, normalmente utiliza-se simulação por elementos finitos para determinar suas reatâncias.

Por necessitar do uso de simulação, o processo para se calcular as reatâncias de um gerador síncrono de polos salientes é mais complexo e demorado, se comparado com o procedimento analítico executado para a obtenção da reatância de uma máquina de polos lisos. Outra solução possível para se obter as reatâncias dos eixos direto e em quadratura é o uso de redes de relutâncias. A solução de simulação por elementos finitos pode demorar de alguns minutos a algumas horas, enquanto a solução da rede de relutâncias normalmente leva poucos segundos em computadores comuns, por isso, apesar da simulação ser amplamente utilizada, alguns trabalhos recomendam a criação de um rede de relutâncias (BAZZO; MOURA; CARLSON,

2021). Além disso, é interessante comentar que a utilização de elementos finitos não é recomendada para o processo de otimização, visto que esse procedimento requer cálculos a cada iteração, provocando um grande peso computacional.

Assim, a motivação desta dissertação é elaborar uma metodologia para a criação de redes de relutâncias que possibilitem os cálculos das relutâncias dos eixos direto e em quadratura de forma rápida e precisa, ou seja, aliando a precisão do método numérico com o tempo de solução do método analítico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é criar redes de relutâncias que possibilitem o cálculo das relutâncias dos eixos direto e em quadratura para auxiliar no projeto de geradores síncronos de rotor bobinado com polos salientes.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Compreender o funcionamento do gerador síncrono;
- Entender as etapas envolvidas no projeto de um gerador síncrono;
- Pesquisar sobre redes de relutâncias;
- Implementar redes de relutâncias para o projeto de geradores síncronos;
- Validar as redes de relutâncias propostas através da comparação de seus resultados com simulação por elementos finitos;
- Analisar a robustez das redes de relutâncias, aplicando-as a diferentes geradores e níveis de saturação.

1.5 Contribuições

Existem diversos trabalhos acadêmicos onde as redes de relutâncias são empregadas, entretanto nenhum deles descreve o procedimento para desenvolvimento dessas redes. Diferente desses trabalhos, verifica-se nesta dissertação, por meio da metodologia proposta, o processo detalhado de desenvolvimento de redes de relutâncias estáticas para geradores síncronos.

1.6 Publicações

Percebe-se, na Tabela 2, as publicações resultantes do desenvolvimento desta dissertação.

Tabela 2 – Publicações

Evento / Periódico	Título	Autores
Momag (2020) 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – Conferência nacional	Procedimento para criar redes de relutâncias para modelar as reatâncias de eixo direto e em quadratura de geradores síncronos	Vinicius de Oliveira Moura Paulo Cesar Neves Jr. Gustavo Garbelini Menezes Thiago de Paula Machado Bazzo
Journal Energies (2021)	A Step-by-Step Procedure to Perform Preliminary Designs of Salient-Pole Synchronous Generators	Thiago de Paula Machado Bazzo Vinicius de Oliveira Moura Renato Carlson
Induscon (2021) 14th International Conference on Industry Applications – Conferência internacional	Projeto Ótimo de um Gerador Síncrono de Polos Salientes utilizando Redes de Relutâncias	João Victor Thiago de Paula Machado Bazzo Vinicius de Oliveira Moura

Fonte: Autoria Própria (2022)

1.7 Organização da dissertação

Esta dissertação é dividida em 6 capítulos, sendo eles sumariamente a introdução, o gerador síncrono em si, rede de relutâncias, desenvolvimento de redes, resultados e discussões, e conclusão.

Neste primeiro capítulo expõe-se uma breve contextualização do tema, onde se comenta sobre a importância da energia para a sociedade, a matriz energética mundial e a principal forma de geração de energia elétrica. Em seguida são apresentadas a proposta e a justificativa, ou seja, o que se está pesquisando e o porquê de se desenvolver esta pesquisa. Por fim, são apresentados os objetivos geral e específicos, que devem ser alcançados na realização dessa dissertação.

O princípio de funcionamento do gerador síncrono, características construtivas, circuitos equivalentes, diagramas fasoriais e equações estão contidos no capítulo dois.

O terceiro capítulo trata do que é uma rede de relutâncias. Além disso apresenta o *software* onde as redes foram modeladas. Por fim, também descreve um exemplo do processo utilizado para desenvolver as redes de relutâncias propostas.

O desenvolvimento passo a passo das redes de relutâncias propostas é apresentado no capítulo quarto.

O quinto capítulo apresenta os resultados, bem como a verificação deles através de comparação com simulação em elementos finitos.

As conclusões do desenvolvimento e da implementação dessa pesquisa são mostradas no capítulo seis.

2 GERADOR SÍNCRONO

Uma máquina é dita síncrona quando sua velocidade, em condições normais, é proporcional à frequência da rede em que ela está conectada. Além disso, o rotor gira na mesma velocidade que o campo magnético girante do estator. (FITZGERALD, 2003).

2.1 Aspectos construtivos

O gerador síncrono é construído de duas partes principais: uma parte fixa, chamada de estator, onde se encontram os enrolamentos de armadura, e outra parte móvel, conhecida como rotor, onde está contido o enrolamento de campo.

2.1.1 Estator

O estator da máquina síncrona também é similar ao do motor de indução. Ele é formado pela carcaça, por enrolamentos de armadura (normalmente constituídos de condutores de cobre), e por chapas de aço para fins elétrico formando um núcleo magnético, o qual possui ranhuras para alojar os enrolamentos de armadura. A alta permeabilidade das chapas gera um caminho magnético de baixa relutância que conforma o fluxo e reduz a sua dispersão. Nas máquinas trifásicas, grande maioria dos geradores síncronos, as bobinas da armadura são arranjadas de modo que suas fases apresentem uma defasagem de 120° elétricos entre si (DEL TORO, 1999). A carcaça, normalmente constituída de ferro, geralmente possui aletas que facilitam a troca térmica com o ambiente externo e suporta toda a estrutura da máquina, além de fornecer proteção mecânica à parte ativa da máquina. No caso de geradores de grande porte, há outros acessórios que ajudam na dissipação do calor. A Figura 3 mostra um estator de uma máquina de pequeno porte.

Figura 3 – Exemplo de um estator de uma máquina síncrona



Fonte: Hughes (2006)

2.1.2 Rotor

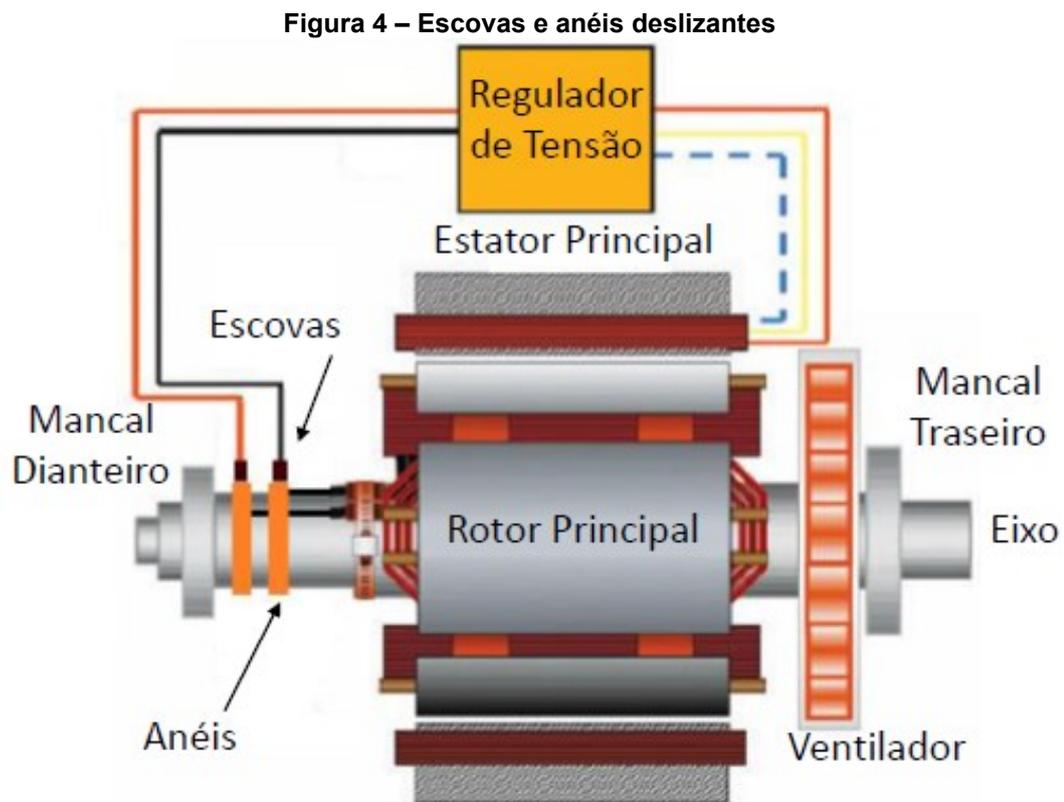
Apesar do rotor ser usualmente constituído de chapas laminadas sobrepostas que, geralmente, são de material semelhante ao do estator, existem máquinas de polos salientes em que os polos são maciços. O rotor também é formado pelo eixo, de aço com alta resistência mecânica, onde é aplicada a força mecânica que rotaciona a máquina; e pelos mancais, que podem ser constituídos de rolamentos esféricos ou cilíndricos, e têm a função de conectar o eixo à carcaça e ao estator.

Como pode ser visto na Figura 1, o rotor pode apresentar duas configurações: polos lisos ou polos salientes. Sendo que o primeiro possui enrolamento inserido em ranhuras, enquanto o segundo contém enrolamento concentrado em torno dos polos. Apesar de possuírem modelos equivalentes diferentes, as máquinas de polos lisos e salientes possuem o mesmo princípio de funcionamento (BIM, 2014).

O rotor de polo cilíndrico ou liso normalmente apresentam poucos polos, geralmente dois ou quatro, e operam em alta velocidade. Possuem diâmetro pequeno, grande comprimento e são normalmente acionados por turbinas a vapor. Já os rotores de polos salientes, muitas vezes têm grande número de polos e funcionam em baixa rotação. Eles apresentam diâmetro grande, comprimento relativamente pequeno (em

comparação com as máquinas com poucos polos) e são o tipo mais usado quando o acionamento é realizado por turbinas hidráulicas (SEN, 2013).

O campo magnético do rotor pode ser obtido de duas maneiras. A primeira é através de ímãs permanentes, fixados no rotor. A segunda maneira é através da aplicação de corrente CC num enrolamento de campo, que deve ser inserido nas ranhuras do rotor (máquinas de polos lisos) ou enrolados em torno dos polos (máquinas de polos salientes). Caso o rotor seja do tipo rotor bobinado, é necessária a presença de uma estrutura especial para levar a corrente CC até o enrolamento do rotor, uma vez que ele está rotacionando e a fonte de corrente CC normalmente é estática. Pode-se fornecer essa corrente através de escovas e anéis coletores ou por meio de uma fonte especial, instalada no eixo do gerador. O regulador de tensão tem como função controlar a tensão de saída através do fornecimento de corrente ao campo do rotor. Pode-se verificar, na Figura 4, uma excitação com escovas.



Fonte: Adaptado de Greg Laliberte (2020)

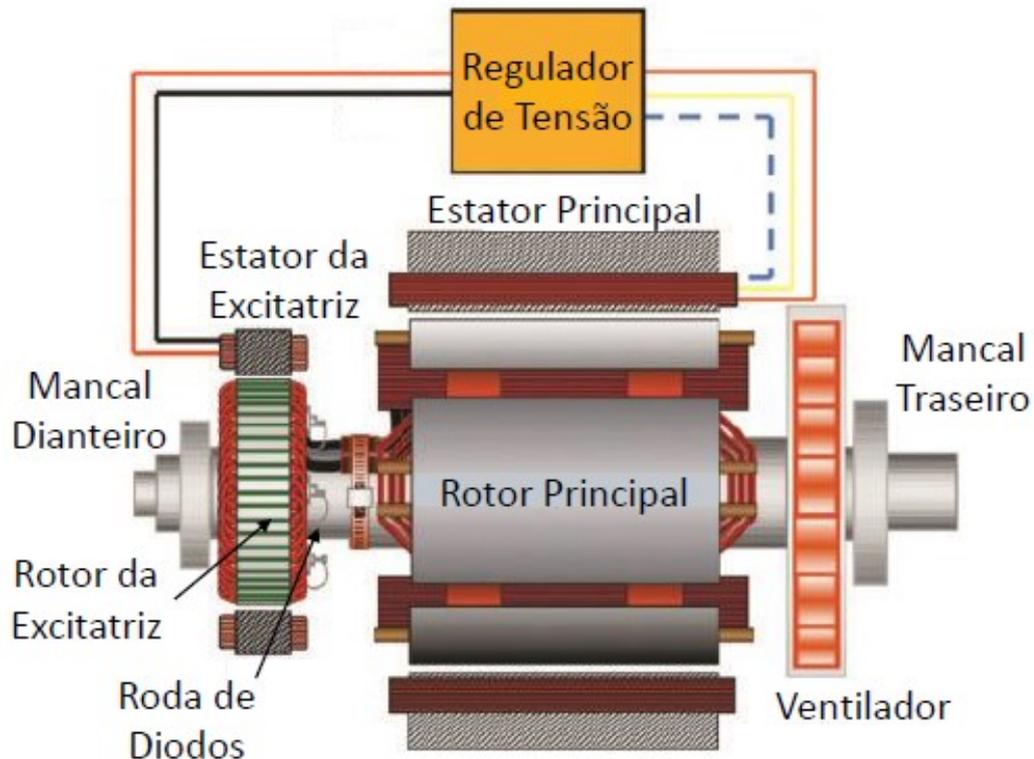
Os anéis coletores, também conhecidos como anéis deslizantes, são estruturas de cobre que abrangem, por completo, o eixo da máquina e são isoladas eletricamente do mesmo. Além de cada anel coletor estar ligado a uma extremidade do enrolamento do rotor, eles também estão conectados às escovas. Uma escova é

um bloco de grafite (carbono), que conduz eletricidade e tem pouco atrito, reduzindo o desgaste. Como o cobre dos anéis deslizantes é um material mais duro que o grafite das escovas, a maior parte do desgaste ocorre nas escovas, que necessitam de manutenção constante. Essa estrutura possibilita que uma tensão CC seja, continuamente, imposta ao enrolamento de campo, independentemente da velocidade de rotação e da posição angular. Apesar de resolver o problema de fornecimento de corrente ao enrolamento de campo, esse conjunto de anéis coletores e escovas pode levar a um aumento da necessidade de manutenção da máquina, visto que o desgaste das escovas deve ser acompanhado frequentemente. Como as escovas possuem resistência elétrica (igual a qualquer condutor), há uma perda de potência adicional gerada pela nas escovas. Mesmo com esses problemas, essa combinação de escovas com anéis coletores é utilizada em diversas aplicações.

Outra forma de fornecer corrente CC de campo para as máquinas é através da utilização de excitatrizes rotativas, sem necessidade de escovas. A excitatriz rotativa se consiste em um pequeno gerador síncrono acoplado no mesmo eixo do gerador, com seu circuito de armadura montado no rotor e seu circuito de campo montado no estator. Como não possuem contatos mecânicos, como os anéis e escovas, a excitação sem escovas apresenta menor grau de manutenção (CHAPMAN, 2013). As tensões alternadas induzidas no rotor são retificadas por meio de diodos instalados no eixo da máquina, o que possibilita o fornecimento de corrente CC ao rotor do gerador.

A Figura 5 mostra um gerador síncrono com excitação sem escovas, com uma excitatriz rotativa instalada em seu eixo.

Figura 5 – Estrutura de uma excitatriz



Fonte: Adaptado de Greg Laliberte (2020)

O regulador de tensão nessa estrutura também tem o papel de controlar a tensão de saída, entretanto dessa vez o fornecimento da corrente CC é para o campo da excitatriz, não para o campo do gerador principal. Além do enrolamento de campo, o rotor pode possuir um outro enrolamento chamado de enrolamento de amortecimento. Esse enrolamento é semelhante à gaiola do rotor da máquina de indução, e está inserido em ranhuras dispostas nas extremidades do rotor da máquina síncrona, curto-circuitadas entre si nas extremidades. Uma de suas funções é amortecer transitórios decorrentes de alterações bruscas de velocidade de rotação, dando maior estabilidade à máquina. Neste enrolamento não ocorre a indução de tensão (consequentemente não há circulação de corrente) da componente fundamental quando o gerador opera em regime permanente, pois o campo girante criado pelas correntes da armadura está na mesma frequência que o rotor (velocidade síncrona). Entretanto, as harmônicas criam campos com frequências diferentes da fundamental, que não estão em sincronia com o rotor. Desse modo, há a indução de correntes nas barras deste enrolamento. As correntes induzidas pelas harmônicas criam fluxos que atuam de forma a reduzir as harmônicas. Um enrolamento de amortecimento pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Enrolamento de amortecimento

Fonte: Chapman (2013)

2.2 Princípio de funcionamento do gerador síncrono

O princípio de funcionamento de um gerador síncrono pode ser descrito através de três etapas. A primeira é a criação do campo magnético (Lei de Ampère), a segunda é a indução de tensão de armadura (Lei de Faraday) e por fim, a queda de tensão que influencia diretamente a tensão terminal da máquina.

2.2.1 Criação do campo magnético

Sabe-se, por meio da lei de Ampère, que ao se aplicar uma corrente em um condutor ocorre o surgimento de campo magnético. A equação (1) descreve essa lei (BASTOS, 2012).

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (1)$$

sendo:

\vec{H} o campo magnético em A/m;

I a corrente em A;

\vec{dl} é um elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração.

Como primeiro passo para o funcionamento do gerador, deve-se criar o campo magnético principal da máquina alimentando seu enrolamento de campo, que fica localizado no rotor da máquina. Desta forma, é criado um campo magnético constante no tempo.

2.2.2 Indução de tensão na armadura

Caso o gerador seja acionado por uma máquina primária, o rotor passa a girar. Desta forma, o campo criado no rotor, que é constante no tempo, passa a ter uma variação espacial. Do ponto de vista do enrolamento de armadura, que é estático, este campo passa a ter uma variação temporal, o que implica na indução de tensão nas bobinas da armadura (BASTOS, 2012). Esse efeito que ocorre com o surgimento de uma tensão induzida através da variação de fluxo magnético em um circuito é conhecido como lei de Faraday:

$$\vec{E}(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

onde:

\vec{E} é a tensão induzida em V;

N é o número de espiras;

Φ é o fluxo magnético em Wb;

t é o tempo em s.

Por se tratar de uma máquina síncrona, a frequência elétrica produzida está associada à velocidade mecânica de rotação do gerador. A equação (3) descreve essa relação (CHAPMAN, 2013).

$$elf_{se} = \frac{n_m \cdot P}{120} \quad (3)$$

onde:

eIf_{se} é a frequência elétrica em Hz;

n_m é a velocidade mecânica do rotor em rpm;

P é o número de polos.

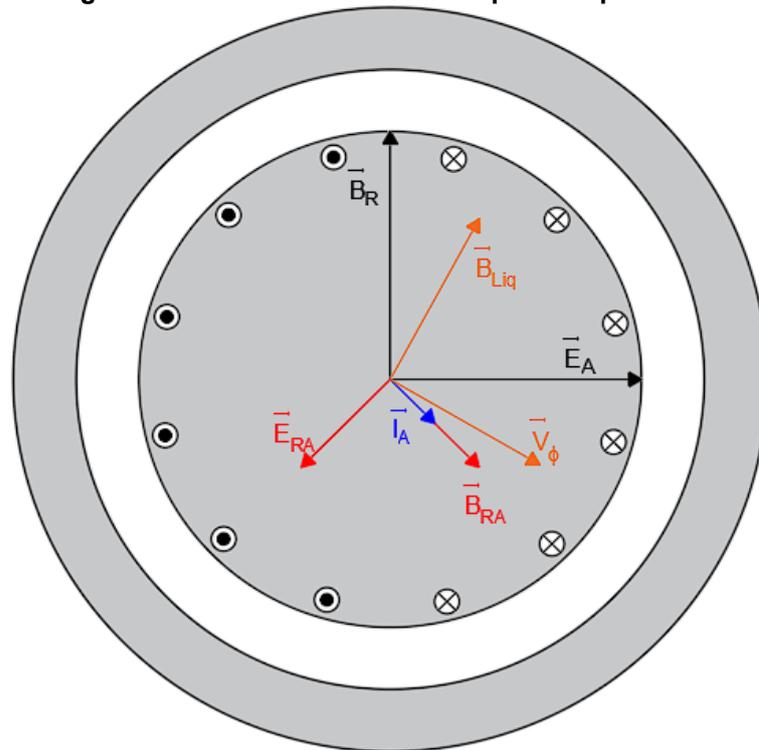
2.2.3 Tensão Terminal

Para determinar a tensão terminal de um gerador é preciso, primeiramente, entender suas quedas de tensões.

2.2.3.1 Quedas de tensão nas máquinas

Através da Figura 7 é possível analisar a queda de tensão de uma máquina de polos lisos decorrente da reação de armadura, não levando em conta assim as quedas causadas pela circulação de corrente alternada na armadura, que possui resistência e indutância. Observa-se que o campo magnético \vec{B}_R induz uma tensão interna \vec{E}_A , que é proporcional e está atrasada 90° em relação a ele. Segundo Chapman (2013), quando uma carga é conectada nos terminais de um gerador ocorre a circulação de uma corrente \vec{I}_A nos enrolamentos de armadura. Essa corrente \vec{I}_A cria um campo magnético próprio (reação de armadura) \vec{B}_{RA} , que acaba por distorcer e enfraquecer o campo principal \vec{B}_R criado pelo rotor, produzindo um campo líquido resultante. Esse campo líquido \vec{B}_{luq} induz uma tensão terminal \vec{V}_ϕ , que também é proporcional e está atrasada 90° ao campo que a gerou.

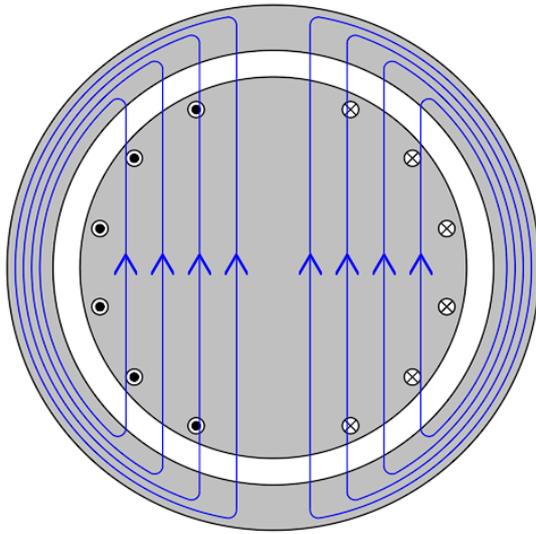
Figura 7 – Fasores sobre uma máquina de polos lisos



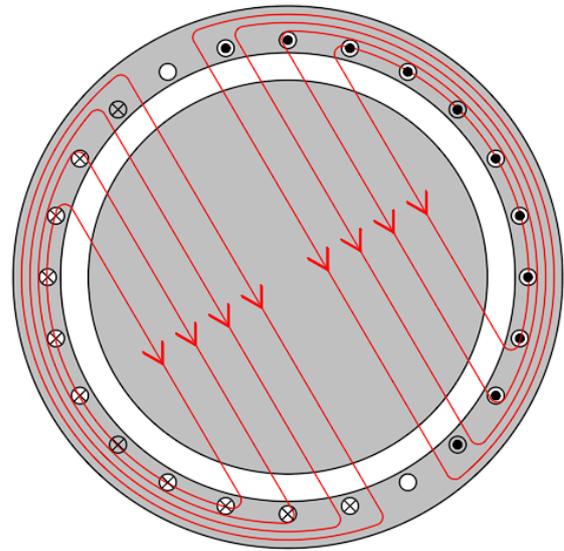
Fonte: Autoria Própria (2022)

A Figura 8 apresenta o comportamento típico dos campos principal, de reação de armadura e resultante para uma máquina de dois polos.

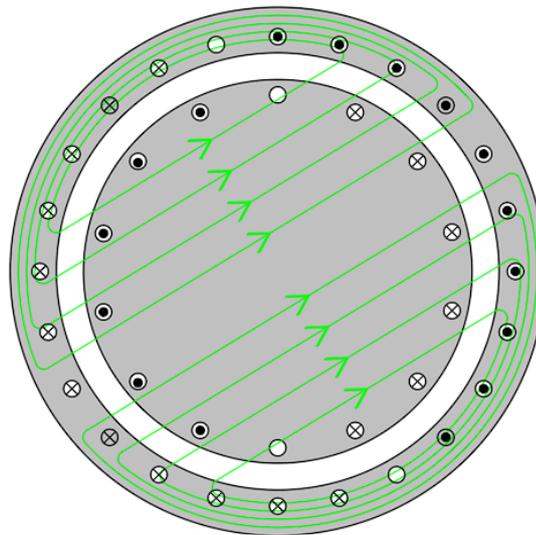
Figura 8 – Campos magnéticos: (a) Campo principal, (b) Campo de reação de armadura e (c) Campo resultante (a) + (b)



(a) Campo Principal



(b) Campo de Reação de Armadura



(c) Campo Resultante (a) + (b)

Fonte: Autoria Própria (2022)

Além dos efeitos de reação de armadura, as máquinas também sofrem queda de tensão devido à resistência (R_A) e auto indutância (L_A) presentes nas bobinas do estator. As quedas de tensão de uma máquina podem ser dada pelas seguintes equações.

$$\overline{\Delta V}_X = -jX\vec{I}_A \quad (4)$$

$$\overline{\Delta V}_{RA} = - R_A \vec{I}_A \quad (5)$$

$$\overline{\Delta V}_{XA} = - jX_A \vec{I}_A \quad (6)$$

sendo:

ΔV_X a queda de tensão devido a reação de armadura em V;

ΔV_{RA} a queda de tensão devido a resistência em V;

ΔV_{XA} a queda de tensão devido a auto indutância em V;

\vec{I}_A a corrente de reação de armadura em A;

X é a reatância da queda de tensão devido a reação de armadura em Ω ;

X_A a auto reatância em Ω ;

R_A a resistência em Ω .

2.2.3.1.1 Tensão terminal em máquinas de polos lisos

Para máquinas de polos lisos, o ângulo da corrente de armadura (que depende da carga) não interfere na intensidade do campo criado pela de reação de armadura, pois a relutância encontrada pelo fluxo criado pelas bobinas de armadura é sempre a mesma, não importando sua posição angular. O campo magnético, gerado por essa corrente \vec{I}_A , induz uma tensão \overline{E}_{RA} (ver Figura 7) que apresenta módulo proporcional à corrente e defasagem de 90° em relação ao campo que a criou. A equação que representa essa tensão pode ser vista a seguir.

$$\overline{E}_{RA} = - jX \vec{I}_A, \quad (7)$$

onde:

\overline{E}_{RA} é a componente de tensão de reação de armadura.

A reação de armadura e a auto reatância, em máquinas de polos lisos, podem ser somadas e representadas por uma única reatância, chamada de reatância síncrona da máquina X_S .

$$X_S = X + X_A \quad (8)$$

onde:

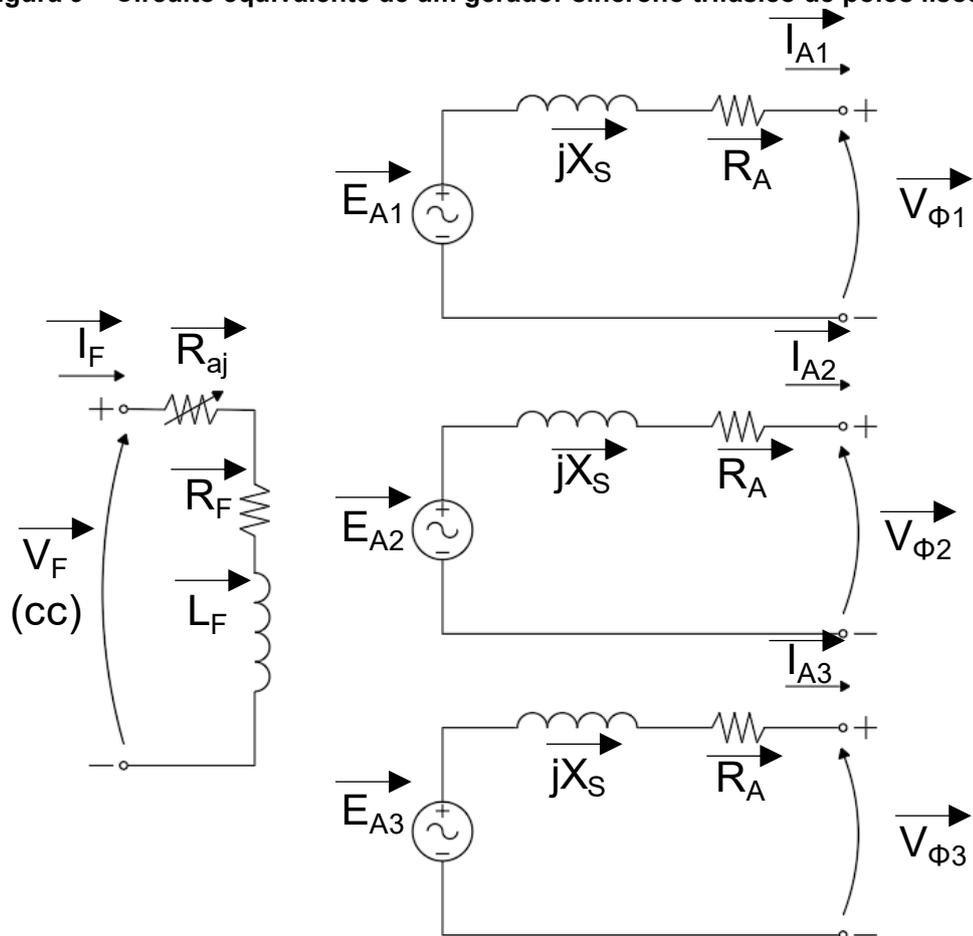
X_S é a reatância síncrona em Ω .

Assim, a equação final que representa a tensão de saída de um gerador de polos lisos é:

$$\vec{V}_\phi = \vec{E}_A - jX_S \vec{I}_A - R_A \vec{I}_A \quad (9)$$

Por meio da equação (9) é possível desenhar um circuito equivalente que serve como modelo para a análise do gerador síncrono em regime permanente. Esse circuito equivalente pode ser visto na Figura 9.

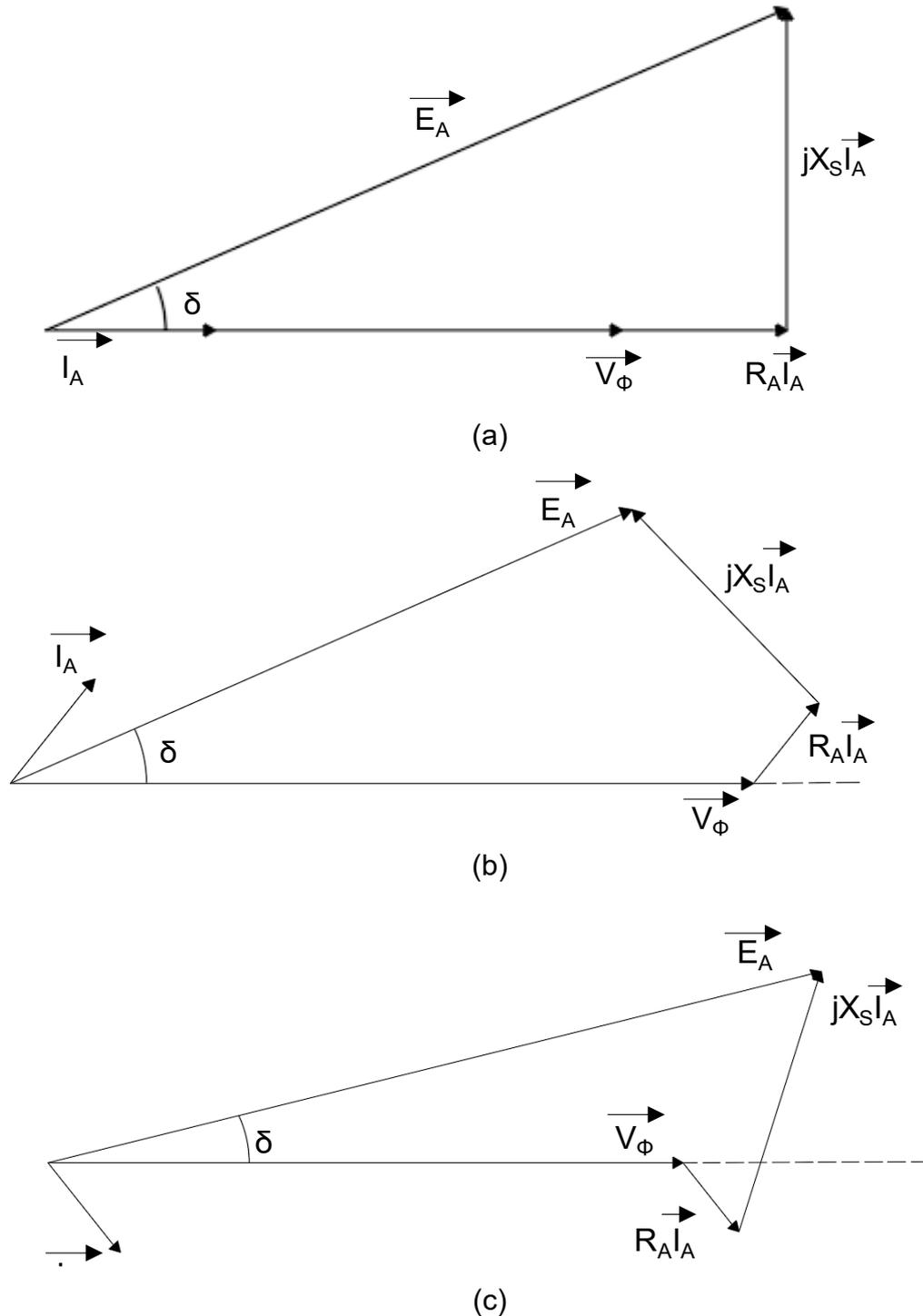
Figura 9 – Circuito equivalente de um gerador síncrono trifásico de polos lisos



Fonte: Chapman (2013)

Os diagramas fasoriais de um gerador síncrono de polos lisos com fator de potência unitário, adiantado e atrasado podem ser observados, respectivamente, nas letras a, b e c da Figura 10.

Figura 10 – Diagramas fasoriais de gerador de polos lisos: (a) Fator de potência unitário; (b) Fator de potência adiantado e (c) Fator de potência atrasado

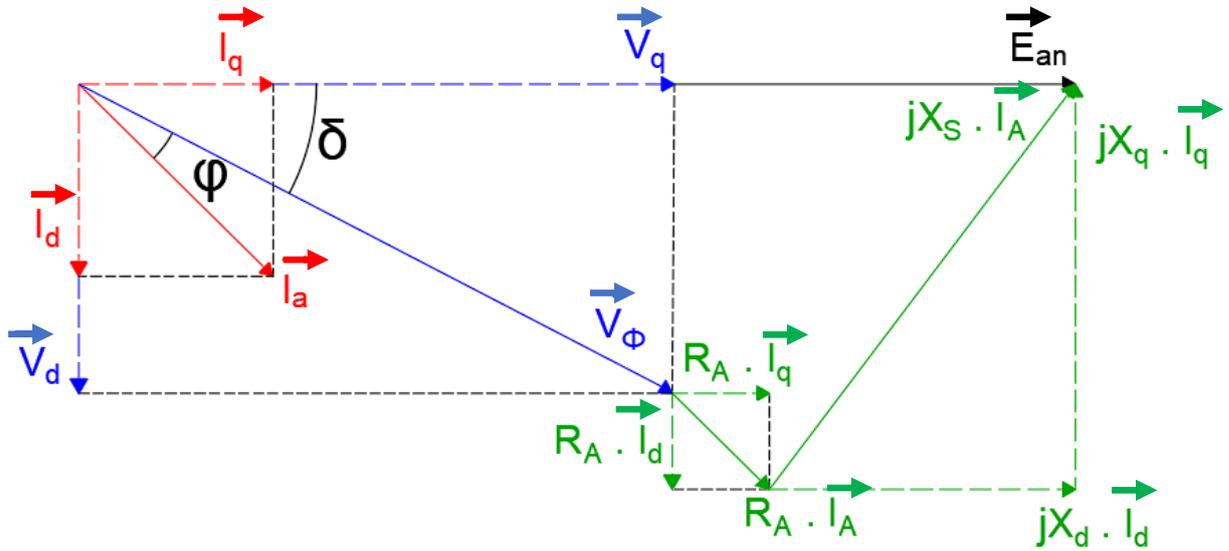


Fonte: Chapman (2013)

2.2.3.1.2 Tensão terminal em máquinas de polos salientes

Diferentemente de uma máquina de polos lisos, a intensidade do campo de reação de armadura de uma máquina de polos salientes depende do ângulo da corrente de armadura, que varia com a carga. Assim, para se determinar a magnitude

Figura 12 – Diagrama fasorial de uma máquina de polos salientes



Fonte: Chapaman (2013)

Através da Figura 12 as seguintes equações podem ser deduzidas.

$$I_d = I_a \cdot \sin(\delta + \varphi) \quad (10)$$

$$I_q = I_a \cdot \cos(\delta + \varphi) \quad (11)$$

$$V_d = I_q \cdot X_q - I_d \cdot R_A \quad (12)$$

$$V_q = E_{An} - I_d \cdot X_d - I_q \cdot R_A \quad (13)$$

$$V_T = \sqrt{3} \cdot \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (14)$$

$$X_d = x_d + X_A \quad (15)$$

$$X_q = x_q + X_A \quad (16)$$

sendo:

\vec{I}_d a corrente do eixo direto em A;

\vec{I}_q a corrente do eixo em quadratura em A;

δ o ângulo de carga em graus;

φ o ângulo entre a tensão e a corrente em graus

\vec{V}_d a componente de tensão no eixo direto em V;

\vec{V}_q a componente de tensão no eixo em quadratura em V;

X_d a reatância síncrona do eixo direto em Ω ;

X_q a reatância síncrona do eixo em quadratura em Ω ;

x_d a reatância de reação de armadura do eixo direto em Ω ;

x_q a reatância de reação de armadura do eixo em quadratura em Ω ;

E_{an} é a tensão induzida a vazio.

Percebe-se então que para se obter a tensão terminal de um gerador síncrono de polos salientes é necessário conhecer os valores das reatâncias de eixo direto e em quadratura.

3 REDE DE RELUTÂNCIA

A modelagem de uma rede de relutâncias consiste em dividir o circuito magnético, que representa uma máquina, em diversos elementos, ativos e passivos, conectados em série e/ou paralelo. Esses elementos dependem de algumas características como: intensidade da corrente, geometria da máquina, número de espiras, propriedades dos materiais e intensidade do fluxo magnético (XIE; KREBS; HASSAN; ZHANG; MARCHAND; REN, 2019). Nas redes propostas, os elementos ativos são modelados como fontes de forças magnetomotrizes e os elementos passivos como relutâncias.

Para se modelar a força magnetomotriz, deve-se multiplicar a corrente I , dada em ampères, pelo número de espiras N_1 (HENDERSHOT; MILLER, 2010).

$$F_{mm} = N_1 \cdot I \quad (17)$$

Já para representar as relutâncias, do ferro e do entreferro, utiliza-se a equação (18) (DOGAN, *et al.*, 2013).

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_o \cdot \mu_r} \cdot \frac{l_R}{A_R} \quad (18)$$

onde:

μ_o é a permeabilidade do vácuo;

μ_r é a permeabilidade relativa do material;

l_R é o comprimento do elemento;

A_R é a área do elemento.

As redes de relutâncias possuem diversas aplicações, entretanto como o objeto de estudo dessa dissertação é o gerador serão apresentados procedimentos e equações para se obter os resultados desejados desse tipo de dispositivo eletromagnético.

Através de uma rede de relutâncias é possível estimar o fluxo de uma máquina. O fluxo é dado pela seguinte equação:

$$\Phi = \frac{F_{mm}}{\mathcal{R}} \quad (19)$$

O Fluxo concatenado lambda de uma bobina é expresso por:

$$\lambda = Fmm \cdot N_2 \quad (20)$$

onde:

N_2 é o número de espiras da bobina onde a tensão é induzida.

Dividindo esse fluxo concatenado pela corrente I obtém-se a indutância do gerador (DOGAN, *et al.*, 2013).

$$L_{bob} = \frac{\lambda}{I} \quad (21)$$

Com o valor da indutância é possível, então, calcular a reatância com a seguinte equação:

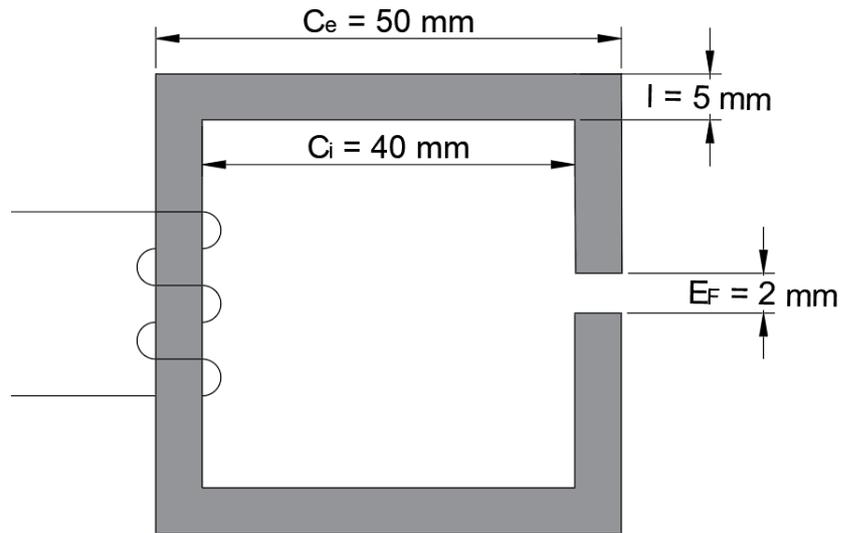
$$X = 2\pi \cdot eIf_{se} \cdot L_{bob} \quad (22)$$

Para a implementação de uma rede de relutâncias é interessante se utilizar algum tipo de software. Para o presente trabalho a rede proposta foi modelada através do software Reluctool (PELOUX, *et al.*, 2006).

3.1 Exemplo de modelagem de um circuito eletromagnético com rede de relutâncias

A seguir é apresentado um exemplo de modelagem de um dispositivo eletromagnético a fim de facilitar o entendimento de como desenvolver uma rede de relutâncias. A Figura 13 representa um dispositivo eletromagnético com as seguintes dimensões: comprimento externo (C_E) 50mm, comprimento interno (C_I) 40mm, largura (l) 5mm, profundidade (P_{ro}) 15mm e entreferro (E_F) 2mm.

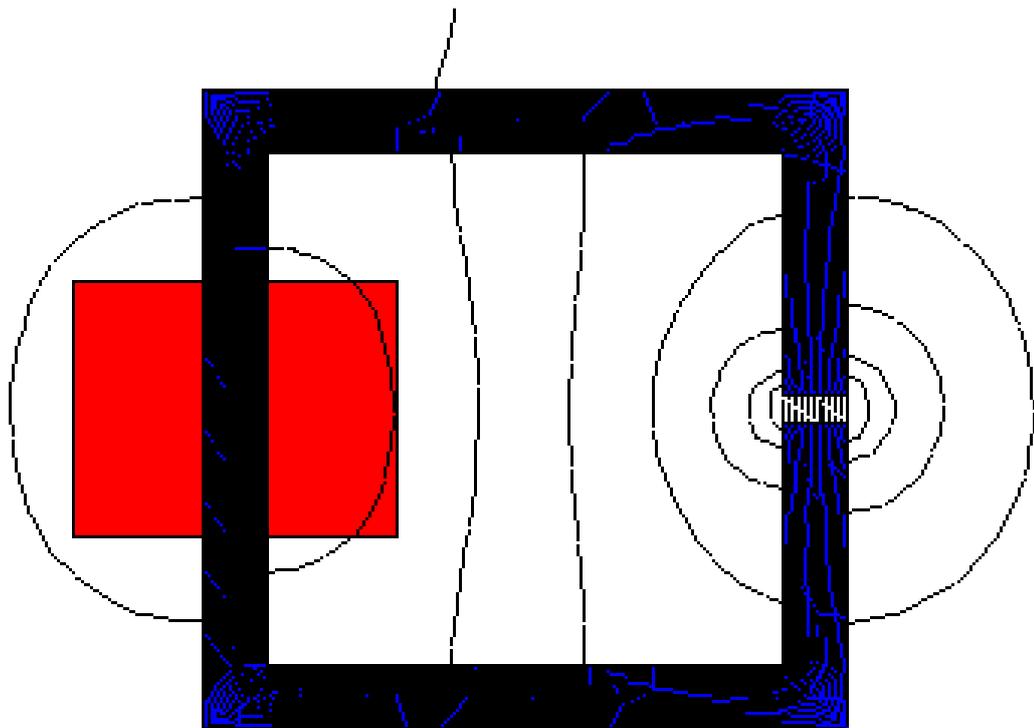
Figura 13 – Dispositivo eletromagnético utilizado como exemplo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Através dos dados construtivos e das características do material, modela-se o dispositivo eletromagnético, por meio do software EFCAD (BASTOS; SADOWSKI, 2008), a fim verificar os caminhos que percorrem o fluxo desse dispositivo. O resultado da simulação pode ser visto na Figura 14

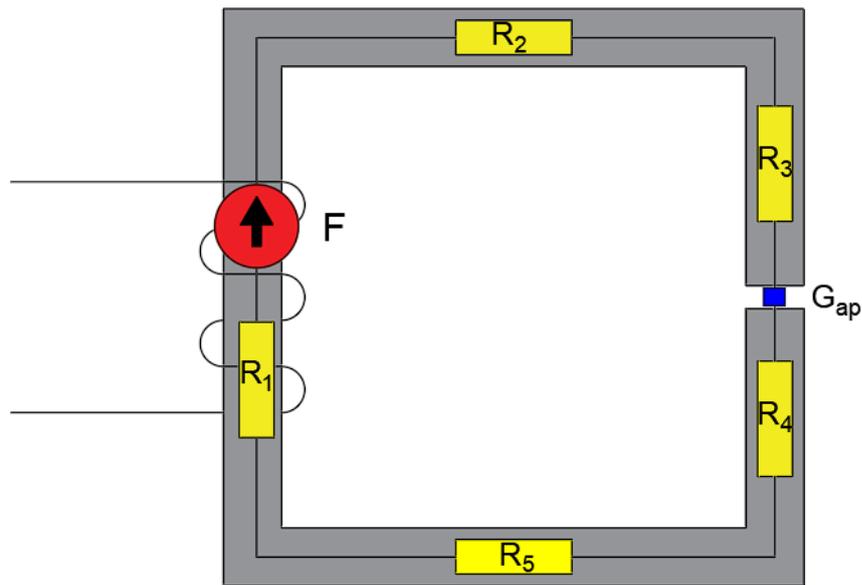
Figura 14 – Dispositivo eletromagnético simulado no EFCAD



Fonte: Autoria Própria (2022)

Conhecendo-se os caminhos de fluxo e as dimensões do dispositivo defini-se uma rede de relutâncias para representar o comportamento do fluxo magnético do dispositivo. A Figura 15 mostra a disposição dos elementos da rede de relutâncias proposta, e a Tabela 3 apresenta a dimensão de cada um desses elementos que compõe a rede proposta. Os elementos R_1 , R_2 , R_3 , R_4 e R_5 representam o material ferromagnético desse dispositivo, enquanto o elemento G_{ap} representa o entreferro.

Figura 15 – Rede de relutâncias que representa o dispositivo eletromagnético



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 3 – Parâmetros da rede de relutâncias do dispositivo eletromagnético

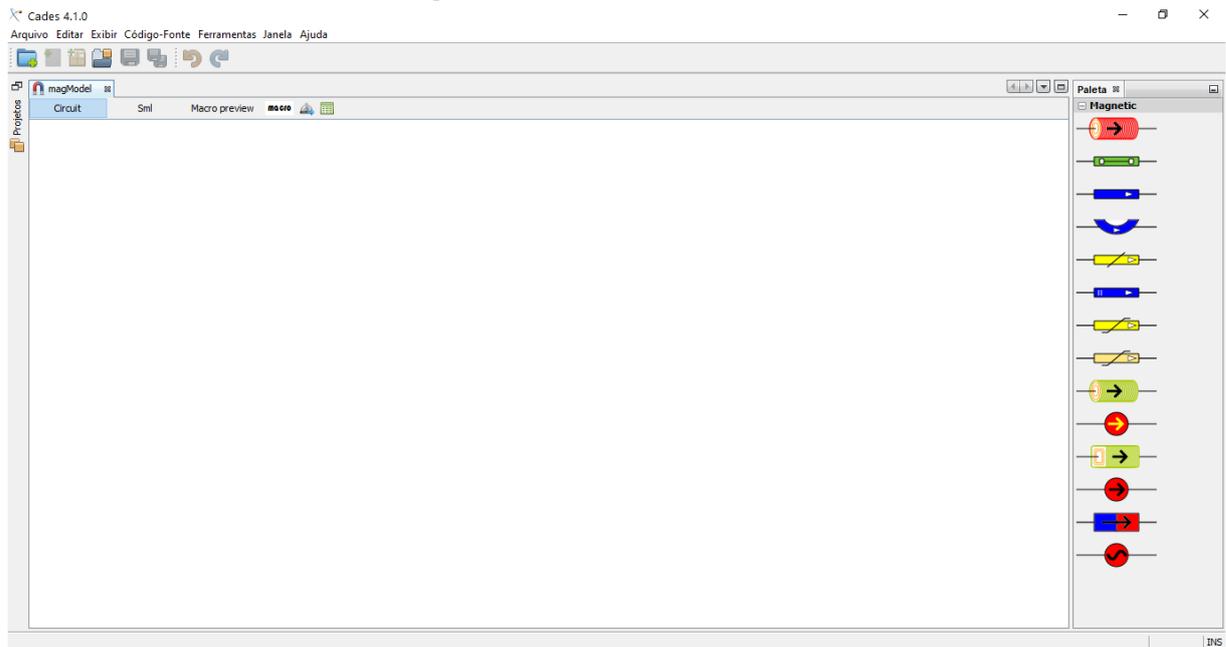
Elemento	Comprimento	Largura
R_1	$C_I + \left(\frac{C_E - C_I}{2}\right)$	l
R_2	$C_I + \left(\frac{C_E - C_I}{2}\right)$	l
R_3	$\frac{C_e - E_F}{2}$	l
R_4	$\frac{C_e - E_F}{2}$	l
R_5	$C_I + \left(\frac{C_E - C_I}{2}\right)$	l
Gap	E_F	l

Fonte: Autoria Própria (2022)

Definidas as dimensões de cada elemento da rede de relutâncias, monta-se a mesma no software CADES para poder simular e verificar a rede proposta.

3.1.1 Implementação no reluctool

A ferramenta Reluctool, que faz parte do software CADES (DELINCHANT, *et al.*, 2007) permite a construção de modelos baseados em rede de relutâncias. A interface do CADES para modelagem das redes de relutâncias, na versão 4.1, pode ser vista na Figura 16.

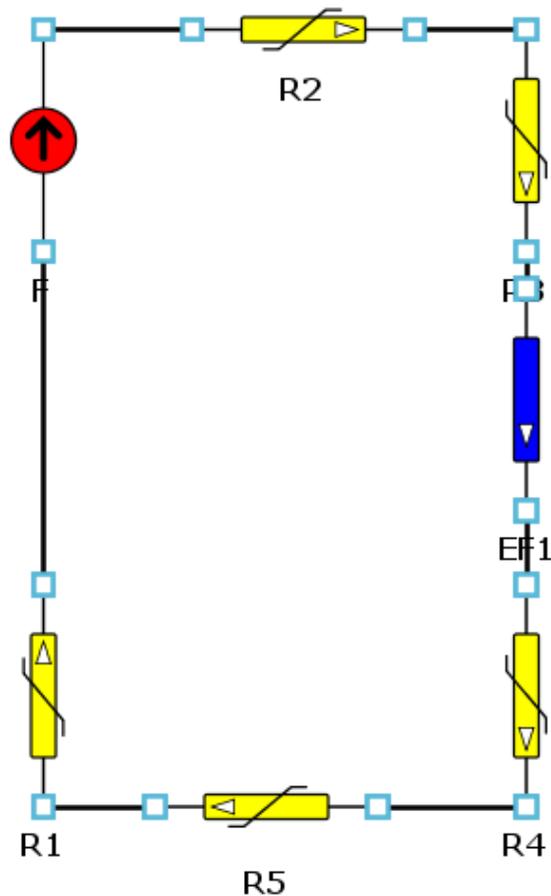
Figura 16 – Interface do reluctool

Fonte: Autoria Própria (2022)

As redes de relutâncias são projetadas através de símbolos que representam os componentes de um circuito magnético como entreferro, força magnetomotriz e material ferromagnético. Cada símbolo contém alguns parâmetros de entrada, tais como números de espiras, corrente, comprimento, área, etc. Essas entradas são determinadas conforme o projeto desenvolvido, podendo ser alteradas a qualquer momento de acordo com as necessidades da rede, e são diretamente responsáveis pelos valores de fluxo, de relutância e de energia determinados através da rede projetada. Além disso, essa ferramenta também possibilita incorporar a curva BH do material ferromagnético modelado, o que permite considerar sua não linearidade e saturação.

Pode-se verificar a rede de relutâncias proposta, implementada no Reluctool, representada na Figura 17.

Figura 17 – Rede de relutâncias do dispositivo eletromagnético implementada no reluctool



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para entender como os elementos da rede foram distribuídos é necessário analisar as linhas de fluxo do dispositivo eletromagnético, presente no resultado da simulação da Figura 17, do dispositivo eletromagnético. Os elementos devem ser posicionados onde o caminho de fluxo é significativo. A rede elaborada para este exemplo é simples, uma vez que existem alguns caminhos de dispersão de fluxo que não foram considerados. A não modelagem desses caminhos foi proposital para demonstrar a importância da modelagem deles para o resultado da rede.

A Tabela 4 apresenta o comparativo dos valores de fluxo obtidos pelas simulações no EFCAD e no CADES.

Tabela 4 – Comparativo de fluxo

Elemento	Fluxo EFCAD	Fluxo CADES	Diferença
R1	7,70E-05 Wb	7,07E-05 Wb	8,0%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Apesar da diferença ser de 8%, um valor relativamente alto, é possível validar o modelo de rede proposto. Para se obter um melhor resultado, é necessário tornar a rede proposta mais elaborada por meio da representação dos caminhos de dispersão de fluxo considerando relutâncias em paralelo.

3.2 Aplicação de redes de relutâncias á análise e projeto de geradores síncronos

A rede de relutância pode ser descrita como um circuito magnético que representa os caminhos de fluxo ao longo de um dispositivo eletromagnético, possibilitando a inclusão de fenômenos de saturação na modelagem de uma máquina. Tem como vantagem possuir um resultado melhor que métodos analíticos e um menor tempo de simulação se comparado com simulações em elementos finitos (OSTOVIC, 1987).

Inúmeras redes de relutâncias foram projetadas com o objetivo de calcular o fluxo produzido pelo estator ou rotor das máquinas elétricas. As redes de relutâncias podem ser aplicadas em diversas funções como: calcular as perdas no ferro (YOSHIDA, NAKAMURA e ICHINOKURA, 2011) e (NAKAMURA, *et al.*, 2009), otimizar máquinas elétricas (BAZZO, *et al.*, 2017), estimar a densidade de fluxo magnético no entreferro de um gerador de ímãs enterrados com múltiplas camadas de bobinas (ZHU, *et al.*, 2009) ou de um gerador com uma nova topologia de ímãs no rotor (MI, *et al.*, 2004).

Buscando converter energia limpa de novas fontes primárias, ou alterando as aplicações tradicionais das máquinas, o projeto de geradores síncronos vem se atualizando constantemente. Desse modo, na realização de projetos, as redes utilizadas devem ser aprimoradas para acompanhar o desenvolvimento das novas tendências e tecnologias. Por exemplo, máquinas elétricas de fluxo tridimensional exigem modelos tridimensionais (SIM, *et al.*, 2018). Além disso, metodologias híbridas têm sido propostas onde o cálculo das forças magnetomotrizes são feitas de maneira analítica, reduzindo o tempo computacional, enquanto os fluxos são calculados de através de uma modelagem semianalítica (TAQAVI e TAGHAVI, 2021).

As redes de relutâncias implementadas no projeto de máquinas elétricas normalmente são redes estáticas, com o sistema de excitação da máquina sendo representado pelas fontes de força magnetomotriz. Assim, a densidade de fluxo magnético é calculada somente para a posição do rotor de máximo fluxo magnético e a reação de armadura é obtida de forma analítica. Esse tipo de aplicação leva em consideração somente o valor da componente fundamental, ignorando as harmônicas (MI, *et al.*, 2004) e (BAZZO, *et al.*, 2017).

Diversos trabalhos, que têm como objetivo calcular as perdas elétricas, utilizam redes de relutâncias para calcular a densidade de fluxo magnético em diversas partes do dispositivo eletromagnético. Considerando geradores modelam-se os condutores de armadura das máquinas e sistema de excitação como sendo as fontes de força magnetomotrizes. Assim, as densidades de fluxo encontradas consideram o fluxo líquido que percorre o gerador e o efeito da reação de armadura é adquirido através da rede de relutância. Apesar disso, sem o cálculo do fluxo líquido para várias posições do rotor, esse tipo de metodologia continua ignorando as harmônicas no cálculo das perdas (YOSHIDA, NAKAMURA e ICHINOKURA, 2011) e (NAKAMURA, *et al.*, 2009).

Pode-se utilizar as redes de relutâncias para se determinar as harmônicas de um gerador síncrono. Entretanto para isso é preciso que a rede de relutâncias seja modelada para considerar as fontes de força magnetomotrizes do estator e do rotor do gerador, possibilitando o cálculo do fluxo líquido da máquina. Além do mais, essa rede deve calcular os valores de fluxo, variando a posição do rotor de grau em grau, obtendo-se assim o comportamento do fluxo para diversas posições. Desta maneira é possível obter as formas de onda do torque eletromagnético e da indução magnética líquida e calcular as perdas da máquina considerando as harmônicas contidas no gerador (WU, *et al.*, 2021).

Esta dissertação apresenta uma metodologia para a criação de rede de relutância estática destinada ao cálculo das reatâncias de uma máquina de polos salientes. Nesse caso, foi proposta uma rede de relutância estática designada ao cálculo da reatância de eixo direta (X_d) e outra rede de relutância estática determinada ao cálculo da reatância de eixo em quadratura (X_q).

4 METODOLOGIA PARA A CONSTRUÇÃO DA REDE DE RELUTÂNCIAS PROPOSTA

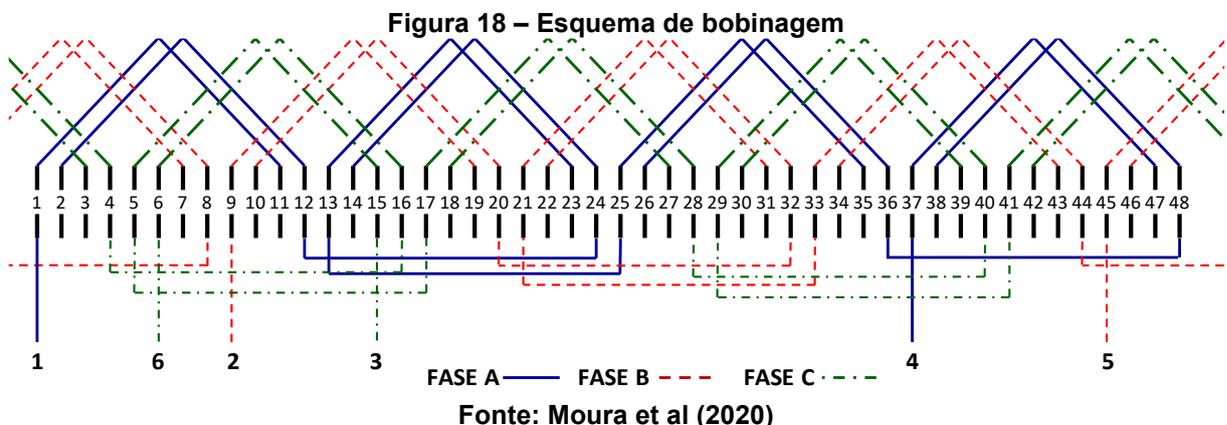
A metodologia empregada para o desenvolvimento das redes de relutâncias é apresentada através de uma máquina de entreferro constante que tem suas especificações descritas nesse capítulo. Os passos para a criação dessas redes são descritos nos subitens subsequentes. A máquina utilizada foi projetada conforme metodologia proposta por Bazzo, Moura e Carlson (2021) e suas especificações estão contidas na Tabela 5.

Tabela 5 - Tabela com as especificações técnicas da máquina de entreferro constante

Simbologia	Descrição	Valor	Unidade
P_S	Potência de saída	5	kW
V_S	Tensão	380	V
FP	Fator de Potência	0,92	-
f	Frequência	50	Hz
n	Rotação	1500	rpm

Fonte: Autoria Própria (2022)

O esquema de bobinagem da máquina em questão pode ser visto na Figura 18 e apresenta características como: camada simples, 48 ranhuras, passo polar de 12 ranhuras, encurtamento de passo 5/6, imbricado com 4 caminhos em série, 2 bobinas por polo e por fase, e passo de bobina de 10 ranhuras. Os terminais 1 e 4 são referentes à fase A, enquanto os terminais 2 e 5 correspondem a fase B e por fim, os terminais 3 e 6 são da fase C.



4.1 Método de obtenção das reatâncias

A partir do esquema de bobinagem foi possível elaborar o mapa de ranhuras contido nas Tabela 6 e Tabela 7. Os sinais de positivo (+) e negativo (-) indicam o

sentido do enrolamento. Segundo o mapa de ranhuras da Tabela 6, assumindo que a corrente entre pelo terminal 1 da fase A, a ranhura 1 terá sinal positivo.

Tabela 6 – Mapa de ranhuras com 3 enrolamentos – parte 1

F A S E	Número da Ranhura																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	+	+									-	-	-	-									+	+
B							+	+	+	+									-	-	-	-		
C			-	-	-	-									+	+	+	+						

Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando o mapa de ranhuras da Tabela 7, considerando que a corrente sai pelo terminal 4 da fase A, a ranhura 37 terá sinal negativo.

Tabela 7 – Mapa de ranhuras com 3 enrolamentos – parte 2

F A S E	Número da Ranhura																							
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
A	+	+										-	-	-	-								+	+
B							+	+	+	+									-	-	-	-		
C			-	-	-	-									+	+	+	+						

Fonte: Autoria Própria (2022)

Segundo Jones (1967), é possível se obter os valores das indutâncias de eixo direto L_d e eixo em quadratura L_q de uma máquina elétrica através do seguinte procedimento: primeiramente, duas fases são conectadas em série; em seguida, aplica-se corrente neste enrolamento (duas fases em série) para se obter a indutância em função da posição do rotor; por fim, a indutância de eixo direto corresponde à metade da indutância máxima e a indutância de eixo em quadratura à metade do valor mínimo. Neste método os enrolamentos de campo e da terceira fase não são excitados. Jones (1967) mostra que tal procedimento pode ser usado apenas se a curva da indutância destes dois enrolamentos em série apresentar apenas a componente contínua e 2º harmônico não nulos, e as demais componentes devem ser desprezíveis.

Para a obtenção das indutâncias máxima (rotor alinhado com o eixo direto) e mínima (rotor alinhado com o eixo em quadratura), as fases A e B da máquina foram consideradas em série. Os mapas de ranhuras que retratam esta situação podem ser vistos nas Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Mapa de ranhuras com 2 enrolamentos em série – parte 1

F A S E	Número da Ranhura																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
AB	+	+					-	-	-	-	-	-	-	-					+	+	+	+	+	+

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 9 – Mapa de ranhuras com 2 enrolamentos em série – parte 2

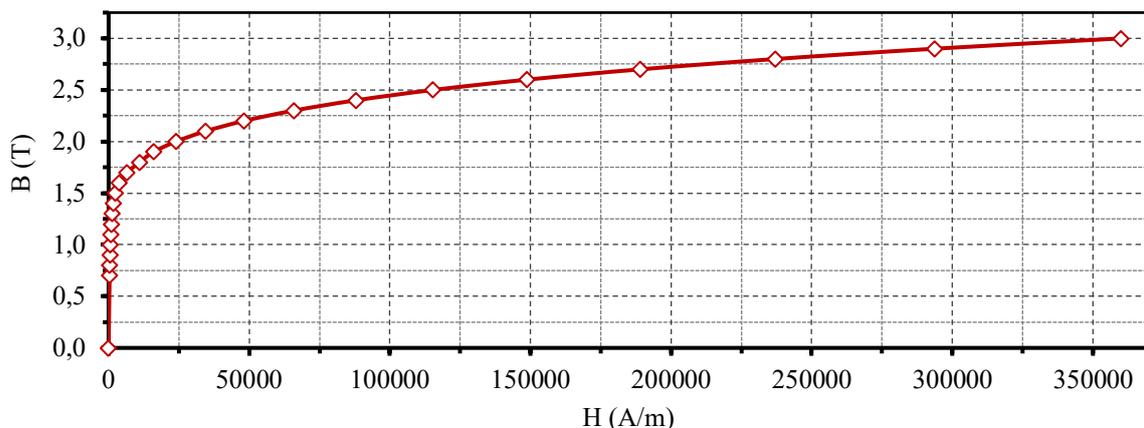
F A S E	Número da Ranhura																							
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
AB	+	+					-	-	-	-	-	-	-	-					+	+	+	+	+	+

Fonte: Autoria Própria (2022)

4.2 Análise do comportamento do fluxo magnético

Por meio do EFCAD (BASTOS; SADOWSKI, 2008), software de simulação de elementos finitos, a máquina foi simulada em várias posições do rotor (passos de 1° mecânico). As posições com o rotor alinhado com os eixos direto e em quadratura foram analisadas para verificar o caminho percorrido pelo fluxo. As simulações realizadas levam em consideração a curva não linear da relação BH, que inclui o efeito de saturação do ferro (vide Figura 20). Para que fosse possível realizar a mesma comparação, deve-se utilizar a mesma curva BH, tanto na simulação por elementos finitos quanto nas redes de relutâncias, nos elementos modelados.

Figura 19 – Curva saturação do ferro

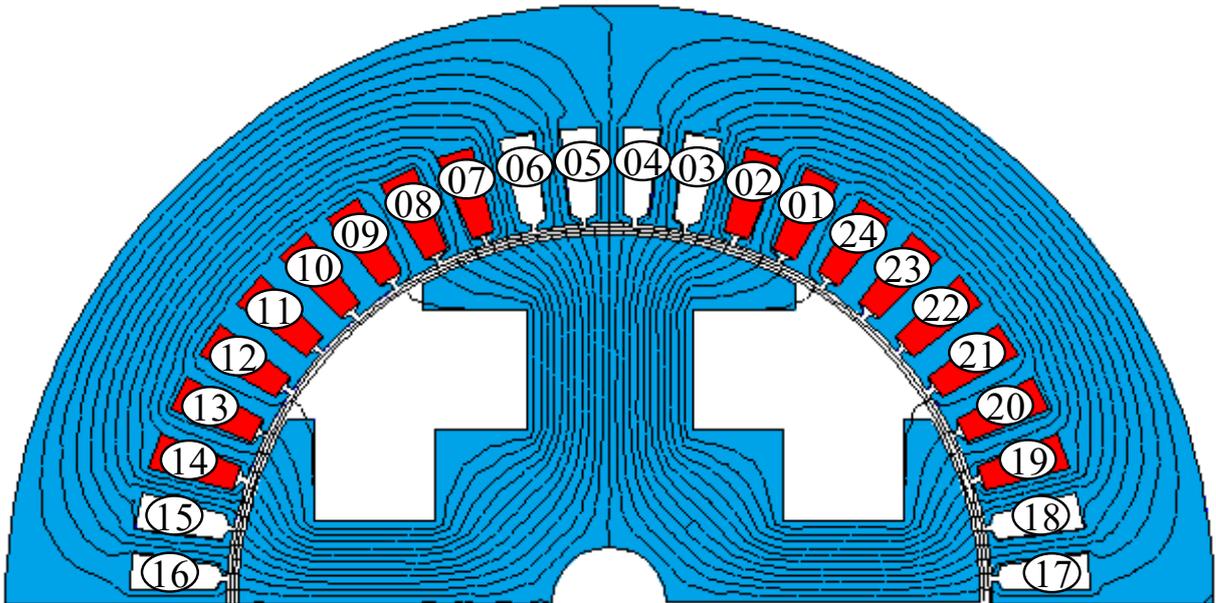


Fonte: Autoria Própria (2022)

A Figura 20 mostra o comportamento das linhas de fluxo obtidas através de simulação pelo método de elementos finitos com a máquina posicionada no eixo direto, onde o valor da indutância é máximo. Pode-se averiguar que o fluxo percorre

um caminho com relutância relativamente reduzida, uma vez que o rotor está alinhado com o caminho principal do fluxo. Nesta figura, as ranhuras foram enumeradas para indicar as posições conforme os mapas de ranhuras da Tabela 8 e da Tabela 9.

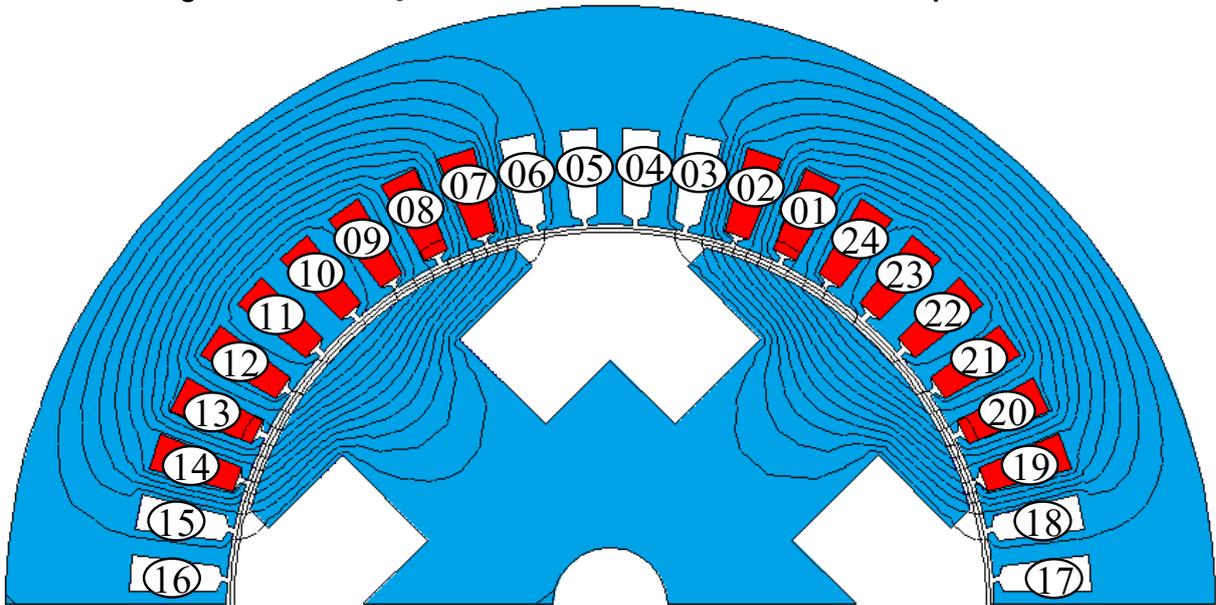
Figura 20 – Simulação em elementos finitos com o rotor em eixo direto



Fonte: Moura et al (2020)

A Figura 21 demonstra o resultado de simulação para a máquina posicionada com o rotor alinhado ao eixo em quadratura, posição na qual se encontra o valor mínimo da indutância. Verifica-se que o fluxo percorre um caminho com de grande relutância, uma vez que o rotor está alinhado ao eixo em quadratura.

Figura 21 – Simulação em elementos finitos com o rotor em quadratura



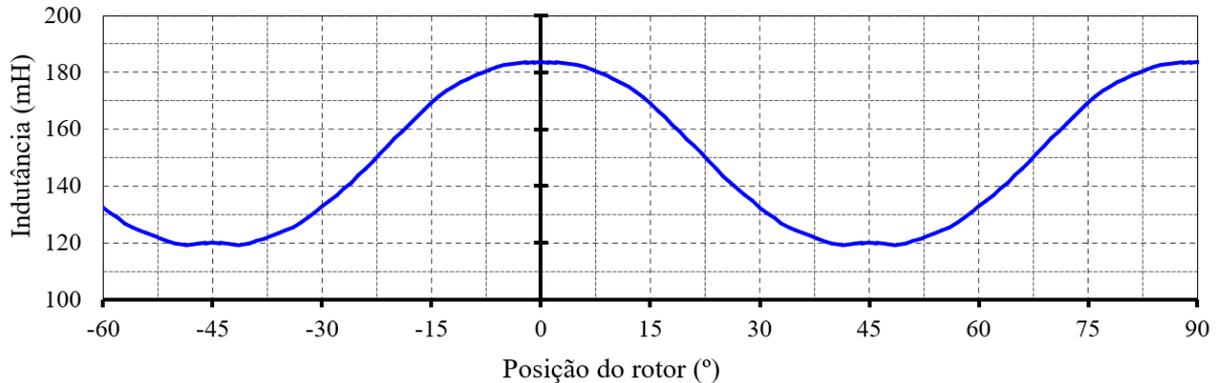
Fonte: Moura et al (2020)

As duas simulações foram realizadas com mesmo valor de corrente aplicada ao enrolamento formado pelas fases A e B em série. Este valor de corrente foi escolhido de forma que a indução magnética no núcleo do gerador fosse semelhante ao encontrado na máquina em operação com carga nominal. Esta consideração leva à obtenção das reatâncias de eixos direto X_d e em quadratura X_q correspondentes à operação nominal, o que é apropriado para o cálculo da queda de tensão devido à reação de armadura em operação nominal.

A Figura 22 apresenta gráfico que indica a indutância em função da posição do rotor (sempre com o mesmo valor de corrente imposta ao enrolamento). O ângulo 0° representa o rotor alinhado ao eixo direto, enquanto o ângulo 45° corresponde ao rotor na posição em quadratura (o que corresponde a 90° elétricos na máquina de 4 polos).

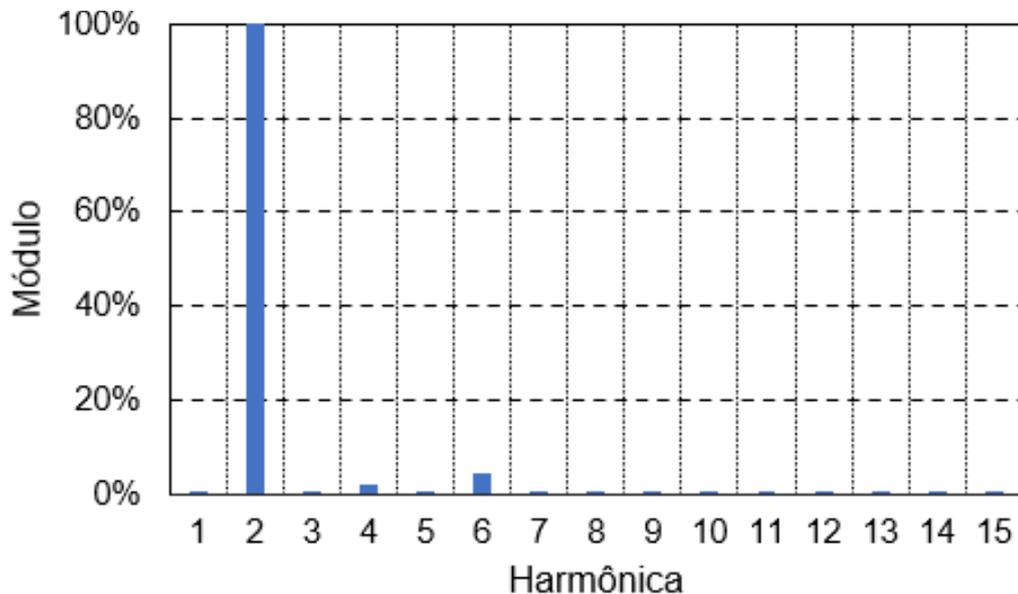
A análise harmônica na Figura 23 desta curva mostra que apenas a 2ª harmônica e a componente contínua são significativas, o que permite o uso deste método, conforme Jones (1967).

Figura 22 – Indutância em função da posição do rotor



Fonte: Moura et al (2020)

Figura 23 – Tabela de harmônicas



Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 Construção de rede de relutâncias

A modelagem das redes de relutâncias, projetadas por meio do software RELUCTOOL, que faz parte da suíte de software CADES, se deu em duas etapas diferentes. A primeira delas se consistiu na definição das forças magnetomotrizes (fmm) da armadura, enquanto a segunda fase representou a modelagem das relutâncias.

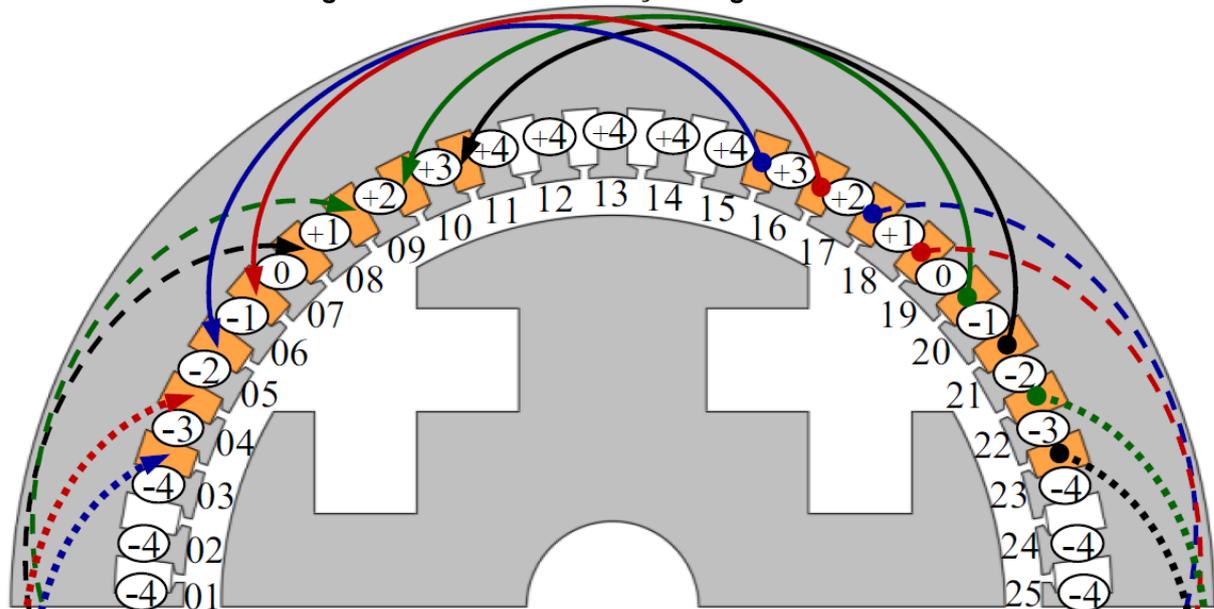
4.3.1 Definição das fontes de força magnetomotrizes

Para iniciar a construção dessa primeira parte que compõem as redes de relutâncias, é necessário definir os valores e as posições das fontes de fmm. Na Figura 24, a máquina está posicionada com o rotor alinhado ao eixo direto. Ela serve para a

análise das fontes, tanto da rede de eixo direto, para o cálculo da reatância X_d , quanto da rede em quadratura, para o cálculo de X_q , pois a posição das fontes depende apenas do enrolamento de armadura, não da posição do rotor.

Primeiramente, deve-se definir qual região da máquina que precisa ser modelada pela rede, e que deve compreender todo o caminho que o fluxo percorre em um laço (equivalente a um passo polar). Analisando a Figura 20, percebe-se que um laço de fluxo é compreendido no intervalo entre os centros de dois polos adjacentes (envolvendo as ranhuras 05 a 16 da Figura 24). Como pode ser visto na Figura 24, os dentes que compreendem esse caminho são aqueles rotulados com números entre 01 e 13 (números indicados na ponta de cada dente), sendo considerada apenas a metade de cada um dos dentes extremos deste domínio (01 e 13).

Figura 24 – Análise das forças magnetomotrizes



Fonte: Moura et al (2020)

Em seguida, foram inseridas setas na coroa do estator para representar as bobinas e seus respectivos sentidos de enrolamento. Por exemplo, uma das setas da Figura 24 indica que uma bobina parte da ranhura entre os dentes 16 e 17 (ranhura 01 da Figura 20) e chega entre os dentes 06 e 07 (ranhura 11 da Figura 20). Foi considerado que a corrente possui sentido entrando no plano da figura na ranhura 01 e saindo do plano na ranhura 11 (referente à Figura 20). Desta forma, as setas da Figura 24 indicam que a corrente entra no plano nas ranhuras 01, 02, 19, 20, 21, 22,

23 e 24 e sai do plano nas ranhuras 07-14 (numeração referente à Figura 20). Cada uma destas setas representa, portanto, uma bobina, com N espiras.

O próximo passo é definir a contribuição de cada uma destas bobinas para a fmm presente em cada dente. Todos os dentes compreendidos entre cada bobina são representados por uma fonte de fmm. Seu sentido é definido pela regra da mão direita. Desta forma, os dentes de 7 a 16 são influenciados pela bobina vermelha de traço cheio, com valor $N \cdot I$ e sentido para fora (do rotor para o estator). Estendendo esta análise com a contribuição de todas as bobinas, a força magnetomotriz em cada dente é indicada na Figura 24 por um número e um sinal: o número significa sua intensidade (soma da contribuição de todas as bobinas); o sinal positivo significa apontando para fora e o sinal negativo para dentro da máquina. Por exemplo, o dente 12 possui intensidade $4 \cdot N \cdot I$ com sentido para fora, enquanto o dente 05 possui intensidade $2 \cdot N \cdot I$ com sentido para dentro. Pode-se perceber que alguns dentes possuem intensidade 0. Isso ocorre, pois eles são influenciados por duas fontes com sentido para fora da máquina e por duas com sentido para dentro da máquina. Como o produto $N \cdot I$ é igual para todas as bobinas, isso faz com que a intensidade final desses dentes seja anulada.

Para se determinar o fluxo enlaçado total das bobinas é preciso verificar como os dentes são influenciados pelas bobinas, e para isso é necessário analisar a Figura 21. Pode-se verificar através da equação (23) que os dentes 1, 2 e 3 são multiplicados por 4, já o dente 4 é multiplicado por 3, o dente 5 por 2 e o dente 6 por 1. Isso acontece, pois os dentes 1, 2 e 3 sofrem influência de 4 bobinas, enquanto o dente 4 sofre influência de 3 e assim por diante. Importante ressaltar que como a máquina é simétrica, utilizou-se somente a metade dela para se calcular o fluxo concatenado.

Para se obter o Fluxo concatenado (FC), através dos fluxos calculados pela rede de relutância, utiliza-se a equação (23). Vale ressaltar que essa equação é empregada tanto para a rede destinada ao cálculo da reatância de eixo direto quanto para a rede determinada para o cálculo da reatância de eixo em quadratura.

$$FC = 2 \cdot N \cdot P \cdot (4 \cdot (D1_{p1_flux}) + 4 \cdot (D2_{p1_flux}) + 4 \cdot (D3_{p1_flux}) + 3 \cdot (D4_{p1_flux}) + 2 \cdot (D5_{p1_flux}) + (D6_{p1_flux})) \quad (23)$$

onde:

N é o número de voltadas das bobinas;

P é o número de polos;

$D1_{P1_flux}$ é o fluxo presente no dente 1;

$D2_{P1_flux}$ é o fluxo presente no dente 2;

$D3_{P1_flux}$ é o fluxo presente no dente 3;

$D4_{P1_flux}$ é o fluxo presente no dente 4;

$D5_{P1_flux}$ é o fluxo presente no dente 5;

$D6_{P1_flux}$ é o fluxo presente no dente 6.

4.3.2 Definição da geometria da rede de relutâncias

Terminada a primeira etapa, inicia-se a modelagem das relutâncias. Para cada rede de relutâncias (rede destinada ao cálculo de X_d e rede designada ao cálculo de X_q) é necessário realizar uma análise individual do comportamento do fluxo devido à posição da máquina. Cada relutância deve ser inserida num caminho com valor significativo de fluxo. A intensidade do fluxo deve ser observada na simulação pelo método de elementos finitos; se determinado caminho tiver valor de fluxo insignificante, não há razão para ser modelado na rede de relutâncias. Os valores das relutâncias (do ferro e do entreferro) são calculadas de acordo com a equação (18), em função do comprimento C_R (m), da área A_R (m²) e da permeabilidade relativa do material μ_r . O valor da área é igual à largura da seção por onde o fluxo passa l (m) multiplicada pelo comprimento axial da máquina C_{ax} (m), que é igual para todas as relutâncias.

A construção de uma rede de relutâncias é um processo iterativo, sendo difícil obter o resultado esperado numa primeira tentativa. Desta forma, a cada tentativa, deve-se comparar os valores de fluxo de cada uma das relutâncias com os valores dos fluxos observados na simulação por elementos finitos nas regiões correspondentes. A rede final é alcançada quando as diferenças entre os fluxos calculados pela rede e os obtidos por simulação em elementos finitos é aceitável.

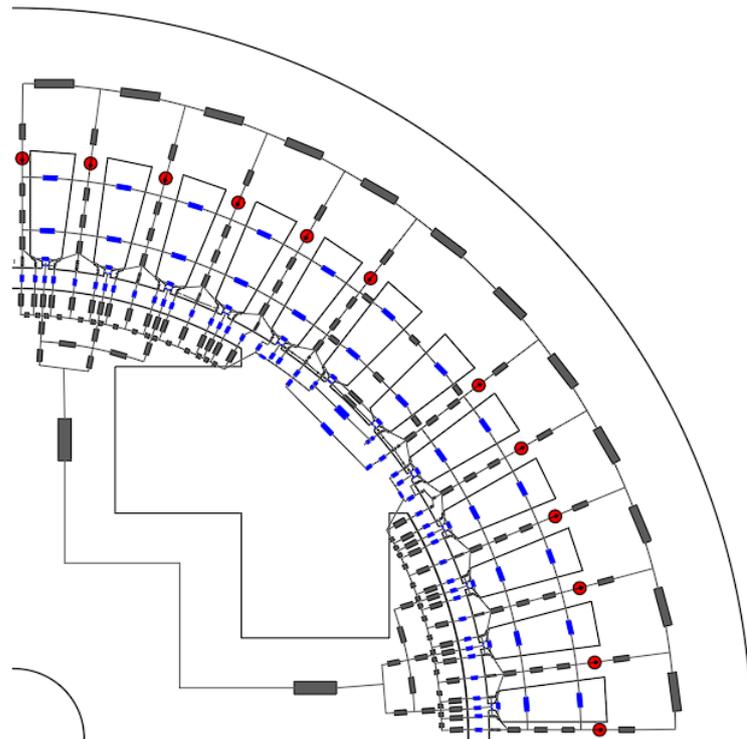
4.3.2.1 Rede de relutâncias para o cálculo da reatância do eixo direto

Os principais caminhos de fluxo para a rede de relutâncias do eixo direto podem ser observados na Figura 20. Conforme comentado no capítulo anterior, é

preciso inserir as relutâncias onde os valores de fluxo são relevantes. Após verificar os locais onde serão inseridas as relutâncias, é preciso calcular as dimensões das relutâncias de acordo com as dimensões da região a ser representada por elas. Para isso, é necessário conhecer a geometria da máquina utilizada. Os parâmetros dos elementos que representam o ferro são relativamente mais simples de definir, já os que retratam o entreferro são mais complexos, visto que o caminho do fluxo não é bem definido como no ferro.

A Figura 25 mostra a rede de relutâncias destinada ao cálculo da reatância do eixo direto. O procedimento para calcular cada uma das relutâncias presente na rede proposta se encontra no apêndice A.

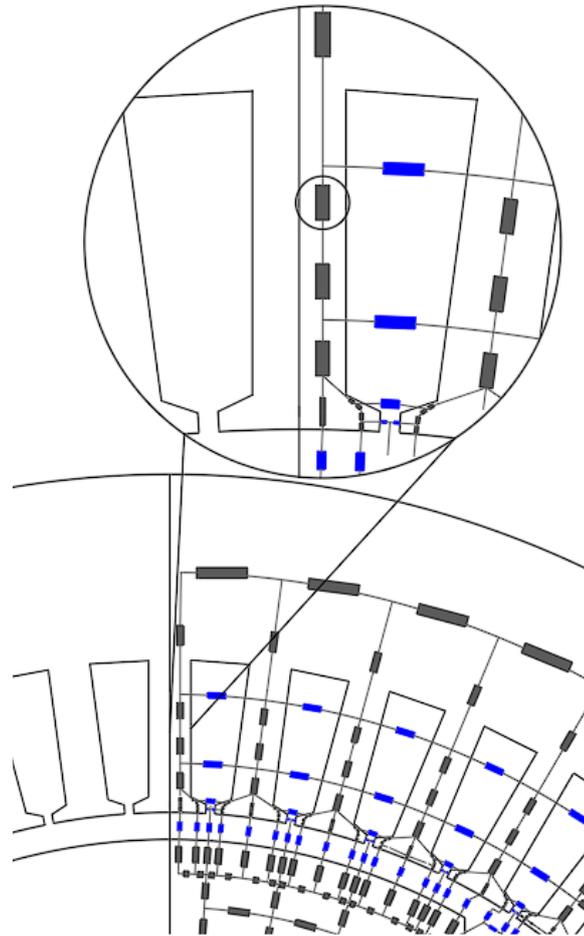
Figura 25 – Rede para obtenção do enlace de fluxo de eixo direto



Fonte: Autoria própria (2022)

Para facilitar o entendimento, é apresentado o procedimento de definição de um elemento, sendo ele correspondente ao ferro do dente 1 (verificar Figura 24). A relutância descrita está presente na Figura 26 e está destacada por um círculo. As demais relutâncias presentes na rede de eixo direto têm suas dimensões discriminadas no apêndice A.

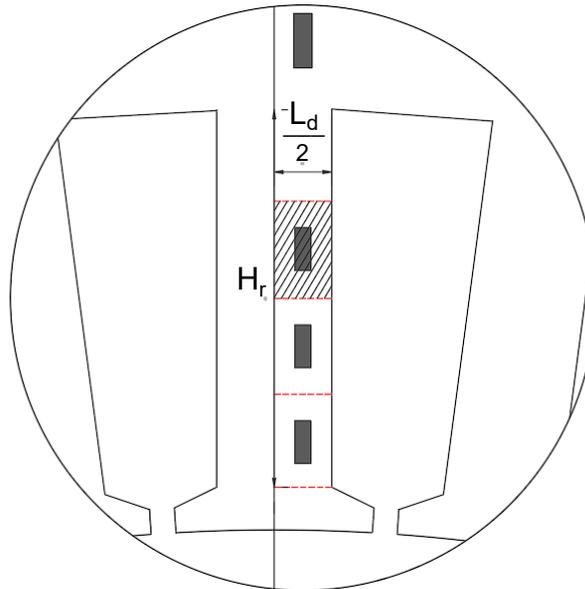
Figura 26 – Relutância do ferro do dente 1



Fonte: Autoria própria (2022)

A geometria da máquina é um parâmetro essencial para determinar as dimensões dos elementos que constituem uma rede de relutâncias. Inicia-se o processo para determinar o comprimento e a largura do elemento do dente 1 verificando que a altura total do dente é H_r e sua largura é L_d . Como pode ser visto na Figura 26, o dente foi dividido em 4 partes iguais. Deste modo, a altura de cada elemento é $\frac{H_r}{4}$. Já para a largura, usa-se $\frac{L_d}{2}$, visto que é considerado somente metade dos dentes das extremidades (dentes 1 e 13 conforme Figura 24). É importante ressaltar que a relutância modelada deve ser paralela ao fluxo, ou seja, o fluxo deve passar paralelo a esse elemento. Portanto, esta relutância pode ser implementada no CADES com comprimento $\frac{H_r}{4}$ e área $(\frac{L_d}{2}) \cdot Cax$.

Figura 27 – Dimensões da relutância do ferro do dente 1



Fonte: Autoria própria (2022)

A dimensões das relutâncias está resumida na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores dos elementos da rede de eixo direto

Elemento	Comprimento, l_R	Largura, L
$D1_{P3}$	$\frac{h_r}{4}$	$\left(\frac{L_d}{2}\right)$

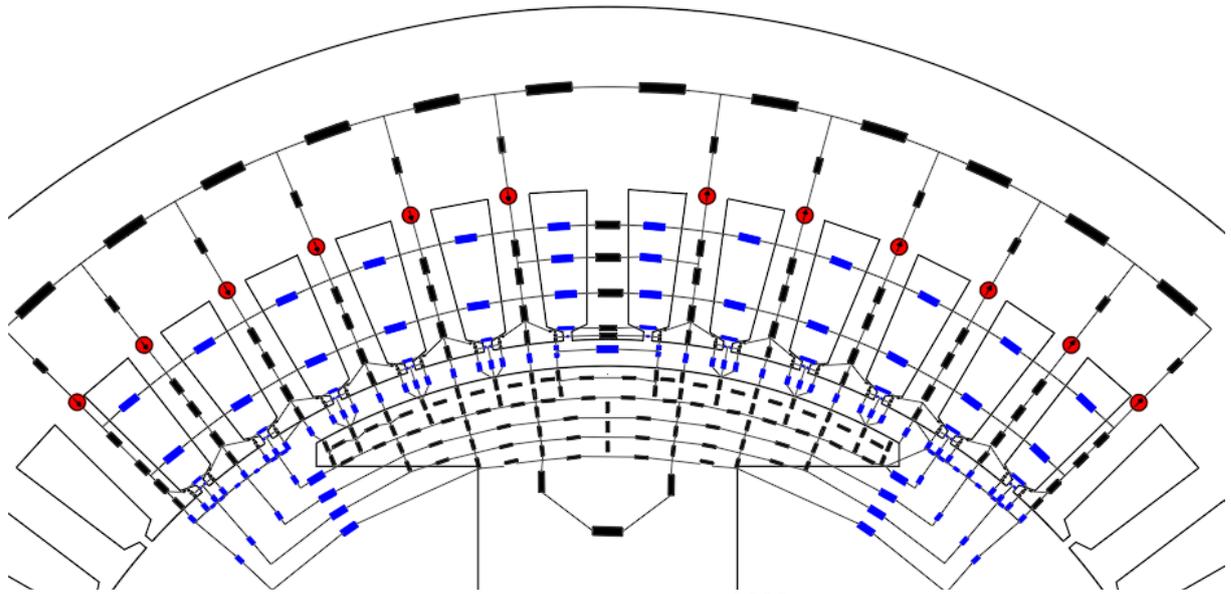
Fonte: Autoria Própria (2022)

A verificação dos elementos modelados é realizada através da comparação do valor do fluxo obtido por essas relutâncias, através do CADES, e pelo valor adquirido através da simulação do EFCAD. A verificação pode ser vista no capítulo 5.

4.3.2.2 Rede de relutâncias para o cálculo da reatância do eixo em quadratura

O processo para definir os elementos da rede de relutâncias do eixo em quadratura é semelhante ao já descrito no item 4.2.2.1. O primeiro passo é verificar os principais caminhos de fluxo, através da Figura 21, e definir onde devem ser posicionadas cada uma das relutâncias. O processo completo de definição das dimensões das relutâncias da rede de relutâncias designada ao cálculo da reatância do eixo em quadratura, conforme Figura 28, é apresentado no apêndice B.

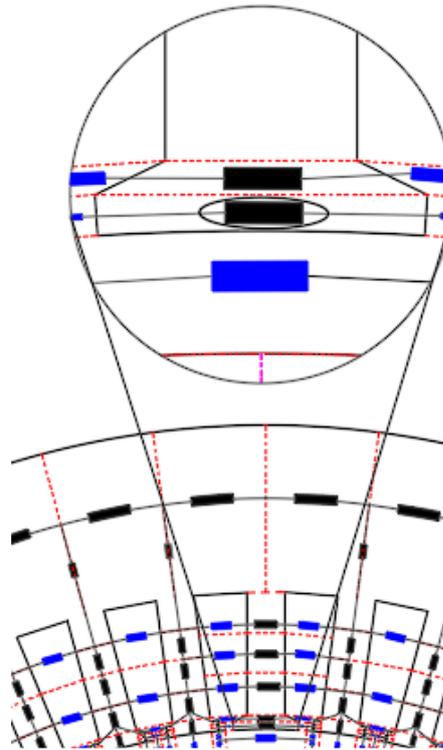
Figura 28 – Rede para obtenção do enlace de fluxo de eixo em quadratura



Fonte: Autoria própria (2022)

A seguir, é mostrado o processo de definição do elemento correspondente ao ferro do dente 7, contido na rede destinada ao cálculo da reatância do eixo em quadratura. A relutância descrita está presente na Figura 29 e está destacada por círculo.

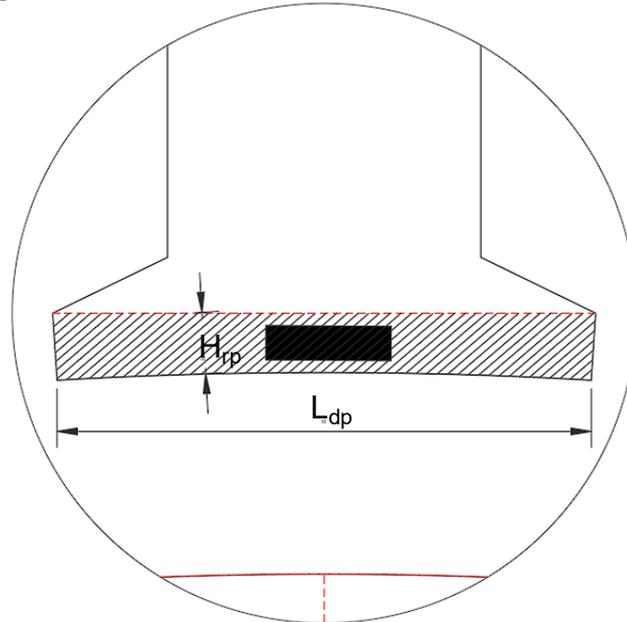
Figura 29 – Relutância do ferro do dente 7



Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme comentado no processo anterior, a geometria da máquina é imprescindível para a definição dos elementos da rede. Nota-se, através da Figura 30, que a largura do elemento do dente 7 é igual a altura do pescoço da ranhura (H_{rp}), enquanto o comprimento é definido como a largura da ponta do dente (L_{dp}).

Figura 30 – Dimensões da relutância do ferro do dente 7



Fonte: Autoria Própria (2022)

A dimensões das relutâncias está resumida na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores dos elementos da rede de eixo direto

Elemento	Comprimento, l_R	Largura, L
D7	L_{dp}	H_{rp}

Fonte: Autoria Própria (2022)

A verificação dos elementos modelados é realizada através da comparação do valor do fluxo obtido por essas relutâncias, através do CADES, e pelo valor adquirido através da simulação do EFCAD. Essa verificação pode ser constatada no capítulo 5.

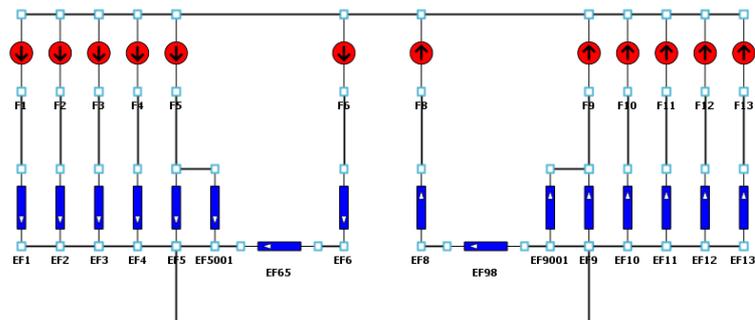
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo é destinado a apresentar os resultados da obtenção dos valores de X_d e X_q através redes de relutâncias, com e sem ferro, propostas para a máquina apresentada no capítulo 4. As redes foram implementadas no CADES e seus resultados foram validados por meio de comparação dos valores de fluxos encontrados com os valores das simulações por elementos finitos (EFCAD).

Após a verificação, as redes são submetidas a uma análise de robustez, como pode ser visto no item 5.1. Em um primeiro momento as redes, com e sem ferro, têm seus resultados comparados com as simulações por elementos finitos em situações de carregamentos distintos para verificar a importância de se modelar o ferro e os caminhos dispersos de fluxo. Em seguida, as redes são aplicadas em uma máquina que possui uma topologia de entreferro variável para, inicialmente, verificação do cálculo das reatâncias e, na sequência, verificação do comportamento em diversos cenários de carregamento diferentes.

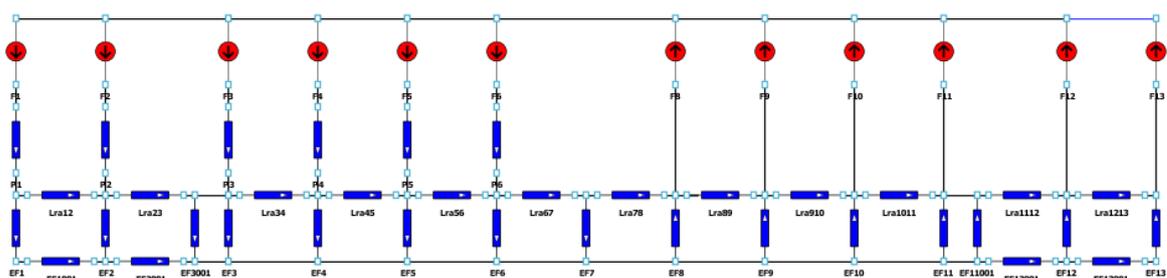
As primeiras redes desenvolvidas, conforme Figura 31 e Figura 32 não contemplam o ferro e nem os caminhos dispersos de fluxo da máquina, o que as tornam redes de relutâncias mais simples (MOURA *et al.*, 2020).

Figura 31 – Rede L_d sem ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Moura et al (2020)

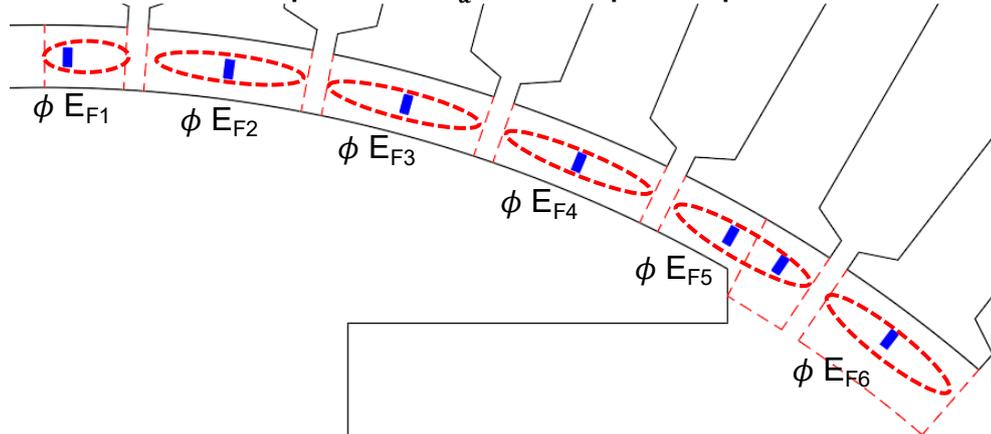
Figura 32 – Rede L_q sem ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Moura et al (2020)

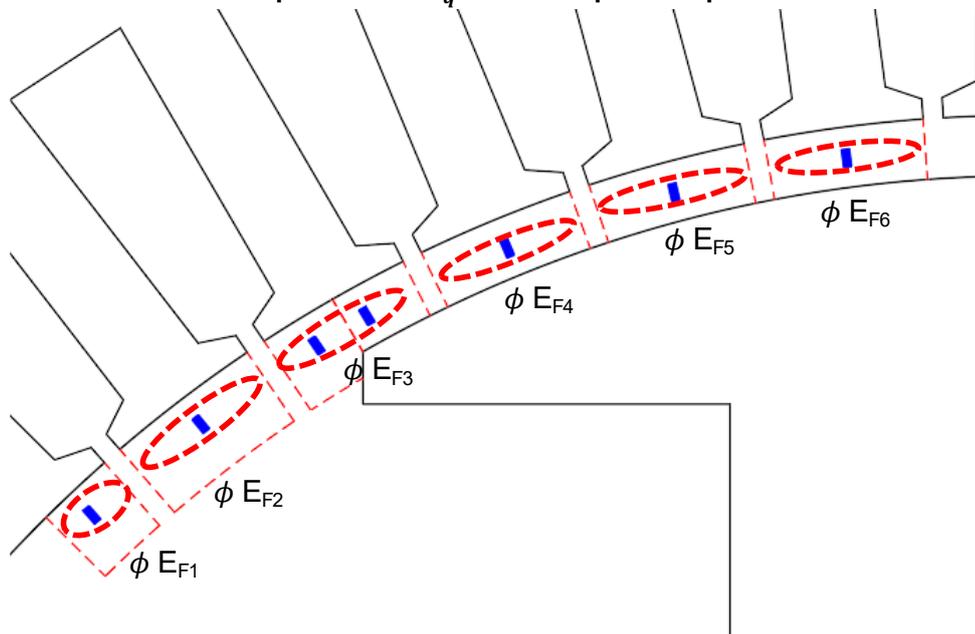
As redes foram validadas através da comparação dos valores obtidos pelas redes e pela simulação por elementos finitos. O processo de comparação, que pode ser visto nas Figura 33 e Figura 34, consistiu em medir o fluxo referente a área a qual a relutância analisada representa.

Figura 33 – Fluxos medidos para a rede L_d sem ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 34 – Fluxos medidos para a rede L_q sem ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Autoria Própria (2022)

A Tabela 12 contém o comparativo dos valores de fluxos para a rede destinada ao cálculo da reatância do eixo direto, enquanto a Tabela 13 apresenta o comparativo para os fluxos da rede designada ao cálculo da rede em quadratura.

Tabela 12 – Tabela comparativa de fluxos rede L_d sem ferro para máquina de entreferro constante

Local	EFCAD		CADES	DIFERENÇA	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
	Wb/m	Wb	Wb		
Φ_T	2,93E-02	2,12E-03	2,14E-03	0,53%	0,53%
ΦE_{F1}	1,96E-03	2,84E-04	3,04E-04	6,73%	0,90%
ΦE_{F2}	3,90E-03	5,66E-04	6,07E-04	7,33%	1,95%
ΦE_{F3}	3,86E-03	5,59E-04	6,07E-04	8,58%	2,26%
ΦE_{F4}	2,95E-03	4,27E-04	4,55E-04	6,62%	1,33%
ΦE_{F5}	8,39E-04	1,22E-04	1,52E-04	24,75%	1,42%
ΦE_{F6}	2,42E-04	3,50E-05	1,09E-05	-69,00%	-1,14%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 13 – Tabela comparativa de fluxos rede L_q sem ferro para máquina de entreferro constante

Local	EFCAD		CADES	DIFERENÇA	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
	Wb/m	Wb	Wb		
Φ_T	1,08E-02	1,57E-03	1,60E-03	2,31%	2,31%
ΦE_{F1}	2,13E-04	3,09E-05	7,89E-06	-74,47%	-1,47%
ΦE_{F2}	7,10E-04	1,03E-04	6,55E-05	-36,33%	-2,38%
ΦE_{F3}	3,01E-03	4,36E-04	6,19E-04	41,90%	11,67%
ΦE_{F4}	2,99E-03	4,34E-04	4,55E-04	5,02%	1,39%
ΦE_{F5}	1,94E-03	2,81E-04	3,04E-04	8,00%	1,43%
ΦE_{F6}	9,86E-04	1,43E-04	1,52E-04	6,23%	0,57%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando as duas tabelas, pode-se verificar a presença de uma coluna de diferença e uma de diferença significativa. A coluna da diferença representa a diferença dos fluxos encontrados através da rede de relutâncias e da simulação de elementos finitos de um ponto. Já a diferença significativa representa esta diferença ponderada em relação ao fluxo total da máquina. As equações para o cálculo da diferença e da diferença significativa são apresentadas abaixo, respectivamente.

$$D_{if} = \frac{(Fluxo_{CADES} - Fluxo_{EFCAD})}{Fluxo_{EFCAD}} \quad (24)$$

$$D_{if\text{ significativa}} = \frac{(Fluxo_{CADES} - Fluxo_{EFCAD})}{Fluxo_{EFCAD_TOTAL}} \quad (25)$$

Verificando a Tabela 12 é possível constatar um elevado valor de diferença para as fluxos ΦE_{F5} e ΦE_{F6} . Isso ocorre, pois o fluxo ΦE_{F6} apresenta diversos caminhos de fluxo dispersos e, por estar totalmente localizado fora da sapata polar, sua modelagem é mais complicada e suscetível a erros, entretanto esse fluxo possui

baixo valor e não traz grande impacto para o resultado. Já o fluxo $\Phi_{E_{F5}}$ se encontra metade sobre o polo e metade fora da sapata polar fazendo com que o caminho de fluxo seja de difícil representação e medição ocasionando assim o elevado valor de diferença. Situação semelhante é vista na Tabela 13, onde os fluxos $\Phi_{E_{F1}}$ e $\Phi_{E_{F2}}$ apresentam elevado valor de diferença por estarem fora do polo e, conseqüentemente, possuírem uma modelagem mais complexa, enquanto o $\Phi_{E_{F3}}$ se encontra dividido entre o polo e fora do polo, sendo assim de difícil representação e medição.

Aplicando a equação (23) se encontra o valor o fluxo concatenado para a rede de eixo direto e em quadratura, sendo seus valores 1,6035 Wb e 0,9792 Wb respectivamente. Calculado o fluxo concatenado das duas redes, aplica-se o esse valor na equação (22) para se obter as reatâncias de eixo direto e em quadratura.

Para validar as redes de relutâncias desenvolvidas, seus resultados foram comparados com os obtidos pela simulação em elementos finitos através do EFCAD. Os resultados e as diferenças são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparação dos resultados das redes propostas sem ferro com as simulações em elementos finitos para máquina de entreferro constante

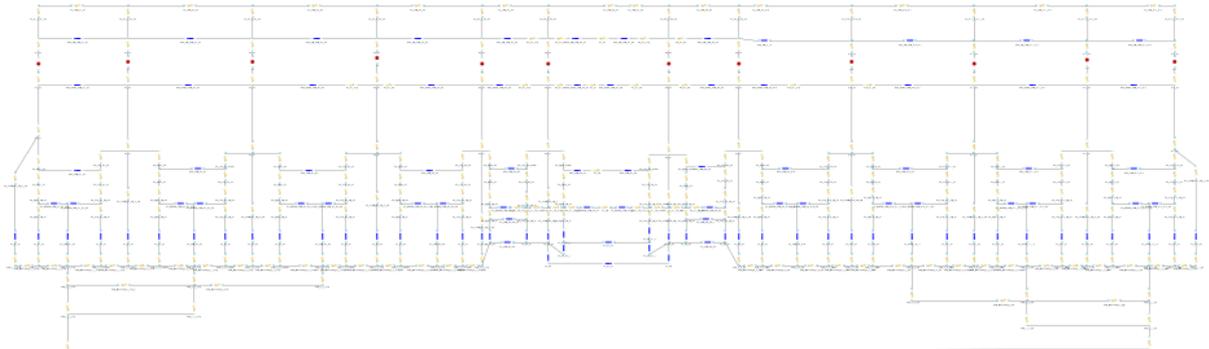
Indutância	Elementos Finitos	Rede de Relutâncias	Diferença
L_{max}	183,7 mH	190,0 mH	3,4 %
L_{min}	119,4 mH	116,2 mH	2,7 %

Fonte: Moura et al (2020)

Desta forma, o valor da indutância de eixo direto L_d , obtido pela rede implementada, conforme procedimento sugerido por Jones (1967) é 96,2 mH. Da mesma forma, a indutância de eixo em quadratura L_q , é 58,75 mH. Com a equação (22), as reatâncias de eixo direto X_d e em quadratura X_q calculadas a partir das redes propostas, são, respectivamente, 29,8 Ω e 18,3 Ω . Percebe-se que a diferença das indutâncias L_{max} e L_{min} é baixa, logo as redes de relutâncias atendem seu propósito.

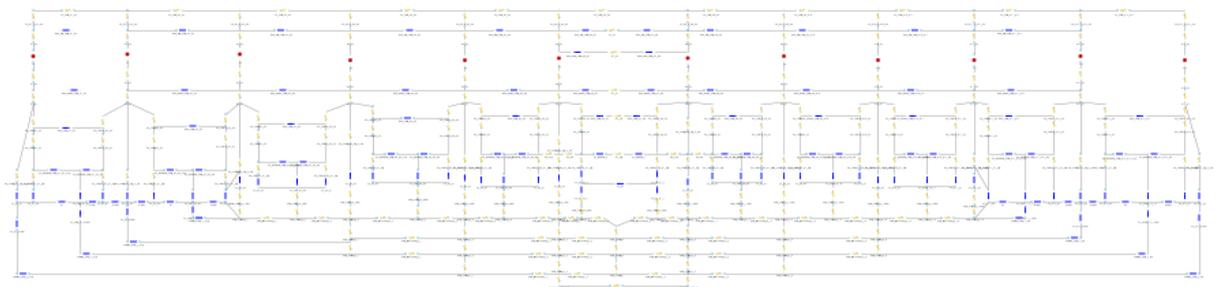
Em seguida, as redes foram melhoradas com a adição do material ferromagnético e dos caminhos dispersos de fluxos. Assim é possível realizar análise da máquina quando ela estiver saturada, o que não é possível com a rede que não possui o ferro. Estas redes podem ser vistas na Figura 35 e Figura 36 e correspondem às redes contidas nas Figura 25 e Figura 28, respectivamente, implementadas no CADES.

Figura 35 – Rede L_d com ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Autoria Própria (2022)

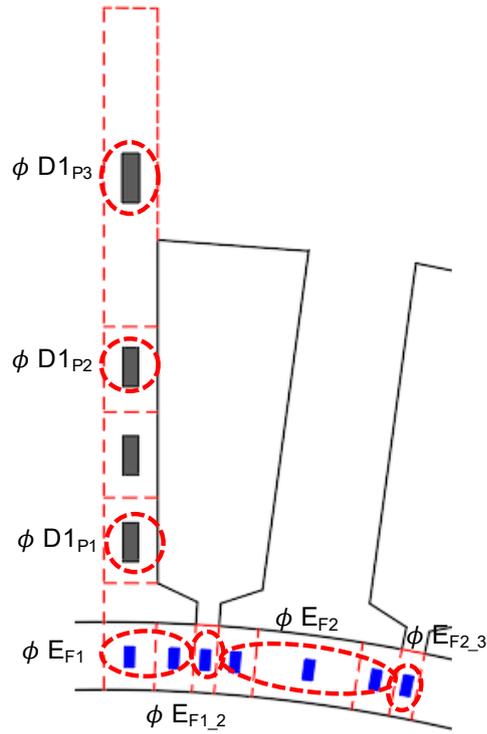
Figura 36 – Rede L_q com ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Autoria Própria (2022)

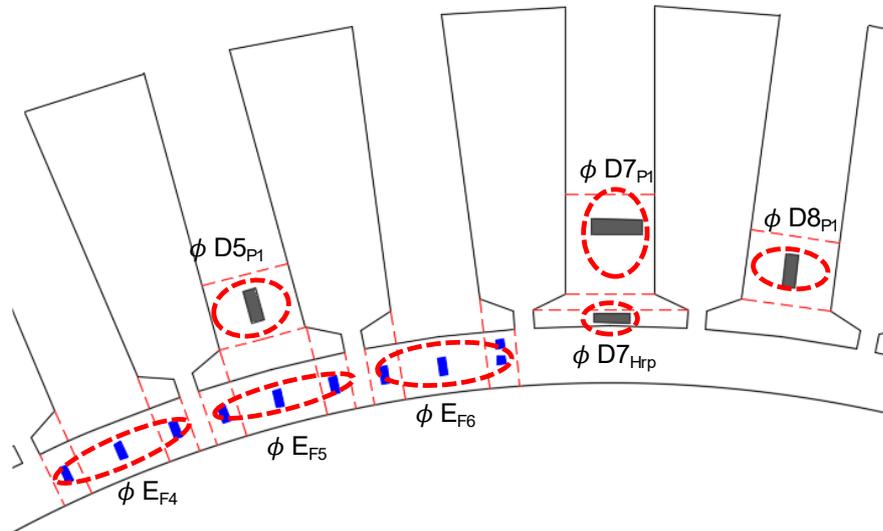
Novamente as redes foram validadas através da comparação dos fluxos obtidos através das redes e da simulação por elementos finitos. Os fluxos medidos para as redes L_d e L_q podem ser vistos na Figura 37 e Figura 38. As Tabela 15 e Tabela 16 resumem esses fluxos.

Figura 37 – Fluxos medidos para a rede L_d com ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 38 – Fluxos medidos para a rede L_q com ferro para máquina de entreferro constante



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 15 – Tabela comparativa de fluxos rede L_d com ferro para máquina de entreferro constante

Local	EFCAD		CADES	DIFERENÇA	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
	Wb/m	Wb	Wb		
Φ_T	2,93E-02	2,12E-03	2,24E-03	5,63%	5,63%
ΦE_{F1}	1,96E-03	2,84E-04	2,82E-04	-1,02%	-0,14%
$\Phi E_{F1\ 2}$	3,57E-04	5,18E-05	5,15E-05	-0,48%	-0,01%
ΦE_{F2}	3,90E-03	5,66E-04	5,63E-04	-0,53%	-0,14%
$\Phi E_{F2\ 3}$	3,51E-04	5,10E-05	5,14E-05	0,94%	0,02%
$\Phi D1_{p1}$	2,06E-03	2,99E-04	2,82E-04	-5,68%	-0,80%
$\Phi D1_{p2}$	2,06E-03	2,99E-04	3,08E-04	3,00%	0,42%
$\Phi D1_{p3}$	$\Phi D1_{p1}$	2,91E-04	3,08E-04	5,78%	0,79%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 16 – Tabela comparativa de fluxos rede L_q com ferro para máquina de entreferro constante

Local	EFCAD		CADES	DIFERENÇA	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
	Wb/m	Wb	Wb		
Φ_T	1,08E-02	1,57E-03	1,70E-03	8,39%	8,39%
ΦE_{F4}	2,99E-03	4,34E-04	4,17E-04	-3,83%	-1,06%
ΦE_{F5}	1,94E-03	2,81E-04	2,86E-04	1,79%	0,32%
ΦE_{F6}	9,86E-04	1,43E-04	1,47E-04	2,75%	0,25%
$\Phi D5_{p1}$	2,12E-03	3,07E-04	3,12E-04	1,72%	0,34%
$\Phi D8_{p1}$	1,06E-03	1,53E-04	1,51E-04	-1,41%	-0,14%
$\Phi D7_{p1}$	1,91E-04	2,77E-05	3,10E-05	11,97%	0,21%
$\Phi D7_{Hrp}$	2,53E-04	3,67E-05	3,67E-05	-0,19%	0,00%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Com o auxílio da equação (23), os fluxos concatenados encontrados são: 1,6415 Wb para a rede de eixo direto e 0,9203 Wb para a rede de eixo em quadratura. Os resultados e as diferenças entre a simulação por elementos finitos e pela rede de relutâncias são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Comparação dos resultados das redes propostas com ferro com as simulações em elementos finitos para máquina de entreferro constante

Indutância	Elementos Finitos	Rede de Relutâncias	Diferença
L_{max}	197,5 mH	196,9 mH	0,3 %
L_{min}	121,7 mH	119,7 mH	1,63 %

ΩFonte: Autoria Própria (2022)

Pode-se verificar, por meio da Tabela 17, que a diferença da indutância máxima (L_{max}) é pequena, enquanto a da indutância mínima (L_{min}) é um pouco maior, em torno de 10%. Isso ocorreu pois é mais complexo calcular a indutância mínima devido a presença de mais caminhos de dispersão. Entretanto, apesar de ser possível utilizar essas redes de relutâncias no projeto de um geradores síncronos é interessante refiná-las antes para redução dos valores de diferença. Os valores das indutâncias de eixo direto L_d e em quadratura L_q são, respectivamente, 98,45 mH e 55,2 mH. As reatâncias de eixo direto X_d e em quadratura X_q são, respectivamente, 30,91 Ω e 17,33 Ω .

5.1 Análise de robustez

5.1.1 Variação de densidade de corrente para máquina de entreferro constante

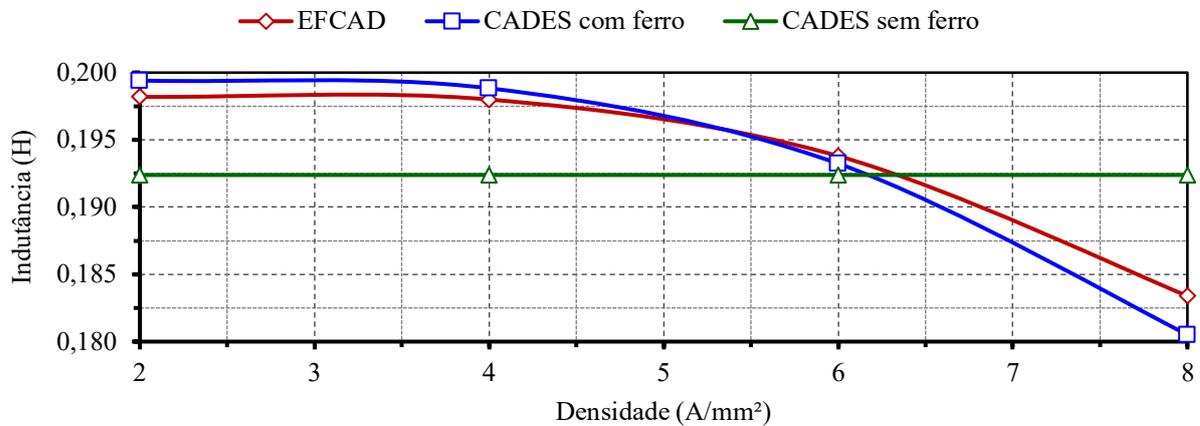
Realizou-se um teste de robustez onde pode ser observado o comportamento das redes de relutâncias, com e sem ferro, para a máquina de entreferro constante em situações de diferentes carregamentos da máquina. O teste consiste em simular a máquina, tanto na simulação por elementos finitos quanto pelo CADES, com valores diversos de densidade de corrente e comparar os valores de L_d e L_q encontrados para cada densidade. A máquina em operação nominal possui uma densidade de 5 A/mm², assim adotou-se valores de densidade de 2 a 8 para a realização do teste robustez. Pode-se verificar os resultados obtidos através das Tabela 18 e Tabela 19, além dos Gráfico 3 e Gráfico 4.

Tabela 18 – Análise de robustez para redes L_d com e sem ferro para máquina de entreferro constante

Densidade de Corrente	EFCAD	Rede de relutâncias com ferro	Rede de relutâncias sem ferro
2 A/mm ²	1,982E-01 H	1,994E-01 H	1,924E-01 H
4 A/mm ²	1,980E-01 H	1,988E-01 H	1,924E-01 H
6 A/mm ²	1,938E-01 H	1,932E-01 H	1,924E-01 H
8 A/mm ²	1,834E-01 H	1,805E-01 H	1,924E-01 H

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Gráfico 3 - Análise de robustez para redes L_d com e sem ferro para máquina de entreferro constante



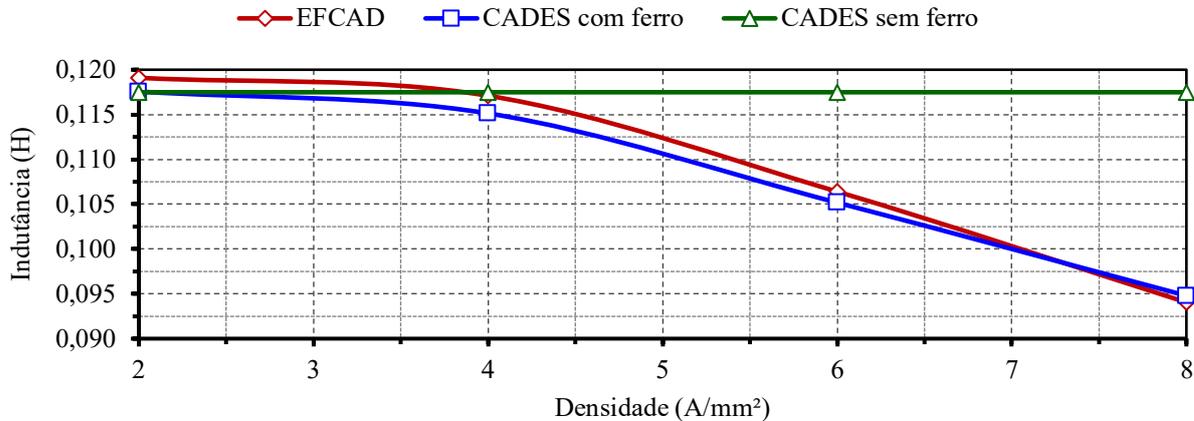
Fonte: Aatoria Própria (2022)

Tabela 19 – Análise de robustez para redes L_q com e sem ferro para máquina de entreferro constante

Densidade de Corrente	EFCAD	Rede de relutâncias com ferro	Rede de relutâncias sem ferro
2 A/mm ²	1,191E-01 H	1,176E-01 H	1,175E-01 H
4 A/mm ²	1,17E-01 H	1,151E-01 H	1,175E-01 H
6 A/mm ²	1,06E-01 H	1,052E-01 H	1,175E-01 H
8 A/mm ²	9,41E-02 H	9,479E-02 H	1,175E-01 H

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Gráfico 4 - Análise de robustez para redes L_q com e sem ferro para máquina de entreferro constante



Percebe-se que independentemente do nível de carregamento da máquina os valores de L_d e L_q , para as redes que não contemplam o ferro, não sofrem variação, logo nota-se que as redes sem a presença do ferro, apesar de possuírem um bom resultado para o ponto de operação nominal, não são recomendadas para projetos onde existe a previsão da máquina operar fora do ponto nominal. Já as redes que contemplam o material ferromagnético seguem o comportamento da máquina para diferentes níveis de carregamento e podem ser empregadas em projetos onde existe a previsão da máquina operar fora do ponto nominal.

5.1.2 Verificação e variação de densidade de corrente para máquina de entreferro variável

Com o objetivo de realizar mais testes de robustez as redes de relutâncias propostas foram aplicadas em uma máquina distinta, ou seja, com número de polos, frequência, número de ranhuras e dimensões diferentes, além de possuir entreferro variável. Normalmente os geradores síncronos possuem entreferro variável, uma vez que esse perfil contribui para que a densidade de fluxo no entreferro contenha um formato senoidal e isso colabora para que a máquina tenha menos perdas no ferro e menos harmônicas de tensão e corrente. O entreferro fica maior à medida que se caminha em direção às extremidades da sapata polar. Sua variação depende da posição angular (θ) e pode ser calculado através da seguinte equação (Boldea, 2016):

$$E_F(\theta) = \frac{E_F}{\cos(\theta P)} \quad (26)$$

onde:

E_F é o entreferro da máquina;

θ é o ângulo;

P é o número de polos.

A nova máquina foi desenvolvida baseada em Bazzo, Moura e Carlson (2021) e tem suas especificações apresentadas na Tabela 20.

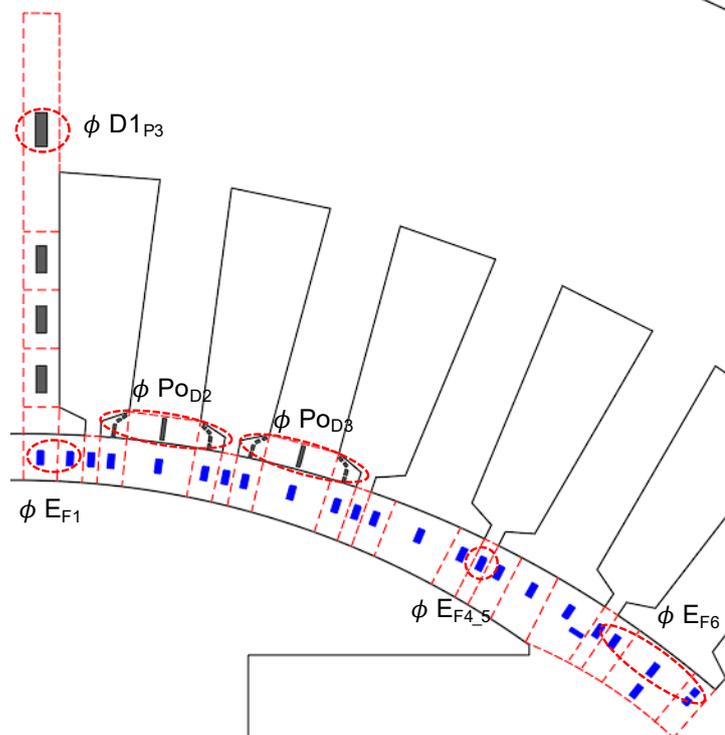
Tabela 20 – Tabela com as especificações técnicas da máquina de entreferro variável

Simbologia	Descrição	Valor	Unidade
P_s	Potência de saída	75	kW
V_s	Tensão	690	V
FP	Fator de Potência	0,9	-
f	Frequência	60	Hz
n	Rotação	1200	Rpm

Fonte: Autoria Própria (2022)

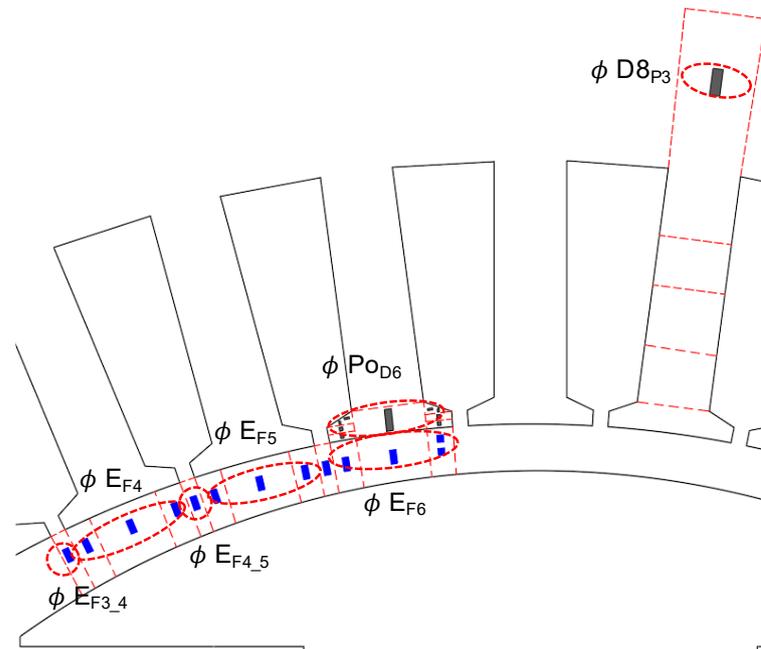
Foram comparados os fluxos encontrados por meio das redes e da simulação por elementos finitos. Os fluxos medidos para as redes L_d e L_q podem ser vistos na Figura 39 e Figura 40. As Tabela 21 e Tabela 22 mostram esses fluxos.

Figura 39 – Fluxos medidos para a rede L_d para máquina de entreferro variável



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 40 – Fluxos medidos para a rede L_q para máquina de entreferro variável



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 21 – Tabela comparativa de fluxos rede L_d para máquina de entreferro variável

Local	EFCAD		CADES	DIFERENÇA	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
	Wb/m	Wb	Wb		
Φ_T	5,47E-02	6,94E-03	7,49E-03	7,87%	7,87%
$\Phi_{E_{F1}}$	4,36E-03	1,11E-03	1,08E-03	-2,58%	-0,41%
$\Phi_{E_{F4_5}}$	3,71E-04	9,42E-05	9,40E-05	-0,20%	0,00%
$\Phi_{E_{F6}}$	4,93E-04	1,25E-04	1,36E-04	8,86%	0,16%
$\Phi_{D1_{P3}}$	9,25E-03	1,17E-03	1,18E-03	0,83%	0,14%
$\Phi_{P_{O_{D2}}}$	8,34E-03	2,12E-03	2,31E-03	8,94%	2,73%
$\Phi_{P_{O_{D3}}}$	8,16E-03	2,07E-03	2,24E-03	8,18%	2,44%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 22 – Tabela comparativa de fluxos rede L_q para máquina de entreferro variável

Local	EFCAD		CADES	DIFERENÇA	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
	Wb/m	Wb	Wb		
Φ_T	1,90E-02	4,82E-03	5,07E-03	5,12%	5,12%
$\Phi E_{F3\ 4}$	5,26E-04	1,34E-04	1,25E-04	-6,54%	-0,18%
ΦE_{F4}	4,06E-03	1,03E-03	1,16E-03	12,95%	2,77%
$\Phi E_{F4\ 5}$	4,88E-04	1,24E-04	1,19E-04	-3,92%	-0,10%
ΦE_{F5}	3,40E-03	8,63E-04	9,64E-04	11,70%	2,09%
ΦE_{F6}	2,02E-03	5,12E-04	5,28E-04	3,02%	0,32%
$\Phi D8_{P3}$	2,13E-03	5,42E-04	5,41E-04	-0,16%	-0,02%
$\Phi P0_{D6}$	2,22E-03	5,64E-04	5,91E-04	4,72%	0,55%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Os fluxos concatenados encontrados, por meio da equação (23), são: 1,6415 Wb para a rede de eixo direto e 0,9203 Wb para a rede de eixo em quadratura. Os resultados e as diferenças são entre a simulação por elementos finitos e pela rede de relutâncias são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Comparação dos resultados das redes propostas com as simulações em elementos finitos para máquina de entreferro variável

Indutância	Elementos Finitos	Rede de Relutâncias	Diferença
L_{max}	42,2 mH	43,5 mH	-3 %
L_{min}	20,2 mH	22,1 mH	-0,71 %

Fonte: Autoria Própria (2022)

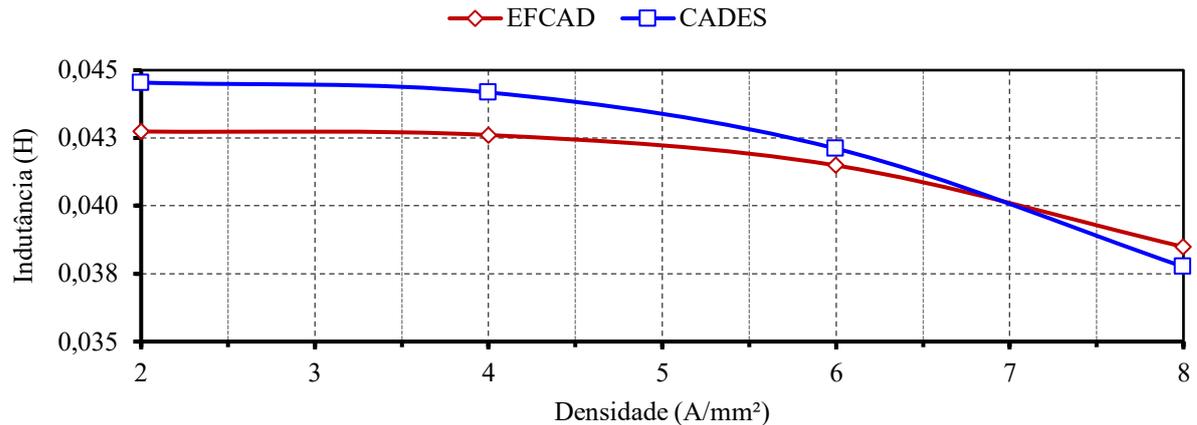
Nota-se, através da Tabela 23, que as diferenças das indutâncias máxima e mínima entre a simulação por elementos finitos e pela rede de relutâncias é bem pequena, validando assim as redes propostas. Os valores das indutâncias de eixo direto L_d e em quadratura L_q são, respectivamente, 98,45 mH e 55,2 mH. As reatâncias de eixo direto X_d e em quadratura X_q são, respectivamente, 8,19 Ω e 4,16 Ω . Logo, pode-se verificar que as redes de relutâncias cumprem o seu papel.

Por fim, apresenta-se através das Tabela 24 e Tabela 25 e dos Gráfico 5 e Gráfico 6 os resultados dos testes de carregamento para a segunda máquina.

Tabela 24 – Análise de robustez para rede L_d para máquina de entreferro variável

Densidade de corrente	EFCAD	Rede de Relutâncias
2 A/mm ²	4,274E-02 mH	4,454E-02 mH
4 A/mm ²	4,261E-02 mH	4,418E-02 mH
6 A/mm ²	4,149E-02 mH	4,211E-02 mH
8 A/mm ²	3,849E-02 mH	3,776E-02 mH

Fonte: Autoria Própria (2022)

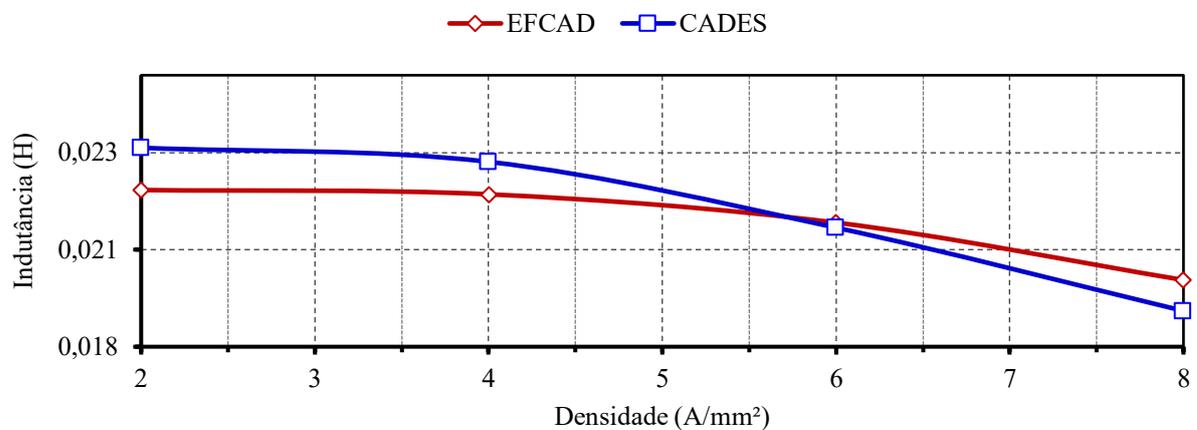
Gráfico 5 - Análise de robustez para redes L_d para máquina de entreferro variável

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 25 – Análise de robustez para rede L_q para máquina de entreferro variável

Densidade de corrente	EFCAD	Rede de Relutâncias
2 A/mm ²	2,20E-02 mH	2,313E-02 mH
4 A/mm ²	2,19E-02 mH	2,277E-02 mH
6 A/mm ²	2,12E-02 mH	2,107E-02 mH
8 A/mm ²	1,97E-02 mH	1,892E-02 mH

Fonte: Autoria Própria (2022)

Gráfico 6 - Análise de robustez para redes L_q para máquina de entreferro variável

Fonte: Autoria Própria (2022)

Verifica-se que as redes de relutâncias propostas conseguem simular o comportamento da máquina em diferentes níveis de carregamento, comprovando assim sua robustez.

6 CONCLUSÃO

O gerador síncrono é o principal componente para a geração de energia elétrica mundial e por isso é importante conhecer o procedimento para projetar um gerador. Esse processo é complicado e possui inúmeros passos, sendo o cálculo da tensão terminal um deles.

Para se calcular a tensão terminal de um gerador é necessário calcular as reatâncias de eixo direto e em quadratura. É possível calcular essas relutâncias através da utilização de redes de relutâncias que possuem um bom compromisso entre exatidão e custo computacional comparado com os métodos analíticos e simulação por elementos finitos.

Por existir pouca literatura dedicada à implementação de redes de relutâncias, essa dissertação apresentou uma metodologia para a criação de redes de relutâncias dedicadas ao cálculo das reatâncias de eixo direto e em quadratura para serem utilizadas em análise e projeto de geradores síncronos.

As redes propostas foram aplicadas em duas máquinas, sendo uma delas de entreferro constante e outra de entreferro variável, e tiveram seus resultados verificados por meio da simulação por elementos finitos. Essa metodologia também foi aplicada em diferentes graus de saturação para verificar sua robustez.

As primeiras redes propostas apresentaram um bom resultado. Entretanto elas não possuíam o material ferromagnético da máquina. Assim, notou-se que elas não calcularam o valor de fluxo corretamente para situações em que a máquina estava saturada.

Em seguida, essas primeiras redes foram melhoradas através da adição do material ferromagnético e de caminhos de fluxos dispersos. Essas redes novas mantiveram um bom resultado e dessa vez conseguiram representar o comportamento do fluxo da máquina em situações de saturação.

Por fim, as redes que consideram o ferro foram adequadas para serem utilizadas em máquinas com o entreferro variável. Após alguns testes notou-se que os valores de fluxo apresentaram um bom resultado e elas possuíam uma boa robustez para a questão da saturação.

As redes expostas podem ser empregadas em outras máquinas que possuem características de enrolamento e número de ranhuras por polo iguais. Caso as características do enrolamento mudem (por exemplo camada dupla, outro

encurtamento de passo), ou o número de ranhuras por polo mudem, essas redes não poderão ser utilizadas pois a distribuição das fontes de força magnetomotriz será diferente. Porém a metodologia proposta sim, assim essa dissertação pode ser adotada como base para a construção de outras redes.

A partir dessa dissertação pode-se pensar em possíveis temas de trabalhos futuros. Uma dessas opções é implementar as redes propostas em um projeto ótimo de gerador. É possível também, aplicar a metodologia apresentada para criar redes de relutâncias que possam calcular as reatâncias de eixo direto e em quadratura para máquinas de topologias diversas, como por exemplo máquinas de imã permanente. Outra sugestão, é criar um modelo que represente outras grandezas como fluxo, temperaturas, perdas para a aplicação em *digital twins*.

REFERÊNCIAS

BAZZO, Thiago de Paula Machado; MOURA, Vinicius de Oliveira; CARLSON, Renato. A Step-by-Step Procedure to Perform Preliminary Designs of Salient-Pole Synchronous Generators. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 16, p. 4989, 14 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14164989>..

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

BOLDEA, I. **Synchronous Generator**. II. ed. Timisoara: CRC Press, v. único, 2016.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.

C.V. Jones, The Unified Theory of Electrical Machines. Butterworths, 1967, pp. 156-160.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: LTC Editora Ltda, 1999.

DELINCHANT, B. et al. An optimizer using the software component paradigm for the optimization of engineering systems. **Compel - The International Journal For Computation And Mathematics In Electrical And Electronic Engineering**, v. 26, n. 2, p. 368-379, 10 abr. 2007.

DOGAN, H. et al. Multistatic Reluctance Network Modeling for the Design of Permanent-Magnet Synchronous Machines. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 49, n. 5, p. 2347-2350, Maio 2013.

Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. 2019.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY Jr, C; UMANS, S.D. **Electric Machinery**. 6ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. : um futuro sustentável. **Revista Usp**, [s.l.], n. 72, p. 6-15, 1 fev. 2007. Universidade de Sao Paulo, Agência USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i72p6-15>.

HEBALA, Ahmed; GHONEIM, Walid A. M.; ASHOUR, Hamdy A.. Detailed Design Procedures for PMSG Direct-Driven by Wind Turbines. **Journal Of Electrical Engineering & Technology**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 251-263, jan. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42835-018-00010-y>.

HENDERSHOT, J.R.; MILLER, T.J.e.. **Design of brushless permanent-magnet machines**. 2. ed. Venice: Motor Design Books, 2010.

HOBBSAWM, E. J. **A era das revoluções: 1789-1848**. 4. ed. Londres: Paz & Terra, 2012

HUGHES, A. **Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications**. 3. ed. Oxford: Newnes, 2006.

International Energy Agency, 2018.

J.P. A. Bastos, N. Sadowski, EFCAD: Finite element 2d system for electromagnetic thermal field analysis, 2008. 76 p. Disponível em: <<http://twixar.me/3Pwn>>. Acesso em: 15 de maio de 2020.

LALIBERTE, G. A comparison of generator excitation systems. **EE Publishers**, 2020. Disponível em: <https://www.ee.co.za/article/comparison-generator-excitation-systems.html>. Acesso em: 20 set. 2020.

MI, C. et al. Analytical Method for Predicting the Air-Gap Flux of Interior-Type Permanent-Magnet Machines. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 40, n. 1, p. 50-58, Janeiro 2004.

MOURA, V. O.; NEVES, J. P. C.; BAZZO, G. G. M. E. T. P. M. **Procedimento para criar redes de relutâncias para modelar as reatâncias de eixo direto e em quadratura de geradores síncronos**. XIV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG). Rio de Janeiro: Anais do XIV MOMAG. 2020. p. 1-5.

NAKAMURA, K. et al. Iron Loss Calculation in a Three-Phase-Laminated-Core Variable Inductor Based on Reluctance Network Analysis. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 45, n. 10, p. 4781 - 4784, Outubro 2009. ISSN 1941-0069.

OSTOVIC, V. Computation of Saturated Permanent-Magnet AC Motor Performance by Means of Magnetic Circuits. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, v. IA-23, n. 5, p. 836-841, Setembro 1987. ISSN 1939-9367.

PELOUX, B. D. et al. Automatic generation of sizing static models based on reluctance networks for the optimization of electromagnetic devices. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 42, n. 4, p. 715 - 718, Março 2006.

PYRHÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVÁ, Valéria. **Design of rotating electrical machines**. Witshire: John Wiley & Sons, 2008.

SADOWSKI, N. **Máquinas Elétricas** - (Transitório, Regime Permanente e Acionamento). Florianópolis, 2012.

SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics**. 3. ed. Ontario: Wiley, 2013.

SIM, J.-H. et al. Three-Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method for Precise and Fast Analysis of PM-Assisted Claw-Pole Synchronous Motor. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 1, p. 160-171, Fevereiro 2018. ISSN 1939-9367.

TAQAVI, O.; TAGHAVI, N. Development of a Mixed Solution of Maxwell's Equations and Magnetic Equivalent Circuit for Double-Sided Axial-Flux Permanent Magnet Machines. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 57, n. 4, p. 1-11, Abril 2021. ISSN 1941-0069.

WU, S. et al. Accurate Analytical Method for Magnetic Field Calculation of Interior PM Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 36, n. 1, p. 325-337, Março 2021. ISSN 1558-0059.

XIE, Hongqin; KREBS, Guillaume; HASSAN, Maya Hage; ZHANG, Man; MARCHAND, Claude; REN, Zhuoxiang. A New Reluctance Network-Based Method With Complementary Distributed Magnetomotive Forces. **IEEE Transactions On Magnetics**, [S.L.], v. 55, n. 6, p. 1-5, jun. 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tmag.2019.2909407>.

YOSHIDA, Y.; NAKAMURA, K.; ICHINOKURA, O. A Method for Calculating Eddy Current Loss Distribution Based on Reluctance Network Analysis. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 47, n. 10, p. 4155-4158, Outubro 2011. ISSN 1941-0069.

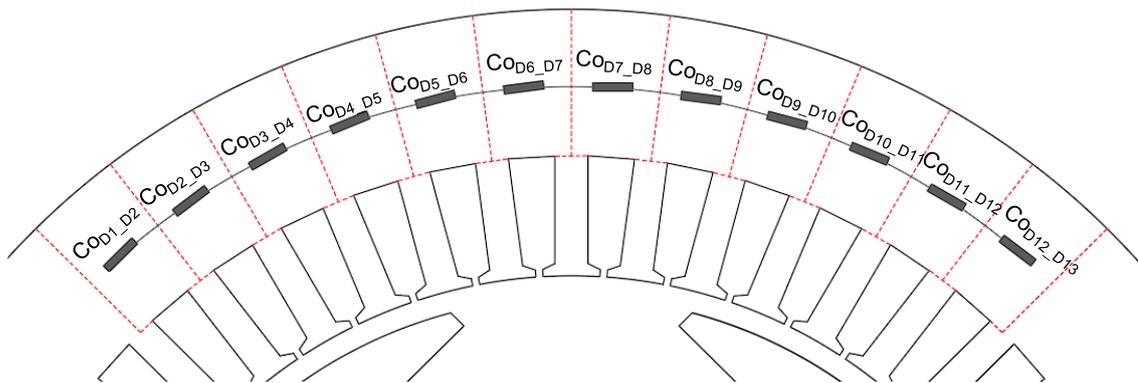
ZHU, L. et al. Analytical Modeling of Open-Circuit Air-Gap Field Distributions in Multisegment and Multilayer Interior Permanent-Magnet Machines. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 45, n. 8, p. 3121-3130, Agosto 2009.

APÊNDICE A

Nesse apêndice são apresentadas as equações que definem as áreas e comprimentos de cada uma das relutâncias presentes na rede destinada ao cálculo da reatância de eixo direto. Para facilitar a definição dos elementos contidos nessa rede a máquina foi dividida nos seguintes setores: (i) coroa do estator, (ii) ranhura, (iii) polo, (iv) entreferro e (v) dente.

O primeiro setor descrita (i) é a coroa do estator, que pode ser vista na Figura 41. Importante comentar que as linhas tracejadas em vermelho delimitam a região da máquina que cada relutância representa.

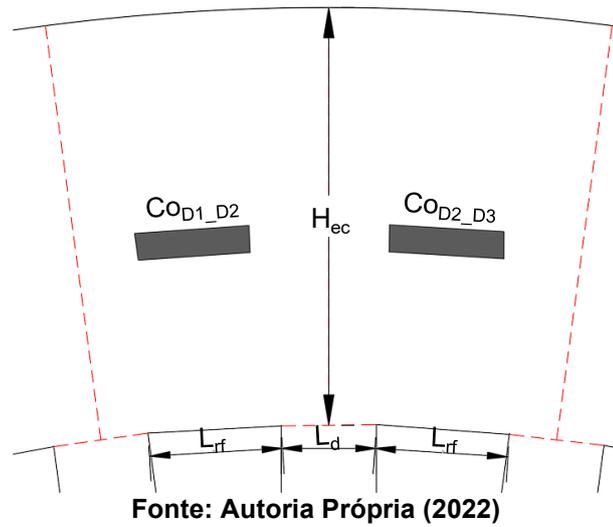
Figura 41 – Relutâncias da coroa do estator



Fonte: Autoria Própria (2022)

Como pode ser observado, a coroa contém 12 relutâncias tangenciais semelhantes entre si. Por meio da Figura 42 são apresentadas duas relutâncias com maior detalhamento afim de visualizar melhor as dimensões dessas relutâncias.

Figura 42 – Dimensões das relutâncias da coroa



O comprimento e a área das relutâncias da coroa são representados por:

$$C_{Co_{D1_D2}} = \left(\frac{D_{Ee}}{2} - \frac{h_{ec}}{2} \right) \cdot \alpha_r \quad (A1)$$

$$A_{Co_{D1_D2}} = h_{ec} \cdot C_{ax} \quad (A2)$$

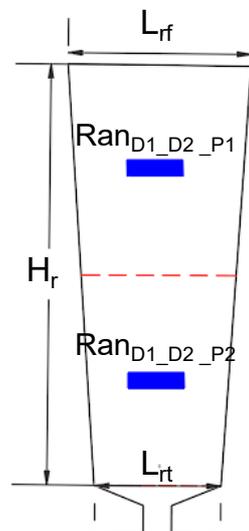
onde:

α_r é o passo angular da ranhura;

C_{ax} é o comprimento axial da máquina.

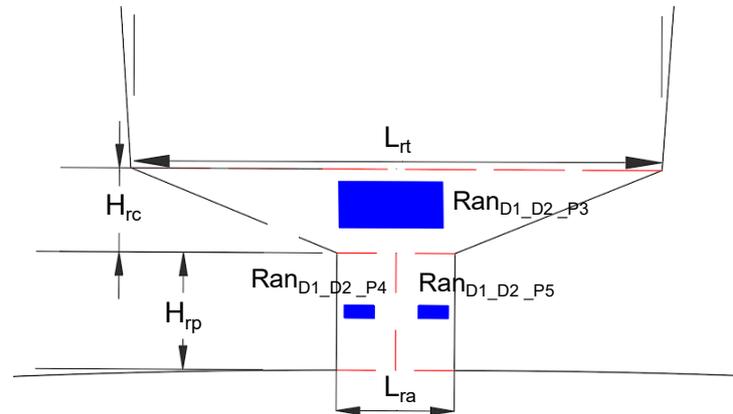
O segundo setor (ii) apresentado corresponde às ranhuras do estator, sendo elas definidas por 5 relutâncias que podem ser vistas na Figura 43 e na Figura 44. Vale ressaltar que todas as ranhuras são modeladas de modo equivalente na rede de eixo direto.

Figura 43 – Dimensões das relutâncias do corpo da ranhura



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 44 – Dimensões das relutâncias da abertura e do colarinho da ranhura



Fonte: Autoria Própria (2022)

O comprimento da relutância $Ran_{D1_D2_P1}$ é:

$$C_{Ran_{D1_D2_P1}} = L_{rf} \quad (A3)$$

A área da relutância $Ran_{D1_D2_P1}$ é dada por:

$$A_{Ran_{D1_D2_P1}} = \frac{H_r}{2} \cdot C_{ax} \quad (A4)$$

Para a relutância $Ran_{D1_D2_P2}$, o comprimento e a área são calculados como:

$$C_{Ran_{D1_D2_P2}} = L_{rt} \quad (A5)$$

$$A_{Ran_{D1_D2_P2}} = \frac{H_r}{2} \cdot C_{ax} \quad (A6)$$

O comprimento da relutância $Ran_{D1_D2_P3}$ é apresentado por:

$$C_{Ran_{D1_D2_P3}} = L_{ra} + L_{rc} \quad (A7)$$

A área da relutância $Ran_{D1_D2_P3}$ é determinada por:

$$A_{Ran_{D1_D2_P3}} = h_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A8)$$

Para as relutâncias $Ran_{D1_D2_P4}$ e $Ran_{D1_D2_P5}$, o comprimento e a área são definidos por:

$$C_{Ran_{D1_D2_Px}} = \frac{L_{ra}}{2} \quad (A9)$$

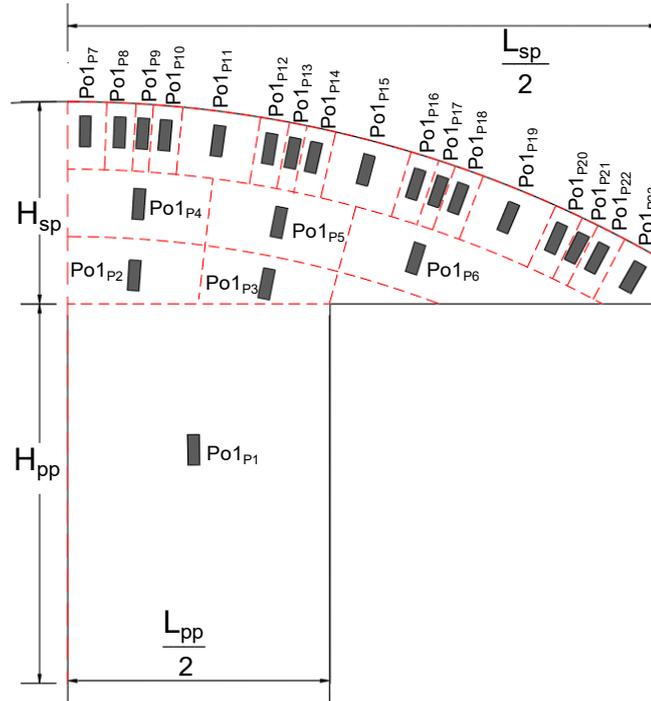
$$A_{Ran_{D1_D2_Px}} = h_{rp} \cdot C_{ax} \quad (A10)$$

onde:

x pode ser o subíndice 4 ou 5.

O terceiro setor (iii) a ser analisado é o polo da máquina. Para facilitar a explicação da definição das relutâncias do polo, primeiro são apresentadas as relutâncias radiais, conforme Figura 45, e posteriormente as tangenciais, vide Figura 46.

Figura 45 – Dimensões das relutâncias radiais do polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

O comprimento da relutância $Po1_{p1}$ é dado por:

$$C_{Po1_{p1}} = H_{pp} \quad (A11)$$

A área da relutância $Po1_{p1}$ é dada por:

$$A_{Po1_{p1}} = \left(\frac{L_{pp}}{2} \right) \cdot C_{ax} \quad (A12)$$

Para as relutâncias $Po1_{p2}$ e $Po1_{p3}$, o comprimento e a área são expressos por:

$$C_{Po1_{px}} = \frac{H_{ps}}{3} \quad (A13)$$

$$A_{Po1_{px}} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{5H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] \cdot C_{ax} \quad (A14)$$

onde:

x pode ser o subíndice 2 ou 3.

O comprimento das relutâncias $Po1_{p4}$, $Po1_{p5}$ e $Po1_{p6}$ é:

$$C_{Po1_{Px}} = \frac{H_{ps}}{3} \quad (A15)$$

onde:

x pode ser o subíndice 4, 5 ou 6.

A área das relutâncias $Po1_{p4}$, $Po1_{p5}$ e $Po1_{p6}$ é descrita por:

$$A_{Po1_{Px}} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{3H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] \cdot C_{ax} \quad (A16)$$

onde:

x pode ser o subíndice 4, 5 ou 6.

Para a relutância $Po1_{p7}$, o comprimento e área são calculados por:

$$C_{Po1_{p7}} = \frac{H_{ps}}{3} \quad (A17)$$

$$A_{Po1_{p7}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} \right] - \frac{L_{ra}}{2} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{2} \quad (A18)$$

O comprimento da relutância $Po1_{p8}$ é descrito por:

$$C_{Po1_{p8}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_1 \quad (A19)$$

onde:

D_1 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 1;

A área da relutância $Po1_{p8}$ é dada por:

$$A_{Po1_{p8}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} \right] - \frac{L_{ra}}{2} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{2} \quad (A20)$$

Para a relutância $Po1_{p9}$, o comprimento e área são dados por:

$$C_{Po1_{p9}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_2 \quad (A21)$$

$$A_{Po1_{p9}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A22)$$

onde:

D_2 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 2;

O comprimento da relutância $Po1_{P10}$ é:

$$C_{Po1_{P10}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_3 \quad (A23)$$

onde:

D_3 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 3;

A área da relutância $Po1_{P10}$ é descrita por:

$$A_{Po1_{P10}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A24)$$

Para a relutância $Po1_{P11}$, o comprimento e a área são descritos por:

$$C_{Po1_{P11}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_4 \quad (A25)$$

$$A_{Po1_{P11}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A26)$$

onde:

D_4 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 4;

O comprimento da relutância $Po1_{P12}$ é definido por:

$$C_{Po1_{P12}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_5 \quad (A27)$$

onde:

D_5 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 5;

A área da relutância $Po1_{P12}$ é dada por:

$$A_{Po1_{P12}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A28)$$

Para a relutância $Po1_{P13}$, o comprimento e a área são:

$$C_{Po1_{P13}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_6 \quad (A29)$$

$$A_{Po1_{P13}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A30)$$

onde:

D_6 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 6;

O comprimento da relutância $Po1_{P14}$ é:

$$C_{Po1_{P14}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_7 \quad (A31)$$

onde:

D_7 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 7;

A área da relutância $Po1_{P14}$ é dada por:

$$A_{Po1_{P14}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A32)$$

Para a relutância $Po1_{P15}$, o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{Po1_{P15}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_8 \quad (A33)$$

$$A_{Po1_{P15}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A34)$$

onde:

D_8 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 8;

O comprimento da relutância $Po1_{P16}$ é mostrado por:

$$C_{Po1_{P16}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_9 \quad (A35)$$

onde:

D_9 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 9;

A área da relutância $Po1_{P16}$ é:

$$A_{Po1_{P16}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A36)$$

Para relutância $Po1_{P17}$, o comprimento e a área são:

$$C_{Po1_{P17}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_{10} \quad (A37)$$

$$A_{Po1_{P17}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A38)$$

onde:

D_{10} é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 10;

O comprimento da relutância $Po1_{P18}$ é:

$$C_{Po1_{P18}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_{11} \quad (A39)$$

onde:

D_{11} é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 11;

A área da relutância $Po1_{P18}$ é:

$$A_{Po1_{P18}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A40)$$

Para a relutância $Po1_{P19}$, o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{Po1_{P19}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_{12} \quad (A41)$$

$$A_{Po1_{P19}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A42)$$

onde:

D_{12} é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 12;

O comprimento da relutância $Po1_{P20}$ é dado por:

$$C_{Po1_{P20}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_{13} \quad (A43)$$

onde:

D_{13} é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 13;

A área da relutância $Po1_{P20}$ é dada por:

$$A_{Po1_{P20}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \alpha r \right] - L_{ra} \right\} \cdot \frac{C_{ax}}{3} \quad (A44)$$

Para a relutância $Po1_{P21}$, seu comprimento e área são:

$$C_{Po1_{P21}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_{14} \quad (A45)$$

$$A_{Po1_{P21}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A46)$$

onde:

D_{14} é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 14;

O comprimento da relutância $Po1_{P22}$ é mostrado por:

$$C_{Po1_{P22}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_{15} \quad (A47)$$

onde:

D_{15} é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 15;

A área da relutância $Po1_{P22}$ é:

$$A_{Po1_{P22}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} - \frac{L_{ra}}{2} \right] \cdot \frac{C_{ax}}{2} \right. \quad (A48)$$

Para a relutância $Po1_{P23}$, o comprimento e a área são:

$$C_{Po1_{P23}} = \frac{H_{ps}}{3} - D_{16} \quad (A49)$$

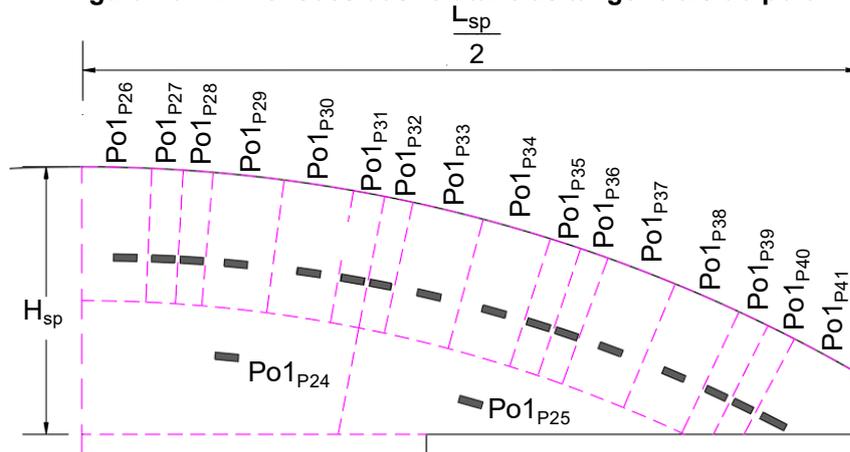
$$A_{Po1_{P23}} = \left\{ \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{ps}}{6} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} - \frac{L_{ra}}{2} \right] \cdot \frac{C_{ax}}{2} \right. \quad (A50)$$

onde:

D_{16} é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 16;

Nessa segunda etapa de apresentação são mostradas as relutâncias tangenciais do polo.

Figura 46 – Dimensões das relutâncias tangenciais do polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para as relutâncias $Po1_{P24}$, $Po1_{P25}$, o comprimento e a área são:

$$C_{Po1_{Px}} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{3H_{ps}}{4} \right) \cdot \alpha r \quad (A51)$$

$$A_{Po1_{Px}} = \frac{H_{ps}}{2} \cdot C_{ax} \quad (A52)$$

onde:

x pode ser o subíndice 24 ou 25.

O comprimento das relutâncias $Po1_{P26}$, $Po1_{P29}$, $Po1_{P30}$, $Po1_{P33}$, $Po1_{P34}$, $Po1_{P37}$, $Po1_{P38}$ e $Po1_{P41}$ é expresso por:

$$C_{Po1Px} = \left(\frac{L_{rc} + L_d}{2} \right) \quad (A53)$$

onde:

x pode ser o subíndice 26, 29, 30, 33, 34, 37, 38 ou 41.

A área das relutâncias $Po1_{P26}$, $Po1_{P29}$, $Po1_{P30}$, $Po1_{P33}$, $Po1_{P34}$, $Po1_{P37}$, $Po1_{P38}$ e $Po1_{P41}$ é:

$$A_{Po1Px} = \frac{H_{ps}}{2} \cdot C_{ax} \quad (A54)$$

onde:

x pode ser o subíndice 26, 29, 30, 33, 34, 37, 38 ou 41.

Para as relutâncias $Po1_{P27}$, $Po1_{P28}$, $Po1_{P31}$, $Po1_{P32}$, $Po1_{P35}$, $Po1_{P36}$, $Po1_{P39}$ e $Po1_{P40}$, o comprimento e a área são:

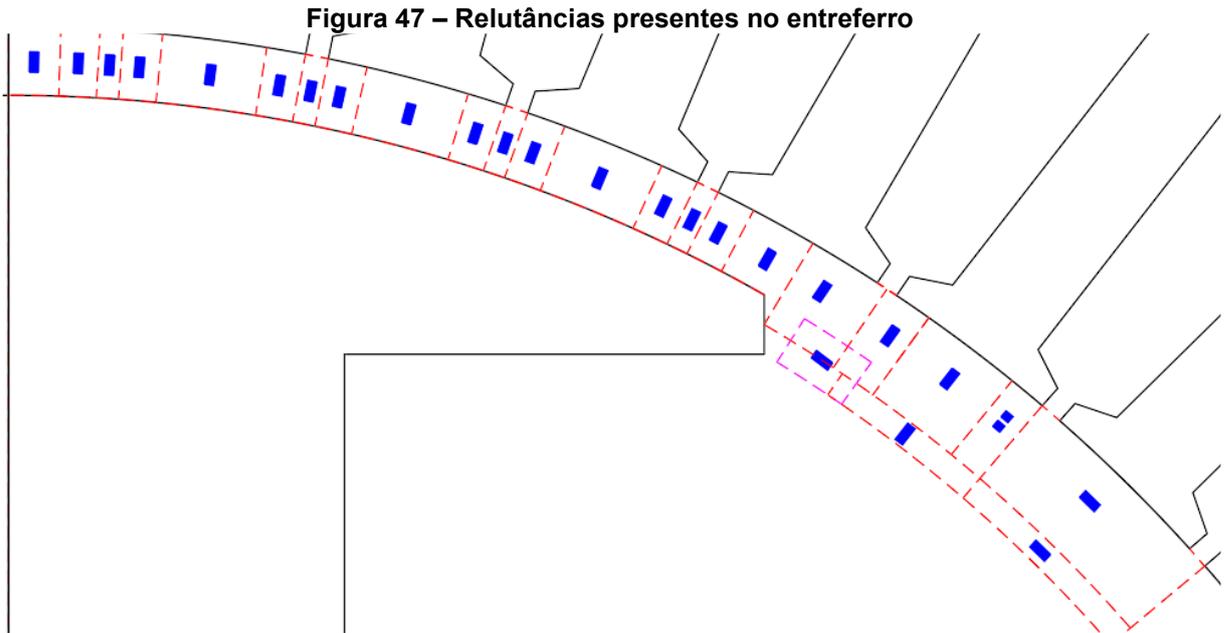
$$C_{Po1Px} = \left(\frac{L_{rc} + L_{ra}}{2} \right) \quad (A55)$$

$$A_{Po1Px} = \frac{H_{ps}}{2} \cdot C_{ax} \quad (A56)$$

onde:

x pode ser o subíndice 27, 28, 31, 32, 35, 36, 39 ou 40.

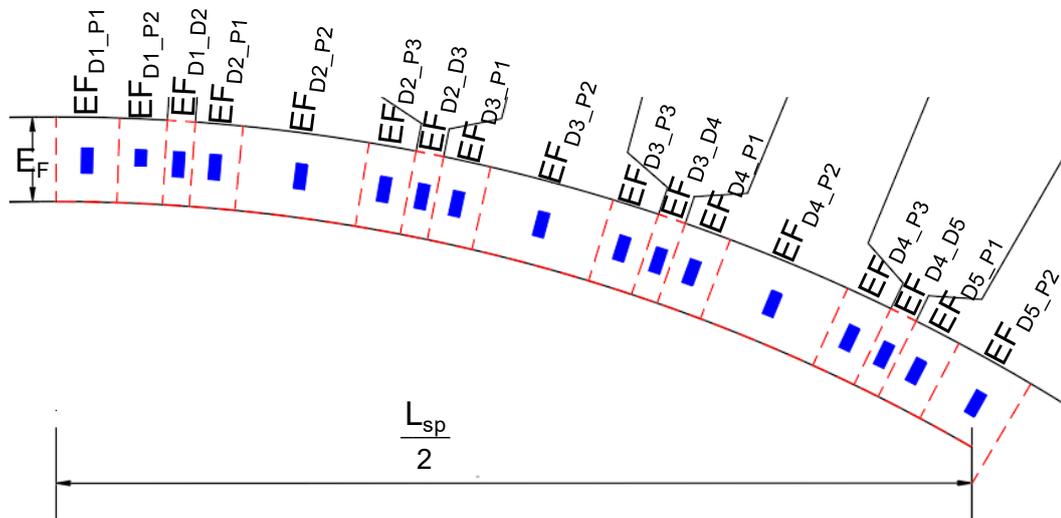
O próximo setor da máquina (iv) a ser explanado corresponde ao entreferro, conforme Figura 47. Por simplicidade, aproveitando-se a simetria da máquina, são apresentadas somente metade das relutâncias do entreferro.



Fonte: Autoria Própria (2022)

As Figura 48 e Figura 49 representam com maior detalhe as relutâncias presentes sobre o polo e fora do polo, respectivamente.

Figura 48 – Dimensões das relutâncias presentes no entreferro sobre o polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

O comprimento da relutância $EF_{D1,P1}$ é dado por:

$$C_{EF_{D1,P1}} = E_F \quad (\text{A57})$$

A área da relutância $EF_{D1,P1}$ é:

$$E_{EF_{D1,P1}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (\text{A58})$$

Para a relutância $EF_{D1,P2}$, o comprimento e área são:

$$C_{EF_{D1_P2}} = E_F + D_1 \quad (A59)$$

$$A = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A60)$$

O comprimento da relutância EF_{D1_D2} é descrito por:

$$C_{EF_{D1_D2}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + D_2 \quad (A61)$$

A área da relutância EF_{D1_D2} é:

$$A = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A62)$$

Para a relutância EF_{D2_P1} , o comprimento e a área são calculados como:

$$C_{EF_{D2_P1}} = E_F + D_3 \quad (A63)$$

$$A_{EF_{D2_P1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A64)$$

O comprimento da relutância EF_{D2_P2} é:

$$C_{EF_{D2_P2}} = E_F + D_4 \quad (A65)$$

A área da relutância EF_{D2_P2} é:

$$A_{EF_{D2_P2}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A66)$$

Para a relutância EF_{D2_P3} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D2_P3}} = E_F + D_5 \quad (A67)$$

$$A_{EF_{D2_P3}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A68)$$

O comprimento da relutância EF_{D2_D3} é expresso por:

$$C_{EF_{D2_D3}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + D_6 \quad (A69)$$

A área da relutância EF_{D2_D3} é:

$$A_{EF_{D2_D3}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A70)$$

Para relutância EF_{D3_P1} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D3_P1}} = E_F + D_7 \quad (A71)$$

$$A_{EF_{D3_P1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A72)$$

O comprimento da relutância EF_{D3_P2} é apresentado por:

$$C_{EF_{D3_P2}} = E_F + D_8 \quad (A73)$$

A área da relutância EF_{D3_P2} é:

$$A_{EF_{D3_P2}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A74)$$

Para a relutância EF_{D3_P3} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D3_P3}} = E_F + D_9 \quad (A75)$$

$$A_{EF_{D3_P3}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A76)$$

O comprimento da relutância EF_{D3_D4} é dado por:

$$C_{EF_{D3_D4}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + D_{10} \quad (A77)$$

A área da relutância EF_{D3_D4} é determinada por:

$$A_{EF_{D3_D4}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A78)$$

Para a relutância EF_{D4_P1} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D4_P1}} = E_F + D_{11} \quad (A79)$$

$$A_{EF_{D4_P1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A80)$$

O comprimento o da relutância EF_{D4_P2} é:

$$C_{EF_{D4_P2}} = E_F + D_{12} \quad (A81)$$

A área relutância EF_{D4_P2} é representada:

$$A_{EF_{D4_P2}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A82)$$

Para a relutância EF_{D4_P3} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D4_P3}} = E_F + D_{13} \quad (A83)$$

$$C_{EF_{D4_P3}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A84)$$

O comprimento da relutância EF_{D4_D5} é:

$$C_{EF_{D4_D5}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + D_{14} \quad (A85)$$

A área da relutância EF_{D4_D5} é definida por:

$$A_{EF_{D4_D5}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (A86)$$

Para a relutância EF_{D5_P1} , o comprimento e a área são definidos por:

$$C_{EF_{D5_P1}} = E_F + D_{15} \quad (A87)$$

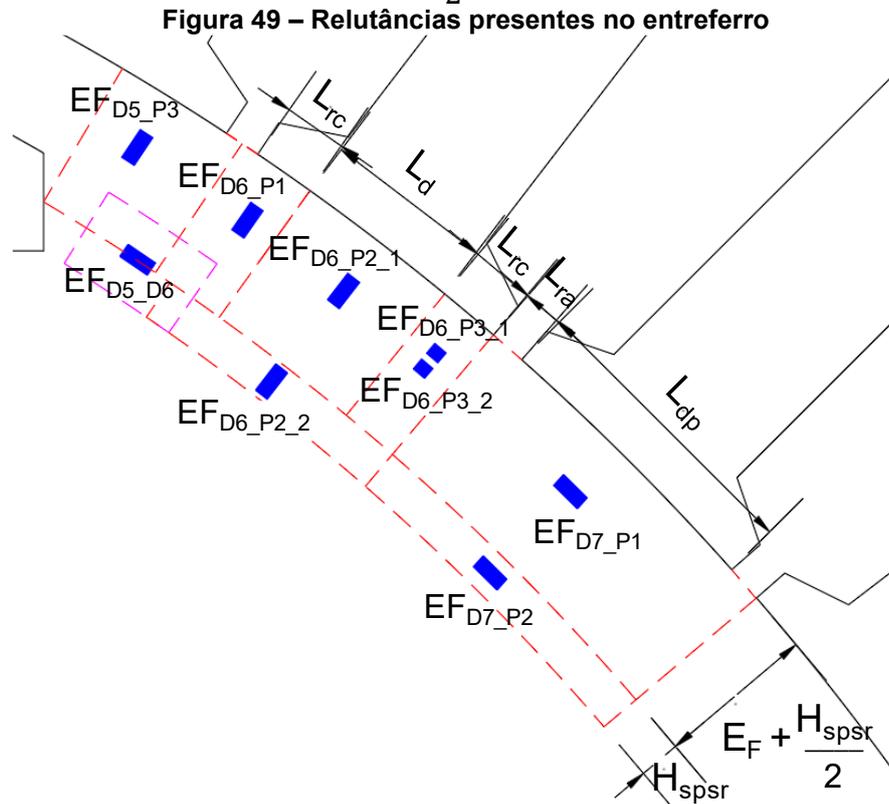
$$A_{EF_{D5_P1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A88)$$

O comprimento da relutância EF_{D5_P2} é dado por:

$$C_{EF_{D5_P2}} = E_F + D_{16} \quad (A89)$$

A área da relutância EF_{D5_P2} é apresentada por:

$$A_{EF_{D5_P2}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (A90)$$



Fonte: Autoria Própria (2022)

O comprimento da relutância EF_{D5_P3} é:

$$C_{EF_{D5_P3}} = E_F + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (A91)$$

A área da relutância EF_{D5_P3} é dada por:

$$A_{EF_{D5_P3}} = \left(\frac{L_{dp} + L_{ra}}{2} \right) \cdot C_{ax} \quad (A92)$$

O comprimento da relutância EF_{D5_D6} é expresso por:

$$C_{EF_{D5_D6}} = \left(\frac{D_{re} - H_{spsr}}{2} \right) \cdot t_{hrt} \quad (A93)$$

A área da relutância EF_{D5_D6} é:

$$A_{EF_{D5_D6}} = H_{spsr} \cdot C_{ax} \quad (A94)$$

Para a relutância EF_{D6_P1} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D6,P1}} = E_F + \frac{H_{sp\text{sr}}}{2} \quad (\text{A95})$$

$$A_{EF_{D6,P1}} = \left(L_{rc} + \left(\frac{L_{ra}}{2} \right) \right) \cdot C_{ax} \quad (\text{A96})$$

O comprimento da relutância $EF_{D6,P2,1}$ é:

$$C_{EF_{D6,P2,1}} = E_F + \frac{H_{sp\text{sr}}}{2} \quad (\text{A97})$$

A área da relutância $EF_{D6,P2,1}$ é descrita por:

$$A_{EF_{D6,P2,1}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (\text{A98})$$

O comprimento da relutância $EF_{D6,P2,2}$ é descrito por:

$$C_{EF_{D6,P2,2}} = \frac{H_{sp\text{sr}}}{2} \quad (\text{A99})$$

A área da relutância $EF_{D6,P2,2}$ é determinada por:

$$A_{EF_{D6,P2,2}} = L_{dp} \cdot C_{ax} \quad (\text{A100})$$

O comprimento das relutâncias $EF_{D6,P3,1}$ e $EF_{D6,P3,2}$ é:

$$C_{EF_{D6,P3,x}} = \frac{E_F + \frac{H_{sp\text{sr}}}{2}}{2} \quad (\text{A101})$$

onde:

x pode ser o subíndice 1 ou 2.

A área das relutâncias $EF_{D6,P3,1}$ e $EF_{D6,P3,2}$ é dada por:

$$A_{EF_{D6,P3,x}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (\text{A102})$$

onde:

x pode ser o subíndice 1 ou 2.

Para a relutância $EF_{D7,P1}$, o comprimento e a área são definidos por:

$$C_{EF_{D7,P1}} = (2 \cdot L_{ra}) + L_{dp} \quad (\text{A103})$$

$$A_{EF_{D7,P1}} = \left(E_F + \frac{H_{sp\text{sr}}}{2} \right) \cdot C_{ax} \quad (\text{A104})$$

O comprimento da relutância $EF_{D7,P2}$ é dado por:

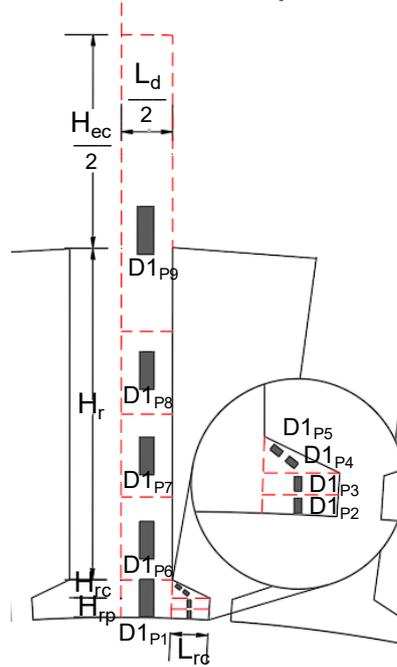
$$C_{EF_{D7_{P2}}} = 2 \cdot L_{ra} + L_{dp} \quad (A105)$$

A área da relutância $EF_{D7_{P2}}$ é determinada por:

$$A_{EF_{D7_{P2}}} = \frac{H_{spsr}}{2} \cdot C_{ax} \quad (A106)$$

Por fim, o último setor (v) da rede a ser descrito corresponde aos dentes. A Figura 50 representa os dentes 1 e 13 da rede proposta.

Figura 50 – Dimensões das relutâncias presentes nos dentes 1 e 13



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a relutância $D1_{P1}$, o comprimento e a área são dados por:

$$C_{D1_{P1}} = H_{rp} + H_{rc} \quad (A107)$$

$$A_{D1_{P1}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (A108)$$

O comprimento das relutâncias $D1_{P2}$ e $D1_{P3}$ é expresso por:

$$C_{D1_{Px}} = \frac{H_{rp}}{2} \quad (A109)$$

onde:

x pode ser o subíndice 2 ou 3.

A área das relutâncias $D1_{P2}$ e $D1_{P3}$ é expressa por:

$$A_{D1_{Px}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A110)$$

onde:

x pode ser o subíndice 2 ou 3.

O comprimento das relutâncias $D1_{p4}$ e $D1_{p5}$ é:

$$C_{D1_{px}} = \frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \quad (\text{A111})$$

onde:

x pode ser o subíndice 4 ou 5.

A área das relutâncias $D1_{p4}$ e $D1_{p5}$ é dada por:

$$A_{D1_{px}} = \frac{3}{4} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \right) + H_{rc}^2 \right]} \cdot C_{ax} \quad (\text{A112})$$

onde:

x pode ser o subíndice 4 ou 5.

O comprimento das relutâncias $D1_{p6}$, $D1_{p7}$ e $D1_{p8}$ é dado por:

$$C_{D1_{px}} = \frac{H_r}{4} \quad (\text{A113})$$

onde:

x pode ser o subíndice 6, 7 ou 8.

A área as relutâncias $D1_{p6}$, $D1_{p7}$ e $D1_{p8}$ é representada por:

$$A_{D1_{px}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (\text{A114})$$

onde:

x pode ser o subíndice 6, 7 ou 8.

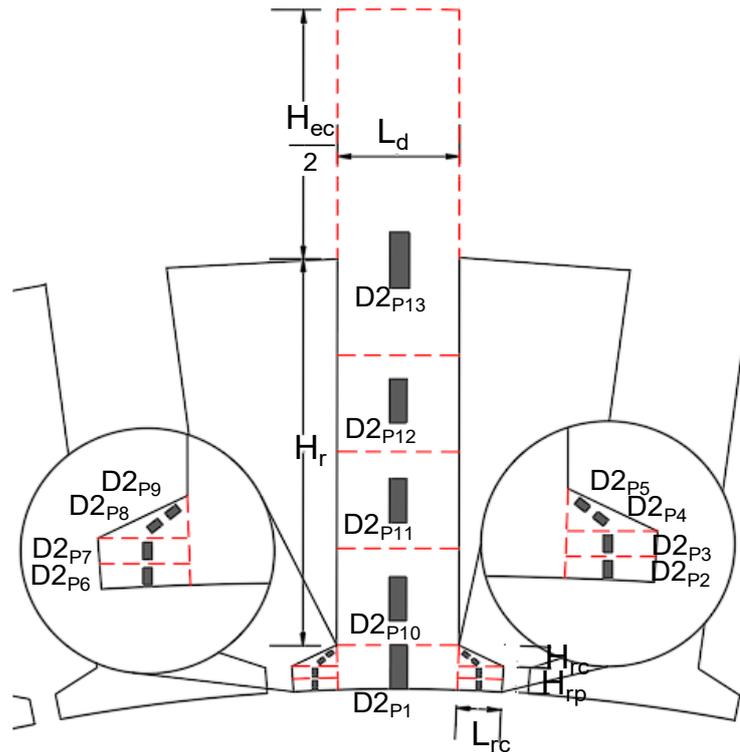
Para a relutância $D1_{p9}$, o comprimento e a área são:

$$C_{D1_{p9}} = \frac{H_r}{4} + H_{ec} \quad (\text{A115})$$

$$A_{D1_{p9}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (\text{A116})$$

Já para os dentes 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11 e 12, que são idênticos e podem ser vistos na Figura 51, são representados pelas seguintes dimensões.

Figura 51 – Dimensões das relutâncias presentes nos dentes: 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11 e 12



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a relutância $D2_{p_1}$, o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{D2_{p_1}} = H_{rp} + H_{rc} \quad (A117)$$

$$A_{D2_{p_1}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A118)$$

O comprimento das relutâncias $D2_{p_2}$, $D2_{p_3}$, $D2_{p_4}$ e $D2_{p_5}$ é expresso por:

$$C_{D1_{p_x}} = \frac{H_{rp}}{2} \quad (A119)$$

onde:

x pode ser o subíndice 2, 3, 4 ou 5.

A área das relutâncias $D2_{p_2}$, $D2_{p_3}$, $D2_{p_4}$ e $D2_{p_5}$ é dada por:

$$A_{D1_{p_2/p_3/p_4/p_5}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A120)$$

onde:

x pode ser o subíndice 2, 3, 4 ou 5.

Para as relutâncias $D2_{p_6}$, $D2_{p_7}$, $D2_{p_8}$ e $D2_{p_9}$, o comprimento e área são:

$$C_{D1P6/P7/P8/P9} = \frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \quad (A121)$$

$$A_{D1P6/P7/P8/P9} = \frac{3}{4} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \right) \right] + H_{rc}^2} \cdot C_{ax} \quad (A122)$$

onde:

x pode ser o subíndice 6, 7, 8 ou 9.

O comprimento das relutâncias $D2_{P10}$, $D2_{P11}$ e $D2_{P12}$ é representado por:

$$C_{D1P10/P11/P12} = \frac{H_r}{4} \quad (A123)$$

onde:

x pode ser o subíndice 10, 11 ou 12.

A área das relutâncias $D2_{P10}$, $D2_{P11}$ e $D2_{P12}$ é dada por:

$$A_{D1P10/P11/P12} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A124)$$

onde:

x pode ser o subíndice 10, 11 ou 12.

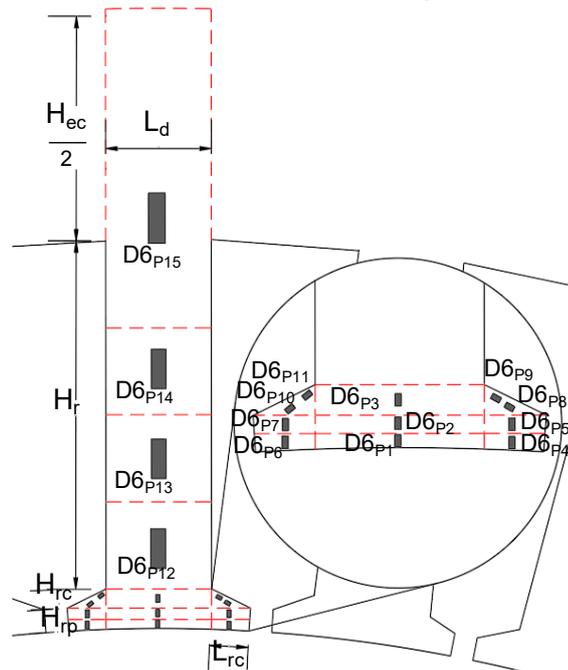
Para a relutância $D1_{P13}$, o comprimento e a área são:

$$C_{D1P13} = \frac{H_r}{4} + H_{ec} \quad (A125)$$

$$A_{D1P13} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A126)$$

Os dentes 6 e 8 são iguais e possuem relutâncias com as dimensões apresentadas abaixo. Para facilitar a explicação desses dentes são utilizadas as Figura 52 e Figura 53 mostrando as relutâncias radiais e tangenciais, respectivamente.

Figura 52 – Dimensões das relutâncias radiais presentes nos dentes 6 e 8



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para as relutâncias $D6_{P1}$ e $D6_{P2}$, o comprimento e a área são:

$$C_{D6_{P_x}} = \frac{H_{rp}}{2} \quad (A127)$$

$$A_{D6_{P_x}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A128)$$

onde:

x pode ser o subíndice 1 ou 2.

O comprimento da relutância $D6_{P3}$ é dado por:

$$C_{D6_{P3}} = H_{rc} \quad (A129)$$

A área da relutância $D6_{P3}$ é dada por:

$$A_{D6_{P3}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A130)$$

O comprimento das relutâncias $D6_{P4}$, $D6_{P5}$, $D6_{P6}$ e $D6_{P7}$ é expresso por:

$$C_{D6_{P_x}} = \frac{H_{rp}}{2} \quad (A131)$$

onde:

x pode ser o subíndice 4, 5, 6 ou 7.

A área das relutâncias $D6_{P4}$, $D6_{P5}$, $D6_{P6}$ e $D6_{P7}$ é dada por:

$$A_{D6Px} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A132)$$

onde:

x pode ser o subíndice 4, 5, 6 ou 7.

O comprimento das relutâncias $D6_{P8}$, $D6_{P9}$, $D6_{P10}$ e $D6_{P11}$ é:

$$C_{D6Px} = \frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \quad (A133)$$

onde:

x pode ser o subíndice 8, 9, 10 ou 11.

A área das relutâncias $D6_{P8}$, $D6_{P9}$, $D6_{P10}$ e $D6_{P11}$ é dada por:

$$A_{D6Px} = \frac{3}{4} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{H_{rc}^2 + L_{rc}^2}}{2} \right) + H_{rc}^2 \right]} \cdot C_{ax} \quad (A134)$$

onde:

x pode ser o subíndice 8, 9, 10 ou 11.

Para as relutâncias $D6_{P12}$, $D6_{P13}$ e $D6_{P14}$, o comprimento e área são representados por:

$$C_{D6Px} = \frac{H_r}{4} \quad (A135)$$

$$A_{D6Px} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A136)$$

onde:

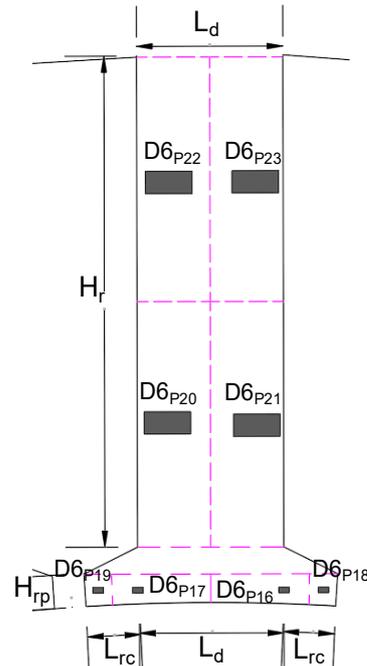
x pode ser o subíndice 12, 13 ou 14.

Para a relutância $D6_{P15}$, o comprimento e a área são:

$$C_{D6P15} = \frac{H_r}{4} + H_{ec} \quad (A137)$$

$$A_{D6P15} = L_d \cdot C_{ax} \quad (A138)$$

Figura 53 – Dimensões das relutâncias tangenciais presentes nos dentes 6 e 8



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para as relutâncias $D6_{P16}$ e $D6_{P17}$, o comprimento e a área são definidos por:

$$C_{D6_{Px}} = \left(\frac{L_{rc} + L_d}{2} \right) \quad (A139)$$

$$A_{D6_{Px}} = H_{rp} \cdot C_{ax} \quad (A140)$$

onde:

x pode ser o subíndice 16 ou 17.

O comprimento das relutâncias $D6_{P18}$ e $D6_{P19}$ é definido por:

$$C_{D6_{Px}} = \frac{L_{rc}}{2} \quad (A141)$$

onde:

x pode ser o subíndice 18 ou 19.

A área das relutâncias $D6_{P18}$ e $D6_{P19}$ é dada por:

$$A_{D6_{Px}} = H_{rp} \cdot C_{ax} \quad (A142)$$

onde:

x pode ser o subíndice 18 ou 19.

Para as relutâncias $D6_{P20}$, $D6_{P21}$, $D6_{P22}$ e $D6_{P23}$, o comprimento e a área são descritos por:

$$C_{D6Px} = \frac{L_d}{2} \quad (A143)$$

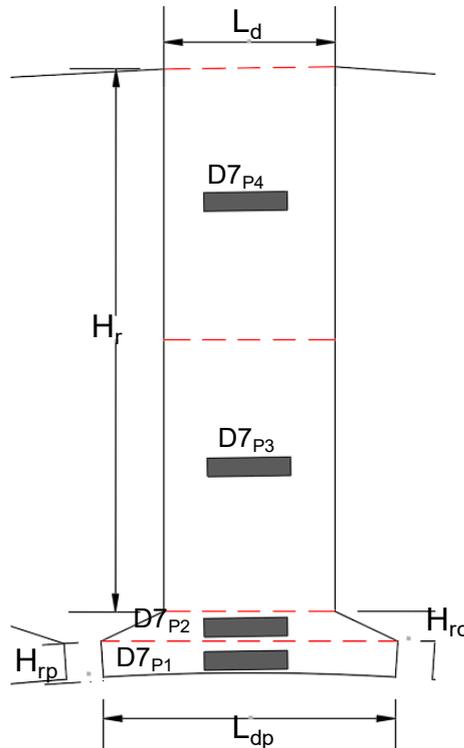
$$A_{D6Px} = \frac{H_r}{2} \cdot C_{ax} \quad (A144)$$

onde:

x pode ser o subíndice 20, 21, 22 ou 23.

Por fim, tem-se as relutâncias do dente 7, que podem ser vistas através da Figura 54.

Figura 54 – Dimensões das relutâncias do dente 7



Fonte: Autoria Própria (2022)

O comprimento da relutância $D7_{P1}$ é representado por:

$$C_{D7P1} = L_{dp} \quad (A145)$$

A área da relutância $D7_{P1}$ é representada por:

$$A_{D7P1} = H_{rp} \cdot C_{ax} \quad (A146)$$

Para a relutância $D7_{P2}$, o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{D7P2} = \frac{L_{rc}}{2} + L_d \quad (A147)$$

$$A_{D7P2} = H_{rc} \cdot C_{ax} \quad (A148)$$

O comprimento das relutâncias $D7_{P3}$ e $D7_{P4}$ são representados por:

$$C_{D7Px} = L_d \quad (\text{A149})$$

onde:

x pode ser o subíndice 3 ou 4.

A área das relutâncias $D7_{P3}$ e $D7_{P4}$ é:

$$A_{D7Px} = \frac{H_r}{2} \cdot C_{ax} \quad (\text{A150})$$

onde:

x pode ser o subíndice 3 ou 4.

APÊNDICE B

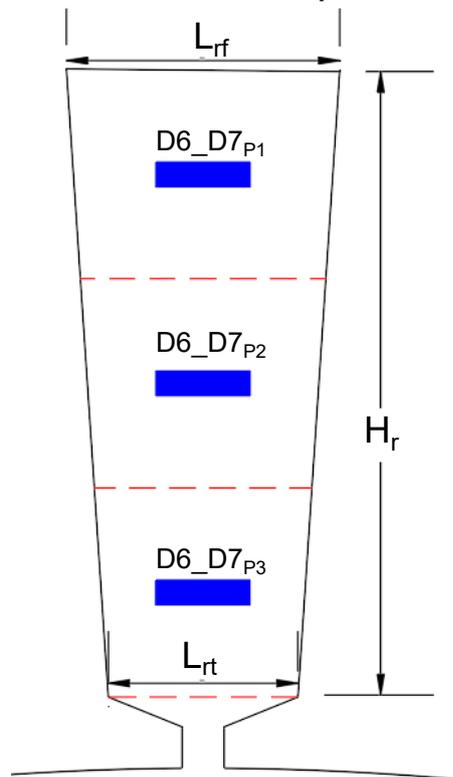
Nesse apêndice são descritas as equações que definem as áreas e comprimentos das relutâncias presentes na rede destinada ao cálculo da reatância de eixo em quadratura. Esse apêndice também divide a máquina nos seguintes setores: (i) coroa do estator, (ii) ranhura, (iii) polo, (iv) entreferro e (v) dente.

O primeiro setor (i) apresentado é a coroa do estator. As relutâncias presentes nessa região são as mesmas já definidas para a rede do eixo direto, conforme Figura 41 e Figura 42. Sendo assim pode-se considerar as equações (A1) e (A2) presentes no apêndice A.

O segundo setor (ii) a ser descrito são as ranhuras do estator. Vale comentar que as relutâncias contidas nas ranhuras 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 possuem as mesmas dimensões das relutâncias contidas no apêndice A, vide Figura 43, Figura 44 e equações (A3) a (A10).

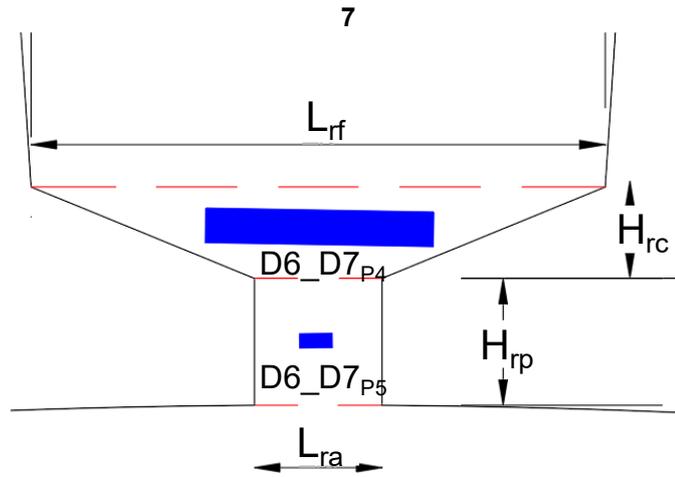
Para as ranhuras 6 e 7 tem-se as seguintes relutâncias, presentes nas Figura 55 e Figura 56.

Figura 55 – Dimensões das relutâncias do corpo da ranhura entre dentes 6 e 7



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 56 – Dimensões das relutâncias da abertura e do colarinho da ranhura entre dentes 6 e 7



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para relutância $Ran_{D6_D7_P1}$, o comprimento e a área são calculados como:

$$C_{Ran_{D6_D7_P1}} = L_{rf} \quad (B1)$$

$$A_{Ran_{D6_D7_P1}} = \frac{H_r}{3} \cdot C_{ax} \quad (B2)$$

O comprimento da relutância $Ran_{D6_D7_P2}$ é dado por:

$$C_{Ran_{D6_D7_P2}} = \left(\frac{L_{rf} + L_{rt}}{3} \right) \quad (B3)$$

A área da relutância $Ran_{D6_D7_P2}$ é:

$$A_{Ran_{D6_D7_P2}} = \frac{H_r}{3} \cdot C_{ax} \quad (B4)$$

Para a relutância $Ran_{D6_D7_P3}$, o comprimento e a área são expressos por:

$$C_{Ran_{D6_D7_P3}} = L_{rt} \quad (B5)$$

$$A_{Ran_{D6_D7_P3}} = \frac{H_r}{3} \cdot C_{ax} \quad (B6)$$

O comprimento da relutância $Ran_{D6_D7_P4}$ é descrito por:

$$C_{Ran_{D6_D7_P4}} = L_{ra} + L_{rc} \quad (B7)$$

A área da relutância $Ran_{D6_D7_P4}$ é:

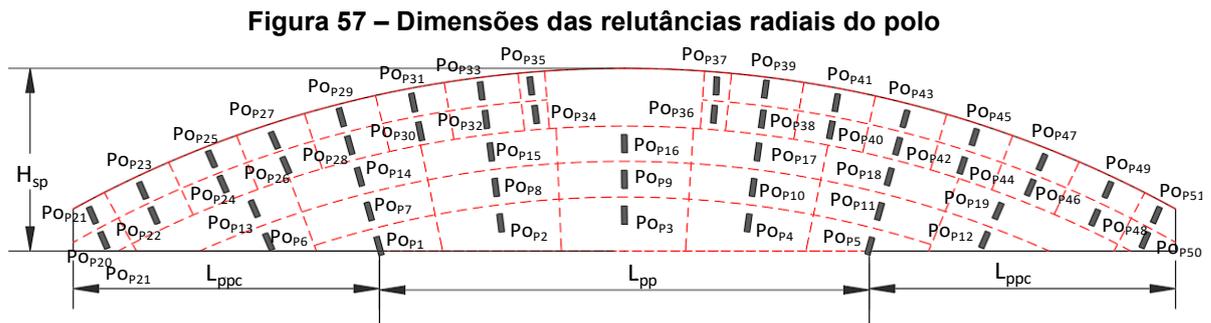
$$A_{Ran_{D6_D7_P4}} = H_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B8)$$

Para a relutância $Ran_{D6_D7_P5}$, o comprimento e a área são definidos por:

$$C_{RanD6_D7_P5} = L_{ra} \quad (B9)$$

$$A_{RanD6_D7_P5} = H_{rp} \cdot C_{ax} \quad (B10)$$

O próximo setor (iii) a ser explicado se refere ao polo da máquina. Novamente, adota-se a estratégia de comentar primeiro as relutâncias radiais, conforme Figura 57, e posteriormente as tangenciais, vide Figura 58.



Fonte: Autoria Própria (2022)

O comprimento das relutâncias PO_{p1} , PO_{p2} , PO_{p3} , PO_{p4} e PO_{p5} é dado por:

$$C_{PO_{px}} = \frac{H_{ps}}{5} \quad (B11)$$

onde:

x pode ser o subíndice 1, 2, 3, 4 ou 5.

A área das relutâncias PO_{p1} , PO_{p2} , PO_{p3} , PO_{p4} e PO_{p5} é:

$$A_{PO_{px}} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{4H_{ps}}{5} \right) \cdot \alpha r \right] \cdot C_{ax} \quad (B12)$$

onde:

x pode ser o subíndice 1, 2, 3, 4 ou 5.

Para as relutâncias PO_{p6} , PO_{p7} , PO_{p8} , PO_{p9} , PO_{p10} , PO_{p11} e PO_{p12} , o comprimento e área são expressos por:

$$C_{PO_{px}} = \frac{H_{ps}}{5} \quad (B13)$$

$$A_{PO_{px}} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{3H_{ps}}{5} \right) \cdot \alpha r \right] \cdot C_{ax} \quad (B14)$$

onde:

x pode ser o subíndice 6, 7, 8, 9, 10, 11 ou 12.

O comprimento das relutâncias $P01_{P13}$, $P01_{P14}$, $P01_{P15}$, $P01_{P16}$, $P01_{P17}$, $P01_{P18}$ e $P01_{P19}$ é definido por:

$$C_{P0Px} = \frac{H_{ps}}{5} \quad (B15)$$

onde:

x pode ser o subíndice 13, 14, 15, 16, 17, 18 ou 19.

A área das relutâncias $P01_{P13}$, $P01_{P14}$, $P01_{P15}$, $P01_{P16}$, $P01_{P17}$, $P01_{P18}$ e $P01_{P19}$ é definida por:

$$A_{P0Px} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{2H_{ps}}{5} \right) \cdot \alpha r \right] \cdot C_{ax} \quad (B16)$$

onde:

x pode ser o subíndice 13, 14, 15, 16, 17, 18 ou 19.

Para as relutâncias $P01_{P20}$, $P01_{P21}$, $P01_{P50}$ e $P01_{P51}$, o comprimento e a área são dados por:

$$C_{P0Px} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_8 \quad (B17)$$

$$A_{P0Px} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{1,5H_{ps}}{10} \right) \cdot T_{hd} \right] \cdot C_{ax} \quad (B18)$$

onde:

T_{hd} é a diferença entre o passo da ranhura e o ângulo ocupado pela ranhura no topo;

D_8 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 8;

x pode ser o subíndice 20, 21, 50 ou 51.

O comprimento das relutâncias $P01_{P22}$, $P01_{P23}$, $P01_{P48}$ e $P01_{P49}$ é dado por:

$$C_{P0Px} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_7 \quad (B19)$$

onde:

D_7 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 7;
 x pode ser o subíndice 22, 23, 48 ou 49.

A área das relutâncias $P01_{P22}$, $P01_{P23}$, $P01_{P48}$ e $P01_{P49}$ é:

$$A_{P0Px} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{1,5H_{ps}}{10} \right) \cdot T_{hrt} \right] \cdot C_{ax} \quad (B20)$$

onde:

x pode ser o subíndice 22, 23, 48 ou 49.

Para as relutâncias $P01_{P24}$, $P01_{P25}$, $P01_{P46}$ e $P01_{P47}$, o comprimento e a área são descritos por:

$$C_{P0Px} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_6 \quad (B21)$$

$$A_{P0Px} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{1,5H_{ps}}{10} \right) \cdot T_{hd} \right] \cdot C_{ax} \quad (B22)$$

onde:

D_6 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 6;
 x pode ser o subíndice 24, 25, 46 ou 47.

O comprimento das relutâncias $P01_{P26}$, $P01_{P27}$, $P01_{P44}$ e $P01_{P45}$ é representado por:

$$C_{P0Px} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_5 \quad (B23)$$

onde:

D_5 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 5;
 x pode ser o subíndice 26, 27, 44 ou 45.

A área das relutâncias $P01_{P26}$, $P01_{P27}$, $P01_{P44}$ e $P01_{P45}$ é:

$$A_{P0Px} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{1,5H_{ps}}{10} \right) \cdot T_{hrt} \right] \cdot C_{ax} \quad (B24)$$

onde:

x pode ser o subíndice 26, 27, 44 ou 45.

Para as relutâncias $P01_{P28}$, $P01_{P29}$, $P01_{P42}$ e $P01_{P43}$, o comprimento e a área são dados por:

$$C_{PoPx} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_4 \quad (B25)$$

$$A_{PoPx} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{1,5H_{ps}}{10} \right) \cdot T_{hd} \right] \cdot C_{ax} \quad (B26)$$

onde:

D_4 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 4;
 x pode ser o subíndice 28, 29, 42 ou 43.

O comprimento das relutâncias $Po1_{p30}$, $Po1_{p31}$, $Po1_{p40}$ e $Po1_{p41}$ é expresso por:

$$C_{PoPx} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_3 \quad (B27)$$

onde:

D_2 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 3;
 x pode ser o subíndice 30, 31, 40 ou 41.

A área das relutâncias $Po1_{p30}$, $Po1_{p31}$, $Po1_{p40}$ e $Po1_{p41}$ é:

$$A_{PoPx} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{1,5H_{ps}}{10} \right) \cdot T_{hrt} \right] \cdot C_{ax} \quad (B28)$$

onde:

x pode ser o subíndice 30, 31, 40 ou 41.

Para as relutâncias $Po1_{p32}$, $Po1_{p33}$, $Po1_{p38}$ e $Po1_{p39}$, o comprimento e a área são definidos por:

$$C_{PoPx} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_2 \quad (B29)$$

$$A_{PoPx} = \left[\left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{1,5H_{ps}}{10} \right) \cdot T_{hd} \right] \cdot C_{ax} \quad (B30)$$

onde:

D_2 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 2;
 x pode ser o subíndice 32, 33, 28 ou 39.

O comprimento das relutâncias $Po1_{p34}$, $Po1_{p35}$, $Po1_{p36}$ e $Po1_{p37}$ é dado por:

$$C_{PO_{Px}} = \frac{3H_{ps}}{10} - D_1 \quad (B31)$$

onde:

D_1 é a parcela de variação do ferro do polo devido ao ângulo na posição 1;
 x pode ser o subíndice 34, 35, 36 ou 37.

A área das relutâncias $PO1_{P34}$, $PO1_{P35}$, $PO1_{P36}$ e $PO1_{P37}$ é:

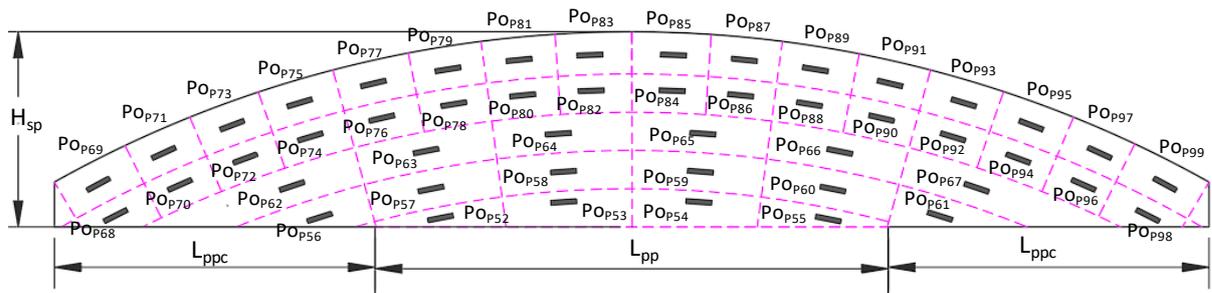
$$A_{PO_{Px}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B32)$$

onde:

x pode ser o subíndice 34, 35, 36 ou 37.

A seguir são apresentadas as relutâncias tangenciais presentes no polo.

Figura 58 – Dimensões das relutâncias tangenciais do polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para as relutâncias $PO1_{P52}$, $PO1_{P53}$, $PO1_{P54}$ e $PO1_{P55}$, o comprimento e a área são definidos por:

$$C_{PO_{Px}} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{9H_{ps}}{10} \right) \cdot \alpha r \quad (B33)$$

$$A_{PO_{Px}} = \frac{H_{ps}}{5} \cdot C_{ax} \quad (B34)$$

onde:

x pode ser o subíndice 52, 53, 54 ou 55.

O comprimento das relutâncias $PO1_{P56}$, $PO1_{P57}$, $PO1_{P58}$, $PO1_{P59}$, $PO1_{P60}$ e $PO1_{P61}$ é expresso por:

$$C_{P0Px} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{7H_{ps}}{10} \right) \cdot \alpha r \quad (B35)$$

onde:

x pode ser o subíndice 56, 57, 58, 59, 60 ou 61.

A área das relutâncias $P01_{P56}$, $P01_{P57}$, $P01_{P58}$, $P01_{P59}$, $P01_{P60}$ e $P01_{P61}$ é:

$$A_{P0Px} = \frac{H_{ps}}{5} \cdot C_{ax} \quad (B36)$$

onde:

x pode ser o subíndice 56, 57, 58, 59, 60 ou 61.

Para as relutâncias $P01_{P62}$, $P01_{P63}$, $P01_{P64}$, $P01_{P65}$, $P01_{P66}$ e $P01_{P67}$, o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{P0Px} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{5H_{ps}}{10} \right) \cdot \alpha r \quad (B37)$$

$$A_{P0Px} = \frac{H_{ps}}{5} \cdot C_{ax} \quad (B38)$$

onde:

x pode ser o subíndice 62, 63, 64, 65, 66 ou 67.

O comprimento das relutâncias $P01_{P68}$ e $P01_{P99}$ é dado por:

$$C_{P0Px} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{3H_{ps}}{10} \right) \cdot \alpha r \quad (B39)$$

onde:

x pode ser o subíndice 68 ou 99.

A área das relutâncias $P01_{P68}$ e $P01_{P99}$ é:

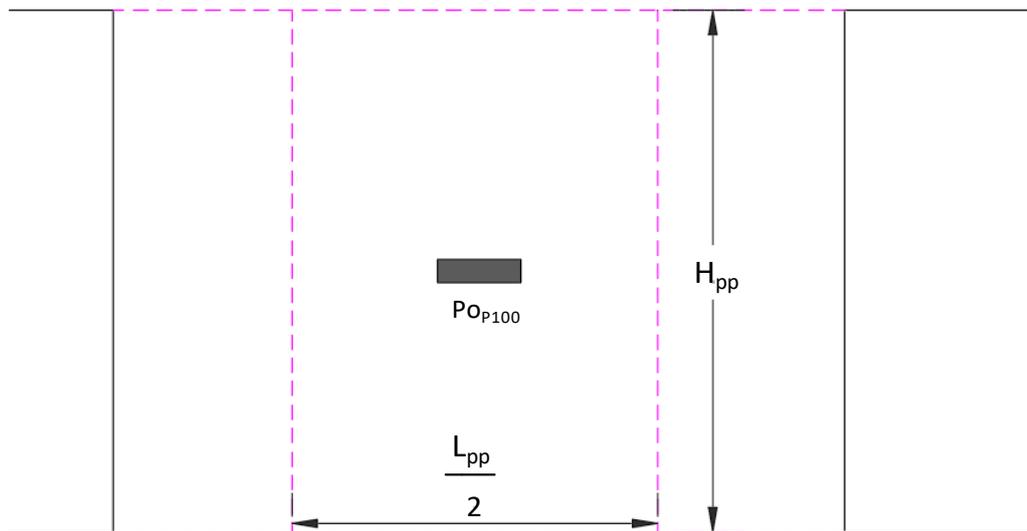
$$A_{P0Px} = \frac{H_{ps}}{10} \cdot C_{ax} \quad (B40)$$

onde:

x pode ser o subíndice 68 ou 99.

Para finalizar a parte do polo, tem-se em seu pescoço 3 relutâncias, sendo uma tangencial, vide Figura 59 e duas radiais, conforme Figura 60.

Figura 59 – Dimensões da relutância tangencial do pescoço do polo



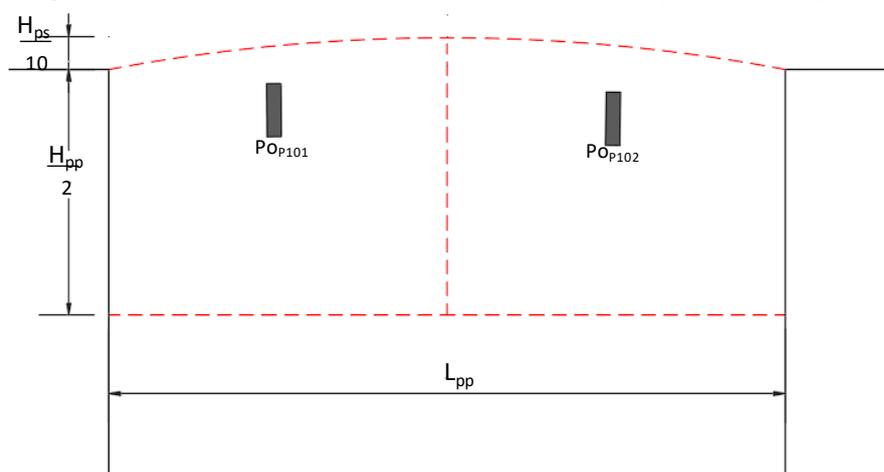
Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a relutância PO_{P100} , o comprimento e a área são dados por:

$$C_{PO_{P100}} = \frac{L_{pp}}{2} \quad (B41)$$

$$A_{PO_{P100}} = H_{pp} \cdot C_{ax} \quad (B42)$$

Figura 60 – Dimensões das relutâncias radiais do pescoço do polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

O comprimento das relutâncias PO_{P101} e PO_{P102} é dado por:

$$C_{P_{0P_x}} = \frac{H_{pp}}{2} + \frac{H_{ps}}{10} \quad (\text{B43})$$

onde:

x pode ser o subíndice 101 ou 102.

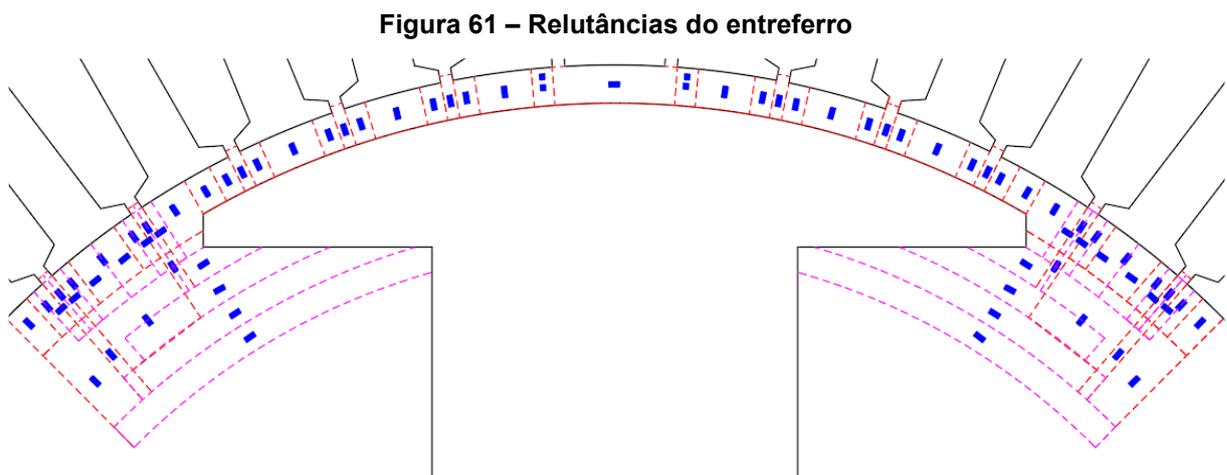
A área das relutâncias $P_{01_{P_{101}}}$ e $P_{01_{P_{102}}}$ é:

$$A_{P_{0P_x}} = \frac{L_{pp}}{2} \cdot C_{ax} \quad (\text{B44})$$

onde:

x pode ser o subíndice 101 ou 102.

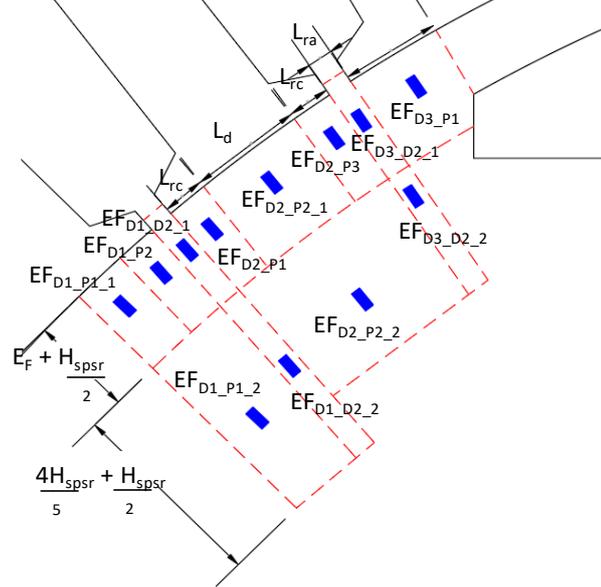
O próximo setor a ser descrito será o entreferro, que pode ser vista na Figura 61. Ele foi dividido em duas partes, sendo elas as relutâncias de entreferro sob o polo e as fora do polo.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Conforme Figura 62, primeiramente são descritas as relutâncias do entreferro que ficam fora do polo. Como a máquina é simétrica as relutâncias do presentes nos lados direito e esquerdo do polo são iguais, assim são descritas somente as relutâncias contidas no lado esquerdo.

Figura 62 – Dimensões das relutâncias do entrefero fora do polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a relutância $EF_{D1_P1,1}$, o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{P1_P1,1}} = E_F + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B45)$$

$$A_{EF_{P1_P1,1}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (B46)$$

O comprimento da relutância $EF_{D1_P1,2}$ é representado por:

$$C_{EF_{P1_P1,2}} = \frac{4H_{spsr}}{5} + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B47)$$

A área da relutância $EF_{D1_P1,2}$ é:

$$A_{EF_{P1_P1,2}} = \frac{L_{dp}}{2} \cdot C_{ax} \quad (B48)$$

Para a relutância EF_{D1_P2} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D1_P2}} = E_F + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B49)$$

$$A_{EF_{D1_P2}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B50)$$

O comprimento da relutância $EF_{D1_D2,1}$ é descrito por:

$$C_{EF_{D1_D2,1}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B51)$$

A área da relutância $EF_{D1_D2_1}$ é:

$$A_{EF_{D1_D2_1}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (B52)$$

Para a relutância $EF_{D1_D2_2}$, o comprimento e a área são calculados:

$$C_{EF_{D1_D2_2}} = \frac{3H_{spsr}}{5} + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B53)$$

$$A_{EF_{D1_D2_2}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (B54)$$

O comprimento da relutância EF_{D2_P1} é definido por:

$$C_{EF_{D2_D1}} = E_F + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B55)$$

A área da relutância EF_{D2_P1} é:

$$C_{EF_{D2_D1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B56)$$

Para a relutância $EF_{D2_P2_1}$, o comprimento e a área são dados por:

$$C_{EF_{D2_P2_1}} = E_F + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B57)$$

$$A_{EF_{D2_P2_1}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (B58)$$

O comprimento da relutância $EF_{D2_P2_2}$ é descrito por:

$$C_{EF_{D2_P2_2}} = \frac{2H_{spsr}}{5} + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B59)$$

A área da relutância $EF_{D2_P2_2}$ é:

$$A_{EF_{D2_P2_2}} = L_{dp} \cdot C_{ax} \quad (B60)$$

Para a relutância EF_{D2_P3} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D2_P3}} = E_F + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B61)$$

$$A_{EF_{D2_P3}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B62)$$

O comprimento da relutância $EF_{D2_D3_1}$ é descrito por:

$$C_{EF_{D2_P3_1}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B63)$$

A área da relutância $EF_{D2_D3_1}$ é:

$$A_{EF_{D2_P3_1}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (B64)$$

Para a relutância $EF_{D2_D3_2}$, o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D2_P3_2}} = \frac{H_{spsr}}{5} + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B65)$$

$$A_{EF_{D2_P3_2}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (B66)$$

O comprimento da relutância EF_{D3_P1} é determinado por:

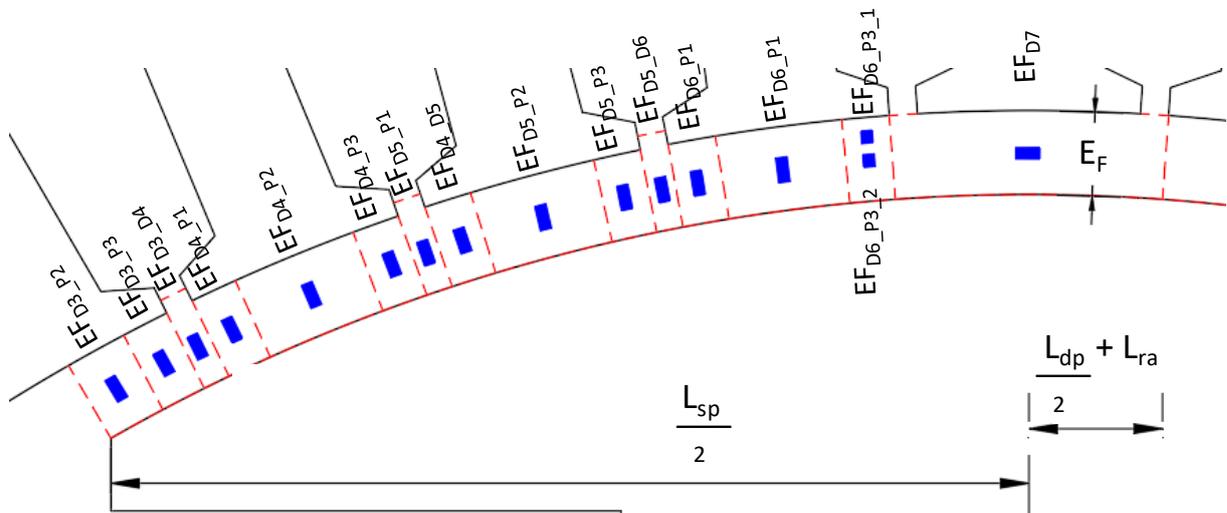
$$C_{EF_{D3_P1}} = E_F + \frac{H_{spsr}}{2} \quad (B67)$$

A área da relutância EF_{D3_P1} é:

$$A_{EF_{D3_P1}} = \frac{L_{dp}}{2} \cdot C_{ax} \quad (B68)$$

A seguir, vide Figura 63, são apresentadas as relutâncias que ficam posicionadas sobre o polo. São listadas apenas metade das relutâncias, devido à simetria da máquina.

Figura 63 – Dimensões das relutâncias sobre o polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a relutância EF_{D3_P2} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D3_P2}} = E_F + D_8 \quad (B69)$$

$$A_{EF_{D3_P2}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (B70)$$

O comprimento da relutância EF_{D3_P3} é definido por:

$$C_{EF_{D3_P3}} = E_F + D_7 \quad (B71)$$

A área da relutância EF_{D3_P3} é:

$$A_{EF_{D3_P3}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B72)$$

Para a relutância EF_{D3_D4} , o comprimento e a área por:

$$C_{EF_{D3_D4}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + D_7 \quad (B73)$$

$$A_{EF_{D3_D4}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (B74)$$

O comprimento da relutância EF_{D4_P1} é expresso por:

$$C_{EF_{D4_P1}} = E_F + D_7 \quad (B75)$$

A área da relutância EF_{D4_P1} é:

$$A_{EF_{D4_P1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B76)$$

Para a relutância EF_{D4_P2} , o comprimento e a área são dados por:

$$C_{EF_{D4_P2}} = E_F + D_6 \quad (B77)$$

$$A_{EF_{D4_P2}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (B78)$$

O comprimento da relutância EF_{D4_P3} é dado por:

$$C_{EF_{D4_P3}} = E_F + D_5 \quad (B79)$$

A área da relutância EF_{D4_P3} é:

$$A_{EF_{D4_P3}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B80)$$

Para a relutância EF_{D4_D5} , o comprimento e a área são:

$$C_{EF_{D4_D5}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + D_5 \quad (B81)$$

$$A_{EF_{D4_D5}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (B82)$$

O comprimento da relutância EF_{D5_P1} é apresentado por:

$$C_{EF_{D5_P1}} = E_F + D_5 \quad (B83)$$

A área da relutância EF_{D5_P1} é:

$$A_{EF_{D5_P1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B84)$$

Para a relutância EF_{D5_P2} , o comprimento e área são dados por:

$$C_{EF_{D5_P2}} = E_F + D_4 \quad (B85)$$

$$A_{EF_{D5_P2}} = \frac{L_d}{2} \cdot C_{ax} \quad (B86)$$

O comprimento da relutância EF_{D5_P3} é expresso por:

$$C_{EF_{D5_P3}} = E_F + D_3 \quad (B87)$$

A área da relutância EF_{D5_P3} é:

$$A_{EF_{D5_P3}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B88)$$

Para a relutância EF_{D5_D6} , o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{EF_{D5_D6}} = E_F + \frac{H_{rp}}{2} + D_3 \quad (B89)$$

$$A_{EF_{D5_D6}} = L_{ra} \cdot C_{ax} \quad (B90)$$

O comprimento da relutância EF_{D6_P1} é dado por:

$$C_{EF_{D6_P1}} = E_F + D_3 \quad (B91)$$

A área da relutância EF_{D6_P1} é:

$$A_{EF_{D6_P1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (B92)$$

Para a relutância EF_{D6_P2} , o comprimento e a área são dados por:

$$C_{EF_{D6,P2}} = E_F + D_2 \quad (\text{B93})$$

$$A_{EF_{D6,P2}} = L_d \cdot C_{ax} \quad (\text{B94})$$

O comprimento da relutância $EF_{D6,P3,1}$ é discriminado por:

$$C_{EF_{D6,P3,1}} = \frac{E_F}{2} \quad (\text{B95})$$

A área da relutância $EF_{D6,P3,1}$ é:

$$A_{EF_{D6,P3,1}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (\text{B96})$$

Para a relutância $EF_{D6,P3,2}$, o comprimento e a área são dados por:

$$C_{EF_{D6,P3,2}} = \frac{E_F}{2} + D_1 \quad (\text{B97})$$

$$A_{EF_{D6,P3,2}} = L_{rc} \cdot C_{ax} \quad (\text{B98})$$

O comprimento da relutância EF_{D7} é dado por:

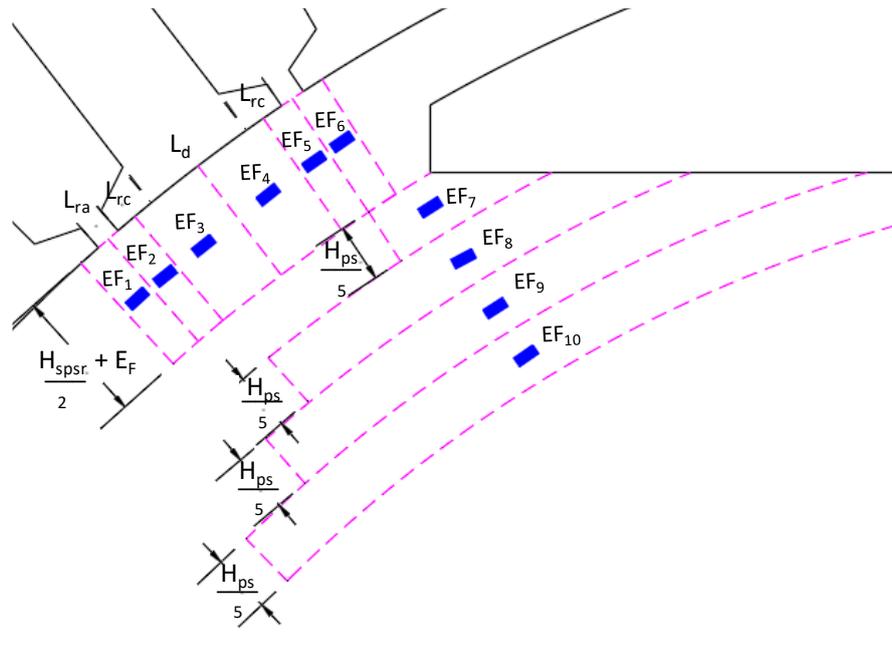
$$C_{EF_{D7}} = 2 \cdot L_{ra} + L_{dp} + 2 \cdot L_{rc} \quad (\text{B99})$$

A área da relutância EF_{D7} é:

$$A_{EF_{D7}} = E_F \cdot C_{ax} \quad (\text{B100})$$

Além das relutâncias radiais que ficam fora do polo, tem-se também as tangenciais. Elas podem ser vistas na Figura 64.

Figura 64 – Dimensões das relutâncias sobre o polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para as relutâncias EF_1 , EF_2 , EF_5 e EF_6 , o comprimento e a área são dados por:

$$C_{EF_x} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{spsr}}{2} \right) \cdot \frac{T_{hrt}}{2} \quad (B101)$$

$$A_{EF_x} = (E_F + H_{spsr}) \cdot C_{ax} \quad (B102)$$

onde:

T_{hrt} é o ângulo ocupado pela ranhura no topo;

x pode ser o subíndice 1, 2, 5 ou 6.

O comprimento das relutâncias EF_3 e EF_4 é expresso por:

$$C_{EF_x} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{H_{spsr}}{2} \right) \cdot \frac{(\alpha r - T_{hrt})}{2} \quad (B103)$$

onde:

x pode ser o subíndice 3 ou 4.

A área das relutâncias EF_3 e EF_4 é:

$$A_{EF_x} = (E_F + H_{spsr}) \cdot C_{ax} \quad (B104)$$

onde:

x pode ser o subíndice 3 ou 4.

Para a relutância EF_7 , o comprimento e a área são dados por:

$$C_{EF_7} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{3H_{spsr}}{10} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} \quad (\text{B105})$$

$$A_{EF_7} = \frac{H_{ps}}{5} \cdot C_{ax} \quad (\text{B106})$$

O comprimento da relutância EF_8 é dado por:

$$C_{EF_8} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{5H_{spsr}}{10} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} \quad (\text{B107})$$

A área da relutância EF_8 é dada por:

$$A_{EF_8} = \frac{H_{ps}}{5} \cdot C_{ax} \quad (\text{B108})$$

Para a relutância EF_9 , o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{EF_9} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{7H_{spsr}}{10} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} \quad (\text{B109})$$

$$A_{EF_9} = \frac{H_{ps}}{5} \cdot C_{ax} \quad (\text{B110})$$

O comprimento da relutância EF_{10} é definido por:

$$C_{EF_{10}} = \left(\frac{D_{re}}{2} - \frac{9H_{spsr}}{10} \right) \cdot \frac{\alpha r}{2} \quad (\text{B111})$$

A área da relutância EF_{10} é descrita por:

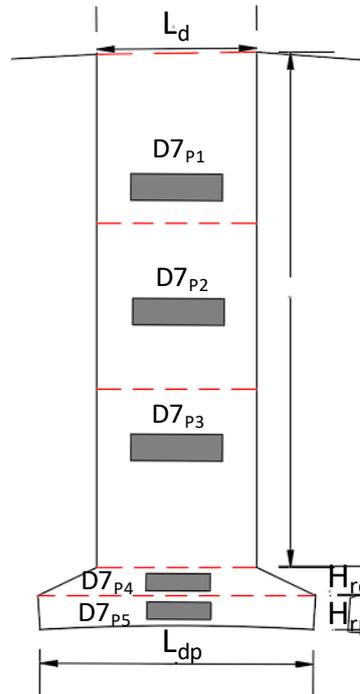
$$A_{EF_{10}} = \frac{H_{ps}}{5} \cdot C_{ax} \quad (\text{B112})$$

Por último é apresentado o setor (v) dos dentes. Os dentes 1 e 13 possuem as mesmas definições dos dentes 1 e 13 contidos na rede de eixo direto, eles foram explanados na secção anterior. Pode-se verificar a Figura 50 e equações (A107) a (A116).

Os dentes 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11 e 12 também possuem suas definições de comprimento e área idênticas àquelas descritas na secção anterior, conforme Figura 51 e equações (A117) a (A126).

O dente 7, representado pela Figura 65, contém 4 elementos e eles são definidos pelas seguintes áreas e comprimentos.

Figura 65 – Dimensões das relutâncias tangenciais fora do polo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para as relutâncias $D7_{P1}$, $D7_{P2}$ e $D7_{P3}$, o comprimento e a área são determinados por:

$$C_{D7_{P_x}} = L_d \quad (\text{B113})$$

$$A_{D7_{P_x}} = \frac{H_r}{3} \cdot C_{ax} \quad (\text{B114})$$

onde:

x pode ser o subíndice 1, 2 ou 3.

O comprimento da relutância $D7_{P4}$ é determinado por:

$$C_{D7_{P4}} = L_d + (2 \cdot L_{rc}) \quad (\text{B115})$$

A área da relutância $D7_{P4}$ é:

$$A_{D7_{P4}} = H_r \cdot C_{ax} \quad (\text{B116})$$

Para a relutância $D7_{P5}$, o comprimento e a área são calculados por:

$$C_{D7P5} = L_d + (2 \cdot L_{rc}) \quad (\text{B117})$$

$$A_{D7P5} = H_{rp} \cdot C_{ax} \quad (\text{B118})$$