

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**GIOVANE MACEDO MUNO
GUSTAVO MOCELIN
THOMAS GOMES DE SÁ CARVALHO**

**PROJETO DE GERADOR SÍNCRONO PARA UM PEQUENO APROVEITAMENTO
HIDRELÉTRICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

GIOVANE MACEDO MUNO
GUSTAVO MOCELIN
THOMAS GOMES DE SÁ CARVALHO

**PROJETO DE GERADOR SÍNCRONO PARA UM PEQUENO APROVEITAMENTO
HIDRELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Machado Bazzo

CURITIBA

2019

Giovane Macedo Muno
Gustavo Mocelin
Thomas Gomes de Sá Carvalho

PROJETO DE GERADOR SÍNCRONO PARA UM PEQUENO APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 26 de junho de 2019.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Thiago de Paula Machado Bazzo, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Thiago de Paula Machado Bazzo, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alvaro Augusto Waldrigues de Almeida, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao nosso orientador, Thiago de Paula Machado Bazzo, pela paciência, pela dedicação e pelo exemplo profissional.

Agradecemos aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UTFPR pelos ensinamentos ao longo do curso.

Agradecemos aos nossos pais, pelo apoio, carinho, inspiração, incentivos, compreensão, paciência, amor e pela educação.

Agradecemos aos nossos bons amigos e colegas de turma que fizeram parte dessa jornada.

RESUMO

MUNO, Giovane Macedo; MOCELIN, Gustavo; CARVALHO, Thomas Gomes de Sá. **Projeto de Gerador Síncrono para um Pequeno Aproveitamento Hidrelétrico**. 127 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Este trabalho apresenta a metodologia e prática para o projeto de geradores síncronos. Para isso, inicialmente foram apresentados conceitos de mini, micro e pequenos aproveitamentos hidrelétricos, legislação aplicável, tipos de turbinas hidráulicas, escolha técnica de turbinas, maneiras de estimar o potencial hidrelétrico, além do próprio gerador síncrono, demonstrando suas características construtivas, seu princípio de funcionamento e suas formas de excitação. A partir desses conceitos teóricos, foi apresentada uma metodologia de projeto, mostrando como calcular as principais dimensões do rotor e estator da máquina, além dos seus parâmetros elétricos. Após, foram apresentadas as especificações de projeto, fatores e parâmetros impostos e, com isso, foi possível realizar dois projetos de geradores síncronos atendendo todas as especificações. Para a validação desses projetos, foi utilizado o método dos elementos finitos, a partir de simulações utilizando o Software EFCAD. Por fim, foi realizada uma comparação entre os dois projetos executados, buscando demonstrar suas principais diferenças e as soluções dos problemas inicialmente encontrados.

Palavras-chave: Gerador síncrono, Potencial hidrelétrico, Elementos finitos, Projeto de máquinas elétricas, Geração hidrelétrica, Microgeração.

ABSTRACT

MUNO, Giovane Macedo; MOCELIN, Gustavo; CARVALHO, Thomas Gomes de Sá. **Synchronous Generator Project for a Small Hydropower Plant**. 127 p. Graduation Conclusion Work – Electrical Engineering, Parana's Federal Technological University. Curitiba, 2019.

This work presents the methodology and practice for the project of synchronous generators. For this, concepts of mini, micro and small hydropower plants, applicable legislation, types of turbines, technical choice of turbines and ways of estimating hydroelectric potential are presented. Besides that, the synchronous generator is presented, demonstrating its constructive characteristics, operating principle and forms of excitation. After this, the required equations for the design of a synchronous generator are presented to show how to calculate the main dimensions of the rotor and stator and its electrical parameters. Afterwards, the project specifications, factors and imposed parameters were presented and, with this, it was possible to project two synchronous generator meeting all the specifications. For the validation of these projects, the finite element method was applied using EFCAD Software simulations. Finally, a comparison was made between the two projects, trying to demonstrate their main differences and the solutions of the problems initially encountered.

Keywords: Synchronous generator, Hydroelectric potential, Finite elements, Project of electric machines, Hydroelectric generation, Microgeneration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	22
Figura 2 – Turbina Pelton.....	32
Figura 3 – Turbina Francis.....	33
Figura 4 – Turbina Kaplan.....	34
Figura 5 – Turbina Bulbo Multiplicador.....	35
Figura 6 – Escolha do tipo de turbina.....	36
Figura 7 – Visão do estator de um gerador síncrono.....	39
Figura 8 – Carcaça do gerador.....	40
Figura 9 - Enrolamento de armadura.....	41
Figura 10 – Rotor de polos salientes.....	42
Figura 11 – Rotor de polos lisos.....	42
Figura 12 - Enrolamento amortecedor.....	43
Figura 13 – Mancal de Rolamento.....	44
Figura 14 – Mancal de bucha com refrigeração natural.....	45
Figura 15 – Mancal de bucha com circulação forçada de óleo.....	45
Figura 16 – Refrigeração do gerador com ventilação aberta.....	46
Figura 17 – Refrigeração do gerador com trocador de calor ar-ar.....	46
Figura 18 – Refrigeração do gerador com trocador de calor ar-água.....	47
Figura 19 – Geração de energia em sistemas hídricos.....	48
Figura 20 – Fluxo magnético de um gerador de 4 polos.....	49
Figura 21 – Circuito equivalente gerador síncrono por fase.....	52
Figura 22 – Circuito equivalente trifásico gerador síncrono.....	53
Figura 23 - Diagrama fasorial de um gerador síncrono com carga indutiva.....	54
Figura 24 - Diagrama fasorial após a decomposição nos eixos direto e em quadratura.....	54
Figura 25 – Característica de circuito aberto.....	56
Figura 26 – Excitação <i>brushless</i> (sem escovas).....	58
Figura 27 – Bobinas auxiliares.....	59
Figura 28 – PMG – Excitatriz auxiliar.....	60
Figura 29 - Escorvamento na partida de um gerador síncrono.....	61
Figura 30 - Etapas para a realização do projeto.....	62
Figura 31 – Passo polar efetivo.....	64
Figura 32 - Parâmetros referentes às equações 24 e 25.....	64

Figura 33 – Largura da sapata polar e do pescoço do polo	65
Figura 34 - Paramêtos referentes às equações 27 e 28	66
Figura 35 – Largura complementar do pescoço do polo	66
Figura 36 - Altura do pescoço do polo.....	67
Figura 37 - Largura da relutância eficaz no entreferro	68
Figura 38 - Fluxo produzido.....	69
Figura 39 – Diâmetro interno do estator.....	70
Figura 40 - Paramêtos referentes à equação 39.....	70
Figura 41 – Passo da ranhura	71
Figura 42 – Ângulo ocupado pela ranhura no topo	72
Figura 43 – Largura do topo da ranhura.....	72
Figura 44 – Largura de abertura e largura do colarinho da ranhura.....	73
Figura 45 – Ângulo do colarinho.....	73
Figura 46 – Altura da coroa do estator	74
Figura 47 – Altura da ranhura.....	74
Figura 48 - Paramêtos referentes à equação 47	75
Figura 49 – Diâmetro externo do estator.....	75
Figura 50 - Medições na queda d'água	81
Figura 51 - Turbina Pelton de pequeno porte.....	82
Figura 52 – Um polo e uma ranhura do gerador do projeto 1	88
Figura 53 – Gerador completo do projeto 1	88
Figura 54 - Valores da densidade de fluxo a vazio no projeto 1	89
Figura 55 - Linhas de fluxo em um polo do gerador síncrono a vazio no projeto 1 ...	90
Figura 56 – Comportamento das tensões de linha a vazio no projeto 1	91
Figura 57 - Comportamento das tensões de fase a vazio no projeto 1	92
Figura 58 – Fluxo a vazio no projeto 1	92
Figura 59 – Densidade de fluxo no entreferro no projeto 1	93
Figura 60 – Gráfico da indutância própria do projeto 1	94
Figura 61 – Valores da densidade de fluxo do gerador síncrono em carga no projeto 1	96
Figura 62 - Comportamento das tensões de linha em carga no projeto 1	98
Figura 63 - Comportamento das tensões de fase em carga no projeto 1	98
Figura 64 - Comportamento das correntes de fase no projeto 1	99
Figura 65 – Um polo e uma ranhura do gerador do projeto 2	104

Figura 66 - Gerador completo do projeto 2	104
Figura 67 - Linhas de fluxo em um polo do gerador síncrono a vazio no projeto 2 .	105
Figura 68 - Valores da densidade de fluxo a vazio no projeto 2.....	106
Figura 69 - Comportamento das tensões de linha a vazio no projeto 2	108
Figura 70 - Comportamento das tensões de fase a vazio no projeto 2	108
Figura 71 - Fluxo a vazio no projeto 2	109
Figura 72 - Densidade de fluxo no entreferro no projeto 2	109
Figura 73 – Gráfico da indutância própria do projeto 2	110
Figura 74 - Valores da densidade de fluxo do gerador síncrono em carga no projeto 2	112
Figura 75 - Linhas de fluxo em um polo do gerador síncrono em carga no projeto 2	112
Figura 76 - Comportamento das tensões de linha em carga no projeto 2	115
Figura 77 - Comportamento das tensões de fase em carga no projeto 2.....	115
Figura 78 - Comportamento das correntes de fase no projeto 2	116
Figura 79 - Polos dos geradores dos projetos 1 e 2.....	117
Figura 80 - Ranhuras dos geradores dos projetos 1 e 2	118
Figura 81 - Geradores síncronos dos projetos 1 e 2	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente de rugosidade.....	37
Tabela 2 – Grau de proteção.....	41
Tabela 3 - Especificações do projeto	83
Tabela 4 - Fatores utilizados no projeto 1	84
Tabela 5 - Parâmetros impostos no projeto 1.....	85
Tabela 6 - Resultados do projeto do rotor no projeto 1	86
Tabela 7 - Resultados do projeto do estator no projeto 1.....	87
Tabela 8 - Componentes harmônicas nas tensões de fase a vazio no projeto 1	90
Tabela 9 - Componentes harmônicas nas tensões de linha a vazio no projeto 1.....	91
Tabela 10 - Resultados do projeto 1 em carga.....	95
Tabela 11 - Componentes harmônicas nas tensões de fase em carga no projeto 1	96
Tabela 12 - Componentes harmônicas nas tensões de linha em carga no projeto 1	97
Tabela 13 - Fatores utilizados no projeto 2	100
Tabela 14 - Parâmetros impostos no projeto 2.....	101
Tabela 15 - Resultados do projeto do rotor no projeto 2	102
Tabela 16 - Resultados do projeto do estator no projeto 2.....	103
Tabela 17 - Componentes harmônicas nas tensões de fase a vazio no projeto 2 ..	107
Tabela 18 - Componentes harmônicas nas tensões de linha a vazio no projeto 2..	107
Tabela 19 - Resultados do projeto 2 em carga.....	111
Tabela 20 - Componentes harmônicas nas tensões de fase em carga no projeto 2	113
Tabela 21 - Componentes harmônicas nas tensões de linha em carga no projeto 2	114

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balanço Energético Nacional
CC	Corrente contínua
DHT	Distorção harmônica total
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
GD	Geração Distribuída
IDER	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
IP	Grau de proteção
MCHs	Micro Centrais Hidrelétricas
MGHs	Mini Centrais Hidrelétricas
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PMG	<i>Permanent Magnet Generator</i> - gerador de ímãs permanentes

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
Q	Vazão da água	m ³ /s
A	Área da seção molhada	m ²
V	Velocidade de escoamento	m/s
p_m	Perímetro molhado	m
S	Declividade do canal	m/m
n_{rug}	Coefficiente de rugosidade	-
P	Potência nominal do gerador	W
ρ	Massa específica da água	kg/m ³
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
h	Altura da queda d'água	m
N_g	Rendimento do gerador	-
N_h	Rendimento da tubulação	-
N_t	Rendimento da turbina	-
H	Intensidade do campo magnético	A.esp/m

N_i	Corrente líquida que passa dentro do caminho de integração	A.esp
L_n	Comprimento do caminho médio no núcleo	m
e_{ind}	Tensão induzida na bobina	V
N_{espfb}	Número de espiras de fio da bobina	-
Φ_{bob}	Fluxo que passa através da bobina	Wb
f	Frequência elétrica	Hz
p	Número de polos do gerador	-
n	Velocidade mecânica do campo magnético	rpm
ΔV_{RA}	Tensão de reação de armadura	V
X	Constante de proporcionalidade	-
I_a	Corrente de armadura	A
ΔV_{Xa}	Perdas causadas pela autoindutância	V
X_A	Reatância de armadura	Ω
ΔV_{Ra}	Perdas causadas pela resistência do estator	V
R_A	Resistência de armadura	Ω
V_φ	Tensão de saída nos terminais do gerador síncrono	V
E_A	Tensão interna gerada	V
X_S	Reatância síncrona da máquina	Ω
I_f	Corrente de campo	A
R_F	Resistência de campo	Ω
L_F	Indutância de campo	H
R_{aj}	Resistor ajustável	Ω
I_q	Corrente de armadura no eixo em quadratura	A
I_d	Corrente de armadura no eixo direto	A
V_q	Tensão terminal fase-neutro no eixo em quadratura	V
V_d	Tensão terminal fase-neutro no eixo direto	V
Φ	Ângulo entre a tensão e a corrente	$^\circ$
δ	Ângulo de carga	$^\circ$
K	Constante de enrolamento da máquina	-
Φ_{res}	Fluxo residual	Wb
ω_m	Velocidade de rotação	rpm

α_p	Passo polar	0
α_{pef}	Passo polar efetivo	0
K_{α_p}	Fator de encurtamento do passo polar	-
h_{spa}	Altura do arco da sapata polar	mm
D_{re}	Diâmetro externo do rotor	mm
L_{sp}	Largura da sapata polar	mm
L_{pp}	Largura do pescoço do polo	mm
K_{pp}	Fator de ajuste do pescoço do polo em relação à sapata polar	-
h_{spsr}	Altura da seção reta da sapata polar	mm
K_{hspsr}	Fator de ajuste da altura da seção reta da sapata polar em relação ao diâmetro e ao número de polos	-
h_{sp}	Altura da sapata polar	mm
L_{ppc}	Largura complementar do pescoço do polo	mm
h_{pp}	Altura do pescoço do polo	mm
A_{cc}	Área do condutor de campo	mm ²
I_{cmax}	Máxima corrente permitida no campo	A
J_c	Densidade de corrente no campo	A/mm ²
N_{ce}	Número de espiras do enrolamento de campo	-
K_{pe}	Fator de enchimento do condutor de campo	-
fmm_c	Força magnetomotriz por polo do campo	A.esp
I_{cvz}	Corrente de campo a vazio	A
LR_{ef}	Largura da relutância eficaz no entreferro	mm
K_{ef}	Fator da relutância efetiva do entreferro	-
R_{ef}	Relutância do entreferro	A.esp/Wb
L_{ef}	Comprimento do entreferro	mm
$\emptyset_{laço}$	Fluxo em um laço	Wb
B_{pp}	Densidade do fluxo magnético no pescoço do polo	T
\emptyset_{pp}	Fluxo total no pescoço do polo	Wb
C_{ax}	Comprimento axial	mm
D_{ei}	Diâmetro interno do estator	mm

D_{tr}	Diâmetro do topo da ranhura	mm
h_{pr}	Altura do pescoço da ranhura	mm
h_{cr}	Altura do colarinho da ranhura	mm
α_r	Passo da ranhura	°
N_r	Número de ranhuras	-
θ_{rt}	Ângulo ocupado pela ranhura no topo	°
K_{dr}	Fator entre a largura do dente e a ranhura no topo	-
L_{rt}	Largura do topo da ranhura	mm
L_{rc}	Largura do colarinho da ranhura	mm
L_{ra}	Largura da abertura da ranhura	mm
θ_{rc}	Ângulo do colarinho	°
h_{ce}	Altura da coroa do estator	mm
K_{pc}	Fator entre largura do pescoço do polo e largura da coroa do estator	-
h_r	Altura da ranhura	mm
K_{cr}	Fator entre a altura da coroa do estator e altura da ranhura	-
θ_{ir}	Ângulo de inclinação da ranhura	°
L_{rf}	Largura da ranhura no fundo	mm
D_{ee}	Diâmetro externo do estator	mm
α_{ab}	Passo da bobina de armadura	°
EA_{pb}	Encurtamento do passo da bobina de armadura	-
K_{aeb}	Fator de encurtamento de passo da bobina da armadura	-
N_{cs}	Número de caminhos em série	-
N_{cp}	Número de caminhos em paralelo	-
N_{rc}	Número de camadas da ranhura	-
N_{bpf}	Número de bobinas por polo e por fase da armadura	-
KA_{db}	Fator de distribuição da bobina de armadura	-
N_{at}	Número total de espiras da armadura por fase	-
V_T	Tensão terminal	V
N_{ab}	Número de espiras por bobina	-
S_r	Área da ranhura	mm ²

S_{ac}	Área dos condutores do enrolamento da armadura	mm ²
K_{re}	Fator de enchimento da ranhura	
J_a	Densidade de corrente da armadura	A/mm ²
P_e	Potência elétrica de saída do gerador síncrono	W
FP	Fator de potência	-
L_d	Indutância de eixo direto	H
$L_{máx}$	Indutância máxima simulada	H
L_q	Indutância de eixo de quadratura	H
L_{min}	Indutância mínima simulada	H
X_d	Reatância do eixo direto	Ω
X_q	Reatância do eixo de quadratura	Ω
$D\alpha_{Acb}$	Comprimento do arco formado pelo passo da bobina de armadura	mm
A_{Acb}	Comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura	mm
C_{A1e}	Comprimento médio de uma espira da armadura	mm
C_{C1e}	Comprimento médio de uma espira de campo	mm
R_{Akm_fio}	Resistência dos condutores do enrolamento da armadura por quilômetro	Ω
R_C	Resistência do enrolamento de campo	Ω/km
R_{Ckm_fio}	resistência do condutor de campo por quilômetro	Ω/km
Φ_{pp-n}	Fluxo no pescoço do polo com corrente de campo nominal	Wb
I_{cn}	Corrente de campo nominal	A
E_{A_n}	Rensão interna induzida em carga	mm
K_{\emptyset}	Percentual do fluxo do campo enlaçado pelos enrolamentos de armadura	-
d	Diâmetro do tubo	m
d_{bg}	Distância entre a barragem e o gerador	m
C_h	Componente horizontal	-
M	Número inteiro com o qual se produzem os harmônicos de ranhura de menor frequência	-
$v_{ranhura}$	Ordem da componente harmônica	-

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 – Equação da continuidade	37
Equação 02 – Equação de Manning	37
Equação 03 – Cálculo da potência nominal do gerador	37
Equação 04 – Intensidade do campo magnético.....	48
Equação 05 – Tensão induzida na bobina	50
Equação 06 – Frequência elétrica.....	50
Equação 07 – Tensão de reação de armadura	51
Equação 08 – Perdas causadas pela autoindutância	51
Equação 09 – Perdas causadas pela resistência do estator.....	51
Equação 10 – Tensão de saída nos terminais do gerador síncrono	51
Equação 11 – Reatância síncrona da máquina	52
Equação 12 – Tensão de saída nos terminais do gerador síncrono	52
Equação 13 – Corrente de armadura no eixo direto I_d	55
Equação 14 – Corrente de armadura no eixo em quadratura I_q	55
Equação 15 – Tensão terminal fase-neutro no eixo direto V_d	55
Equação 16 – Tensão terminal fase-neutro no eixo em quadratura V_q	55
Equação 17 – Ângulo entre a tensão e a corrente ϕ	55
Equação 18 – Ângulo de carga δ	55
Equação 19 – Tensão terminal fase-neutro total V_ϕ	55
Equação 20 – Tensão Interna induzida E_A	60
Equação 21 – Cálculo do número de polos p	63
Equação 22 – Passo polar do gerador síncrono α_p	64
Equação 23 – Passo polar efetivo do gerador síncrono α_{pef}	64
Equação 24 – Altura do arco da sapata polar h_{spa}	65
Equação 25 – Largura da sapata polar L_{sp}	65
Equação 26 – Largura do pescoço do polo L_{pp}	65
Equação 27 – Altura da seção reta da sapata polar h_{spsr}	66
Equação 28 – Altura da sapata polar h_{sp}	66
Equação 29 – Largura complementar do pescoço do polo L_{ppc}	67
Equação 30 – Altura do pescoço do polo h_{pp}	67
Equação 31 – Área do condutor de campo A_{cc}	67
Equação 32 – Número de espiras do enrolamento de campo N_{ce}	68

Equação 33 – Força magnetomotriz por polo fmm_c	68
Equação 34 – Largura da relutância eficaz no entreferro LR_{ef}	68
Equação 35 – Relutância do entreferro R_{ef}	68
Equação 36 – Fluxo magnético de um laço $\phi_{laço}$	69
Equação 37 – Valor da densidade de fluxo magnético B_{pp}	69
Equação 38 – Diâmetro interno do estator D_{ei}	70
Equação 39 – Valor do diâmetro do topo da ranhura D_{tr}	71
Equação 40 – Passo da ranhura α_r	71
Equação 41 – Valor do ângulo ocupado pela ranhura no topo θ_{rt}	71
Equação 42 – Largura do topo da ranhura L_{rt}	72
Equação 43 – Largura da abertura da ranhura L_{rc}	73
Equação 44 – Ângulo do colarinho θ_{rc}	73
Equação 45 – Altura da coroa do estator h_{ce}	74
Equação 46 – Altura da ranhura h_r	74
Equação 47 – Largura da ranhura no fundo L_{rf}	75
Equação 48 – Diâmetro externo do estator D_{ee}	75
Equação 49 – Passo da bobina de armadura α_{ab}	76
Equação 50 – Fator de encurtamento de passo da bobina da armadura K_{aeb}	76
Equação 51 – Número de caminhos em série N_{cs}	76
Equação 52 – Número de bobinas por polo e por fase da armadura N_{bpf}	76
Equação 53 – Fator de distribuição da bobina de armadura KA_{db}	76
Equação 54 – Número total de espiras da armadura por fase N_{at}	77
Equação 55 – Número total de espiras por bobina N_{ab}	77
Equação 56 – Área da ranhura S_r	77
Equação 57 – Área dos condutores do enrolamento da armadura S_{ac}	77
Equação 58 – Corrente da armadura I_a	77
Equação 59 – Potência elétrica de saída do gerador síncrono P_e	77
Equação 60 – Indutâncias de eixo direto L_d	78
Equação 61 – Indutâncias de quadratura L_q	78
Equação 62 – Reatância do eixo direto X_d	78
Equação 63 – Reatância do eixo de quadratura X_q	78
Equação 64 – Comprimento do passo da bobina de armadura $D\alpha_{AcB}$	78

Equação 65 – Valor do comp. do arco da cabeça de bobina de armadura A_{Ac_b}	79
Equação 66 – Comprimento médio de uma espira da armadura C_{A1e}	79
Equação 67 – Comprimento médio de uma espira do campo C_{C1e}	79
Equação 68 – Resistência de uma fase do enrolamento de armadura R_A	79
Equação 69 – Resistência do enrolamento de campo R_C	79
Equação 70 – Fluxo no pescoço do polo Φ_{pp_n}	80
Equação 71 – Tensão interna induzida em carga E_{A_n}	80
Equação 72 – Área da seção molhada A	81
Equação 73 – Perímetro molhado p_m	81
Equação 74 – Declividade S	81
Equação 75 – Impedância de carga nominal Z_{carga}	95
Equação 76 – Ordem da componente harmônica $v_{ranhura}$	100

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	TEMA	21
1.1.1	Delimitação do Tema	23
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	24
1.2.1	Objetivo geral	24
1.2.2	Objetivos específicos	24
1.3	JUSTIFICATIVA	25
1.4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	25
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	PEQUENOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS	27
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	27
2.2	CLASSIFICAÇÃO DAS MCHS E PCHS	29
2.2.1	Quanto a Capacidade de Regularização do Reservatório	29
2.2.2	Quanto ao Sistema de Adução	29
2.2.3	Centrais Quanto a Potência Instalada	30
2.3	LEGISLAÇÃO APLICÁVEL	30
2.4	TIPOS DE TURBINAS APLICÁVEIS	31
2.4.1	Turbina Pelton	32
2.4.2	Turbina Francis	32
2.4.2.1	Turbina Francis Caixa Aberta	33
2.4.2.2	Turbina Francis com Caixa Espiral	33
2.4.2.3	Turbina Francis Dupla	34
2.4.3	Turbina Kaplan	34
2.4.3.1	Turbina Bulbo com Multiplicador	35
2.5	ESCOLHA TÉCNICA DE TURBINAS	35
2.6	ESTIMATIVA DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO	36
3	GERADOR SÍNCRONO	39
3.1	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	39
3.1.1	Estator	39
3.1.2	Rotor	42
3.1.3	Mancais	43
3.1.4	Sistema de Refrigeração	45
3.1.4.1	Ventilação Aberta	45

3.1.4.2	Ventilação Fechada.....	46
3.1.5	Sistema de Excitação.....	47
3.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	48
3.2.1	Conceitos Gerais.....	48
3.2.2	Circuito Equivalente	50
3.2.2.1	Polos Lisos.....	50
3.2.2.2	Polos salientes	53
3.2.3	Comportamento do gerador a Vazio e sob Carga	55
3.2.3.1	Comportamento a vazio	55
3.2.3.2	Comportamento do gerador síncrono sob carga puramente resistiva.....	56
3.2.3.3	Comportamento do gerador síncrono sob carga puramente indutiva	56
3.2.3.4	Comportamento do gerador síncrono sob carga puramente capacitiva	57
3.3	EXCITAÇÃO DE GERADORES.....	57
3.3.1	Excitação com escovas.....	57
3.3.2	Excitação sem escovas.....	58
3.3.2.1	Alimentação através de bobina auxiliar.....	59
3.3.2.2	Alimentação através de Excitatriz Auxiliar.....	59
3.3.2.3	Alimentação através de uma fonte externa.....	60
3.3.2.4	Alimentação através dos terminais do gerador	60
4	PROJETO DO GERADOR.....	62
4.1	PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO A VAZIO.....	63
4.1.1	Rotor	63
4.1.2	Estator.....	70
4.2	PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES EM CARGA.....	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
5.1	ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO.....	81
5.2	PROJETO	83
5.2.1	Projeto 1	83
5.2.2	Projeto 2.....	99
5.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROJETOS	117
6	CONCLUSÃO	119
	REFERÊNCIAS.....	120
	APÊNDICE A – ESQUEMA DE BOBINAGEM PARA 72 RANHURAS E 12 POLOS.....	124

APÊNDICE B – ESQUEMA DE BOBINAGEM PARA 144 RANHURAS E 12	
POLOS.....	125
ANEXO A – TABELA DE CABOS NOVACON	126

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Dentre os principais problemas a serem enfrentados pela humanidade nos próximos 50 anos, a energia ocupa a primeira posição (ELY; SWART, 2014).

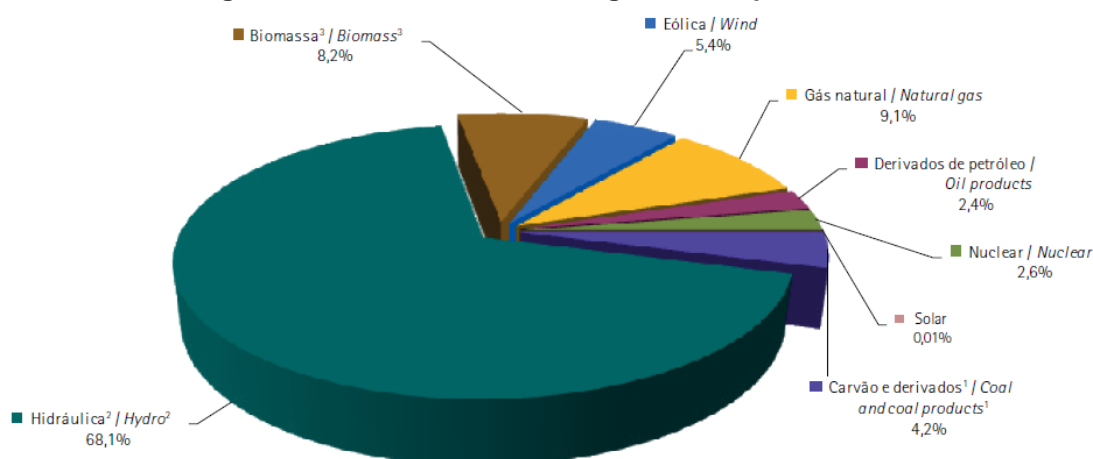
A importância da energia no contexto atual está cada vez mais clara, e isso vem sendo demonstrado por inúmeras pesquisas. Segundo o *U.S. Energy Information Administration* (2014) o consumo de energia deve passar de cerca de $23 \cdot 10^{12}$ kWh para $40 \cdot 10^{12}$ kWh no ano de 2040. O aumento mostrado por tal pesquisa demonstra a importância da geração de energia elétrica, já que tende a implicar em um enorme desafio: o incremento da capacidade mundial de produção de energia.

Nesse contexto, a geração de energia vem se tornando um assunto cada vez mais discutido e vem ganhando mais importância em escala mundial. Segundo o Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis (IDER, 2014), a busca por ampliar a oferta e reduzir os custos relacionados à geração de energia, bem como a atenção com temas como a sustentabilidade e o meio ambiente vem aumentando. Com o destaque que a sustentabilidade e o meio ambiente têm recebido, as energias renováveis aparecem como uma ótima alternativa às fontes tradicionais.

Alguns dos principais exemplos de energias renováveis são a energia hidrelétrica, solar, eólica e a biomassa. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2017), a matriz elétrica brasileira é majoritariamente formada por energia renovável (81,7%), sendo a principal fonte a geração hidrelétrica, com 68,1% de toda a oferta interna. A Figura 1 apresenta a oferta de energia elétrica por fonte no Brasil em 2017.

A eletricidade é algo extremamente necessário, sendo hoje imprescindível para a vida humana. O armazenamento de energia é um dilema enfrentado atualmente, isso porque a engenharia ainda não foi capaz de desenvolver um dispositivo de armazenamento que possua alta eficiência e ótimo custo benefício (LEITE; DELGADO; HAGE, 2017).

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte



Notas / Notes:

1. Inclui gás de coquearia / Includes coke oven gas
2. Inclui importação de eletricidade / Includes electricity imports
3. Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações / Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2017)

Essa dificuldade de armazenamento faz com que a produção e o consumo tenham que ter um equilíbrio. Segundo Camargo (2007), levando em conta que o consumo energético individual no Brasil ainda é baixo quando comparado a países mais desenvolvidos, esse consumo tende a continuar em crescimento. Pressupondo que é possível que os países mais desenvolvidos passem a manter este número estável, países como o Brasil ainda necessitariam de algo próximo a uma década para chegar neste mesmo patamar. Por este motivo, a oferta energética é cercada de incertezas, visto que para que se aumente a oferta no ritmo da demanda seriam necessários grandes investimentos, sendo grande parte destes sob responsabilidade do setor privado. Isso gera o questionamento se a iniciativa privada teria interesse nestes investimentos, levando em conta os altos impostos e as possíveis mudanças na regulamentação.

Com tais considerações é possível perceber que enquanto a demanda tem seu crescimento dado como certo, a geração é cercada de problemas e incertezas. Como é necessário que haja um equilíbrio entre produção e consumo, é preciso encontrar opções alternativas para que o equilíbrio seja mantido, dentre elas pode ser citada a geração distribuída.

Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE, 2017), a Geração Distribuída (GD) pode ser definida como uma expressão usada para designar a

geração elétrica realizada junto ou próxima do consumidor, independente da potência, tecnologia e fonte de energia.

Ainda segundo o INEE (2017) a geração distribuída inclui:

- Co-geradores;
- Geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs;
- Micro Centrais Hidrelétricas – MCHs;
- Mini Centrais Hidrelétricas – MGHs.

Segundo a resolução nº 673/15 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), as pequenas centrais hidrelétricas podem ser definidas como empreendimentos que realizam autoprodução ou produção independente de energia elétrica, com potência entre 3000 kW e 30000 kW e com área de reservatório de até 13 km² (excluindo-se a calha do leito regular do rio). Já as micro e mini centrais hidrelétricas são aquelas com potência igual ou inferior a 3000 kW.

Nos últimos anos, os países em desenvolvimento têm percebido a importância das PCHs, principalmente em locais mais isolados e remotos (BERGSTRÖM; MALMROS, 2005).

Este tipo de geração pode ser muito útil também nos casos de consumidores que, possuem algum tipo de potencial hidrelétrico dentro de sua propriedade e usam este tipo de geração para abater uma porcentagem de seu gasto energético ou suprir alguma carga adicional.

1.1.1 Delimitação do Tema

O presente trabalho apresenta o projeto de um gerador tendo como base um pequeno aproveitamento hidrelétrico. Foi realizado um estudo preliminar em que foi verificado o potencial hidrelétrico de uma pequena queda d'água com capacidade de produção estimada de 10,4 kW.

Com os dados da estimativa da altura da queda e da vazão de água onde foi feito o estudo, foi possível definir a turbina a ser utilizada, visando o melhor aproveitamento hidrelétrico.

Alguns dos parâmetros utilizados para a realização deste projeto foram coletados em uma pequena queda de água localizada na fazenda Putunã, em Tunas do Paraná, na região do Vale do Ribeira. A fazenda é de propriedade do senhor Joel Bazzo e com ela foram estimadas a vazão e a altura da queda. Com estes valores foi calculada a potência do gerador síncrono, e valores como a rotação, a tensão e a frequência foram impostos visando o conjunto gerador-turbina mais apropriado. Após esta etapa, o gerador foi projetado para atender estas especificações e o projeto foi validado através do método dos elementos finitos.

1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

Devido ao grande aumento do consumo de energia, a geração distribuída e as MCHs e PCHs ganham cada vez mais importância no que tange o atendimento do pequeno consumidor com algum potencial hidrelétrico.

As principais dificuldades da pesquisa foram a obtenção dos dados acerca da queda de água utilizada para que fosse possível definir os parâmetros do gerador projetado. O próprio projeto do gerador também representou um grande desafio, pois foi necessária uma vasta pesquisa na literatura da área e um aprofundamento na parte de geradores síncronos e nos métodos utilizados para que sejam projetados. Além disso, também foi necessário identificar no mercado os parâmetros que estão disponíveis para que possam se alinhar com o gerador projetado.

1.2.1 Objetivo geral

Projetar um gerador síncrono para um pequeno aproveitamento hidrelétrico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Pesquisar na literatura pertinente a instalação de micro, mini e pequenas Centrais Hidrelétricas;
- Estudar sobre máquinas síncronas e projeto de máquinas síncronas;
- Estimar a vazão e a altura da queda de água no local de interesse;

- Definir a turbina mais adequada para o aproveitamento em questão;
- Calcular a potência disponível, definir a rotação, tensão, frequência e número de polos do gerador;
- Projetar um gerador para atender as especificações do projeto;
- Validar o projeto através de simulações com o método dos elementos finitos.

1.3 JUSTIFICATIVA

No mundo globalizado em que vivemos, a energia elétrica se tornou um gasto significativo para pequenos, médios e grandes empresários.

A resolução normativa 482/12 da ANEEL (2012) regulamenta o sistema de compensação de energia elétrica. Segundo o caderno temático de Micro e Minigeração Distribuída da ANEEL (2016), esse sistema pode ser considerado uma inovação de grande importância, levando em conta que pode colaborar na redução de custos do consumidor, considerando a opção de injetar o excedente energético na rede da distribuidora. Caso a injeção de energia na rede seja maior do que o consumo, o consumidor poderá abater tal consumo em outra unidade consumidora ou nas faturas seguintes (com prazo de 5 anos), utilizando os créditos em energia (kWh) que recebeu pelo excedente do mês atual.

Assim, optou-se em realizar o projeto de um gerador elétrico baseando-se em uma queda d'água, localizada na região metropolitana de Curitiba. Levando em conta os crescentes gastos energéticos, surgiu a ideia de realizar uma pesquisa tendo como objeto de estudo este local.

Para essa finalidade, estudos foram realizados para definir a melhor forma de aproveitar essa fonte de energia. Tais estudos possibilitaram o maior entendimento prático em projetos e especificações de máquinas síncronas, e, com isso, foi possível projetar o gerador mais adequado.

1.4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Este trabalho foi realizado através de pesquisas bibliográficas em artigos, teses, normas, catálogos de fabricantes e manuais, havendo assim um aprofundamento do conhecimento técnico. A partir disso, foi realizado trabalho de

campo através de visitas ao local em questão para a realização de medidas e coleta de dados relacionados ao potencial energético disponível. Após a identificação deste potencial energético e especificação do gerador síncrono mais adequado, foi realizado o projeto eletromagnético do gerador, através de cálculos analíticos, em planilhas de cálculo, e numéricos, definindo assim todas as suas dimensões e características de seus enrolamentos. Após projetado, os resultados deste trabalho foram validados através de análises com o método dos elementos finitos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A primeira etapa do trabalho, Capítulo 1, consiste na introdução, expondo o tema a ser abordado, bem como suas delimitações, os objetivos, a justificativa deste trabalho, os problemas e premissas e os procedimentos metodológicos.

Na etapa seguinte, Capítulos 2 e 3, foi realizada a fundamentação teórica do trabalho. No Capítulo 2 foram analisados os pequenos aproveitamentos hidrelétricos, sendo abordados conceitos de geração distribuída, legislação aplicável, pequenas e micro centrais hidrelétricas, tipos de turbinas aplicáveis e a maneira de estimar o potencial. Já no Capítulo 3, o gerador síncrono foi apresentado, sendo detalhadas suas características construtivas, seu princípio de funcionamento e as formas de excitação.

Na terceira etapa do trabalho, Capítulo 4, foi realizado um descritivo do projeto do gerador, explicando detalhadamente todos os passos de sua realização. No Capítulo 5, foram expostos os valores impostos e os resultados obtidos, bem como a simulação e validação do projeto. Por fim, no Capítulo 6 foram expostas as conclusões e considerações finais deste trabalho.

2 PEQUENOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS

A questão energética tem se tornado um assunto fundamental no que diz respeito ao crescimento dos países. A distribuição de forma irregular de energia elétrica e o aumento considerável nos custos da mesma fez que a segurança energética se tornasse uma das principais preocupações das nações (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Segundo Boldea (2015), ainda existe um grande potencial inexplorado em pequenos reservatórios para a produção de energia elétrica. Este potencial pode ser aproveitado a partir da implantação de micro e mini centrais hidrelétricas. A utilização destes pequenos aproveitamentos pode trazer uma nova era de desenvolvimento de energia hidrelétrica dinâmica, trazendo mais energia e resultando em menos problemas para o meio ambiente. Uma das melhores formas de utilizar tais potenciais hidrelétricos é a geração distribuída.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Geração distribuída pode ser descrita como a utilização de tecnologias para a geração de energia que seja destinada primordialmente para ser utilizada em cargas locais (WRIGHT; CARVALHO; SPERS, 2009).

Segundo Wright, Carvalho e Spers (2009), com a geração distribuída, o consumidor mantém-se conectado à rede para que sua garantia de provisão de energia não seja afetada, porém utiliza preponderantemente a energia que é gerada no local.

Segundo a ANEEL (2015), o crescimento da geração distribuída pode ser explicado pelas vantagens que traz ao sistema elétrico. Como exemplo tem-se menores perdas e maior diversificação na matriz elétrica; menor necessidade imediata de investimentos de expansão no sistema elétrico; redução no carregamento das redes e baixos impactos ambientais.

Uma parcela das vantagens da GD dá-se pela proximidade da unidade consumidora, entretanto existem diversas outras vantagens que a geração distribuída pode oferecer (INEE, 2001; CALABRÓ, 2013):

- Mais facilidade em se adequar ao aumento da demanda;

- Como este modo dispensa o transporte através de longas distâncias, aumenta de maneira considerável a confiabilidade do fornecimento para consumidores próximos;
- As reservas de geração distribuídas acrescentam mais estabilidade ao sistema elétrico;
- Menos perdas na transmissão, pois não existem perdas devido ao processo de transmissão;
- Menos necessidade de investimentos para melhorias no sistema de transmissão;
- As concessionárias podem reduzir os investimentos para o fornecimento de ponta, pois ele é feito, em parte, pelos produtores;
- Menos riscos de planejamento;
- Melhora na eficiência energética;
- Diminuição considerável nos efeitos da geração de energia para o meio ambiente;
- Oferece maior concorrência para o mercado de energia elétrica, trazendo mais oportunidades de comercialização;
- Auxílio na manutenção das tensões em níveis corretos e possibilidade de alívio no congestionamento do sistema de transmissão e nas sobrecargas;
- Tem um enorme potencial que ainda é pouco explorado;
- Dependendo do tipo de geração, pode gerar empregos e desenvolvimento econômico;
- Descentraliza a geração de energia.

O INEE (2001) também destaca que a geração distribuída pode trazer algumas desvantagens, como:

- Procedimentos e manutenções com maior complexidade;
- Maiores complicações comerciais, contratuais e administrativas;
- Problemas com relação a coordenação de atividades;
- O autoprodutor pode vir a ser prejudicado, pois a ligação com a rede diminui sua autossuficiência, fazendo com que não possa mais pensar

apenas nos próprios benefícios, tendo que pensar em todos os consumidores da rede.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS MCHS E PCHS

De acordo com a Eletrobras (2000), as centrais hidrelétricas podem ser classificadas de acordo com 3 fatores: quanto a capacidade de regularização; quanto ao sistema de adução; e quanto a potência instalada e à altura de queda do projeto.

2.2.1 Quanto a Capacidade de Regularização do Reservatório

As micro e pequenas centrais hidrelétricas são classificadas em três tipos quanto a capacidade de regularização do reservatório (ELETROBRAS, 2000).

O primeiro tipo são as centrais hidrelétricas a Fio d'Água. Segundo a Eletrobras (2000), para este tipo de central, o aproveitamento energético é limitado e este formato de PCH é utilizado em locais onde a vazão em momentos de seca é igual ou maior do que a vazão necessária para atender a demanda máxima de potência do projeto. As centrais a Fio d'Água também acrescentam algumas facilidades, como: não necessitam de estudos de regularização de vazões e de sazonalidade da carga elétrica do consumidor, além de simplificar os estudos e a concepção da tomada d'água.

O segundo tipo são as centrais hidrelétricas de Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório. De acordo com a Eletrobras (2000), neste caso um reservatório é utilizado para repor a vazão necessária prevista em projeto. Além disso, a sua utilização se dá quando as vazões em momentos de seca não conseguem suprir a vazão necessária exigida no projeto.

A última opção de projeto são as centrais hidrelétricas de Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório que são similares a opção anterior, porém com a regulação mensal da vazão (ELETROBRAS, 2000).

2.2.2 Quanto ao Sistema de Adução

Segundo a Eletrobras (2000), as MCHs e PCHs são classificadas em 2 tipos quanto ao sistema de adução:

- Adução em baixa pressão com escoamento livre em canal/alta pressão em conduto forçado;
- Adução em baixa pressão por meio de tubulação/alta pressão em conduto forçado.

O tipo a ser escolhido baseia-se nas situações topográficas e geológicas, além de estudos econômicos para o local onde o projeto será executado.

2.2.3 Centrais Quanto a Potência Instalada

Levando em conta a potência do projeto, pode-se classificar estas centrais hidrelétricas em pequenas, micro e mini centrais hidrelétricas. A microgeração distribuída é definida como centrais geradoras de energia elétrica que sejam conectadas à rede por instalações de unidades consumidoras, utilizem fontes renováveis e que tenham potência de 75 kW ou menos, a minigeração (MGH) é definida na faixa de 75 kW a 3 MW e as pequenas centrais hidrelétricas são definidas entre 3 MW e 30 MW. (ANEEL, 2012).

2.3 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL

No Brasil as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação estão estabelecidas na resolução 482/2012 da ANEEL.

A resolução não define os custos da mini ou microgeração, pois o projeto e a aplicação dependem do consumidor, que deve realizar as pesquisas e análises necessárias para avaliar se o projeto compensa. Além disso, a ANEEL (2017) destaca que o custo pode variar de acordo com muitos fatores, como: o tipo de fonte de energia, a tecnologia utilizada, se está em área rural ou urbana e a tarifa no local.

A resolução ainda destaca que é possível instalar uma MCH em locação diferente de onde se encontra a unidade consumidora.

Uma das grandes vantagens para o consumidor da resolução 482/2012 é o sistema de compensação. Segundo a ANEEL (2017) o sistema de compensação é definido como uma disposição onde o usuário instala uma MCH em sua propriedade e a energia gerada é descontada do seu consumo de energia e caso o consumo de energia seja menor em relação a geração, esse excedente pode ser compensado nos

meses seguintes. Esses créditos podem ser utilizados em até 60 meses, além disso os créditos podem ser utilizados em outros locais desde que estejam cadastrados para o mesmo proprietário e cumpram os requisitos da resolução 482/2012.

Caso um micro ou mini gerador cumpra todas as questões presentes na resolução, a ANEEL (2012) estabelece que a concessionária não pode negar a conexão à rede. Ainda cita que caso existam custos para mudanças no sistema de distribuição que tenham relação com a conexão do gerador à rede, os mesmos serão de responsabilidade da concessionária.

De acordo com Calabré (2013), além da resolução 482/2012, pode-se citar mais uma lei e um decreto com relação direta com a geração distribuída e a microgeração: a lei 10848/04 e o decreto nº 5.163/04. A primeira informa que a energia de geração distribuída deve ser levada em conta no mercado das distribuidoras, considerando todos os limites de contratação e de repasse às tarifas. Já o decreto estabelece que a carga proveniente de geração distribuída não pode exceder 10% da carga total da concessionária.

2.4 TIPOS DE TURBINAS APLICÁVEIS

Turbinas hidráulicas tem a finalidade de transformar a energia potencial, proveniente da água, em energia mecânica no eixo do gerador. São constituídas por um sistema hidráulico fixo, o qual orienta a água em fluxo, e por um sistema rotativo hidromecânico, que é destinado à transformação em trabalho mecânico (FUCHS, SANTOS; SOUZA, 1983).

Entre os principais tipos de turbinas, pode-se citar as turbinas de ação e reação. Nas turbinas de reação, a transformação da energia cinética e de pressão da água pelo rotor resulta na obtenção do trabalho mecânico. Podem ser do tipo Kaplan ou Francis, de eixo vertical, horizontal ou inclinado, em caixa aberta ou fechada, com tubo de sucção cônico reto ou em cotovelo. Já as turbinas de ação transformam apenas a energia cinética da água em trabalho mecânico. Um exemplo de turbinas de ação são as do tipo Pelton, e podem ser de eixo horizontal ou vertical, com um ou mais rotores e com um ou mais injetores (SCHREIBER, 1978; FUCHS, SANTOS, SOUZA, 1983).

2.4.1 Turbina Pelton

As turbinas Pelton normalmente são utilizadas em aproveitamentos hidráulicos cuja vazão é relativamente pequena e com quedas elevadas (100 a 500 metros) e potências de 500 a 12.500 kW (GOMES, 2010).

Consegue-se observar na Figura 2 que este tipo de turbina possui uma roda circular com um conjunto de copos ou conchas em sua periferia. Sobre estas conchas jatos de água são injetados tangencialmente por um ou mais injetores, que estão distribuídos na periferia da roda (GOMES, 2010).

Figura 2 – Turbina Pelton



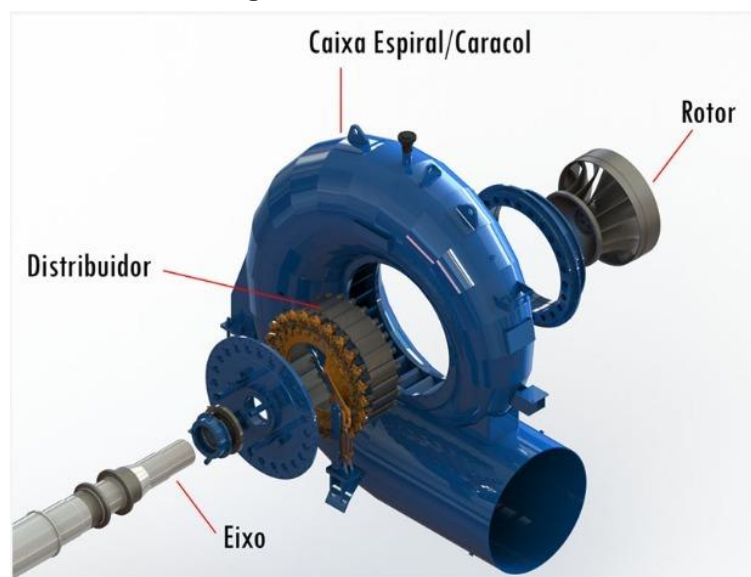
Fonte: ANDRADE (2017)

2.4.2 Turbina Francis

A turbina Francis é classificada como turbina de reação, onde o fluxo de água penetra radialmente no rotor, no qual as pás são fixas (ABNT, 2016).

Nesta turbina, o fluxo de água entra na direção radial de forma igualitária, por toda a extremidade da entrada do rotor, e sai pela direção radial. Seu rotor é composto por pás fixas com curvatura especial, estruturadas entre as coroas interna e externa, conforme se observa na Figura 3 (SCHREIBER, 1978).

Entre os tipos de turbina Francis, podem ser citadas: turbina Francis caixa aberta, turbina Francis com caixa espiral e turbina Francis dupla.

Figura 3 – Turbina Francis**Fonte: Hidroenergia (2018)**

2.4.2.1 Turbina Francis Caixa Aberta

A turbina Francis caixa aberta é usada para pequenas quedas (até 10 metros) e potências entre 500 e 1800 kW. O baixo rendimento alcançado por essa turbina normalmente implica ao usuário o uso de outras fontes de energia (ELETROBRAS, 2000).

2.4.2.2 Turbina Francis com Caixa Espiral

A turbina Francis com caixa espiral é aplicada a quedas na faixa entre 15 e 250 metros e potências de 500 a 15.000 kW. A sua utilização sob carga de até 70% da carga nominal apresenta excelentes resultados de desempenho. Ainda que com algumas perdas progressivas de rendimento, esse tipo de turbina ainda funciona muito bem na faixa entre 50 e 70% da carga nominal. Não é recomendável o seu uso em faixas abaixo de 50% da vazão nominal, embora hajam soluções específicas capazes de diminuir as perdas de rendimento. Por recomendação do fabricante, deve-se escolher uma velocidade de rotação que possibilite a disposição do rotor acima do nível de água de jusante. Tal fato facilita os trabalhos de manutenção e inspeção (ELETROBRAS, 2000).

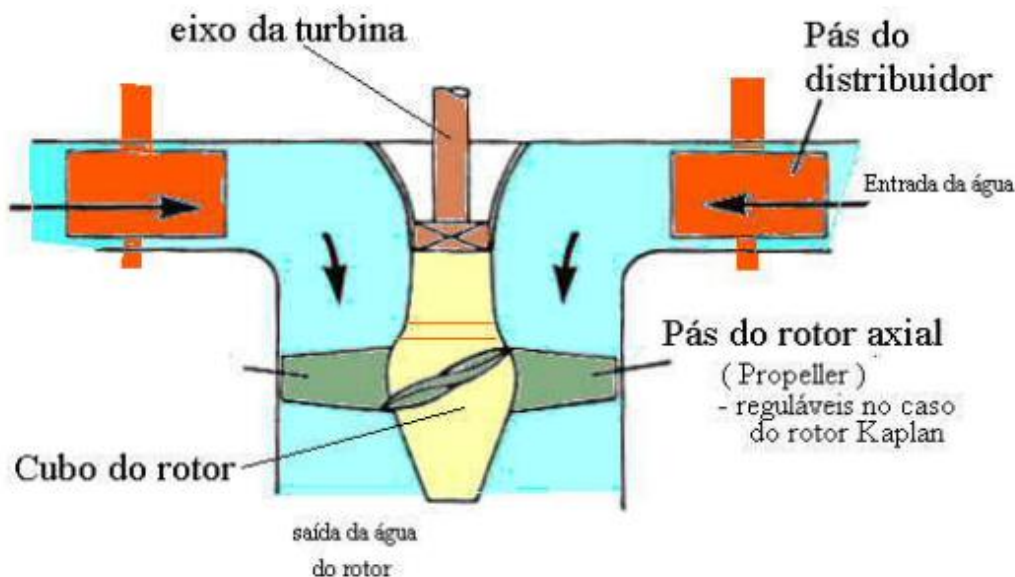
2.4.2.3 Turbina Francis Dupla

A turbina Francis dupla pode ser considerada como variantes das duas citadas anteriormente. A característica que difere esta turbina das demais é que seu rotor é constituído de forma diferente. Tal rotor é duplo, dividindo a vazão afluente em duas partes. Possui uma peça com apenas uma coroa, duas cintas e dois conjuntos de pás (ELETROBRAS, 2000).

2.4.3 Turbina Kaplan

As turbinas Kaplan são turbinas de reação, ideais para utilização em pequenas quedas e em grandes vazões. São integradas por um compartimento de entrada, o qual pode ser aberto ou fechado, um distribuidor e por uma roda constituída por um conjunto de pás, conforme a Figura 4. Quando essas pás são fixas, a turbina é classificada como tipo hélice. Caso sejam móveis, a turbina é denominada Kaplan. Nesse caso, é possível realizar a variação do ângulo de ataque das pás do rotor através do regulador da turbina. Essa variação, aliada à ação do distribuidor, permite às turbinas Kaplan uma regulação eficiente (GOMES, 2010).

Figura 4 – Turbina Kaplan



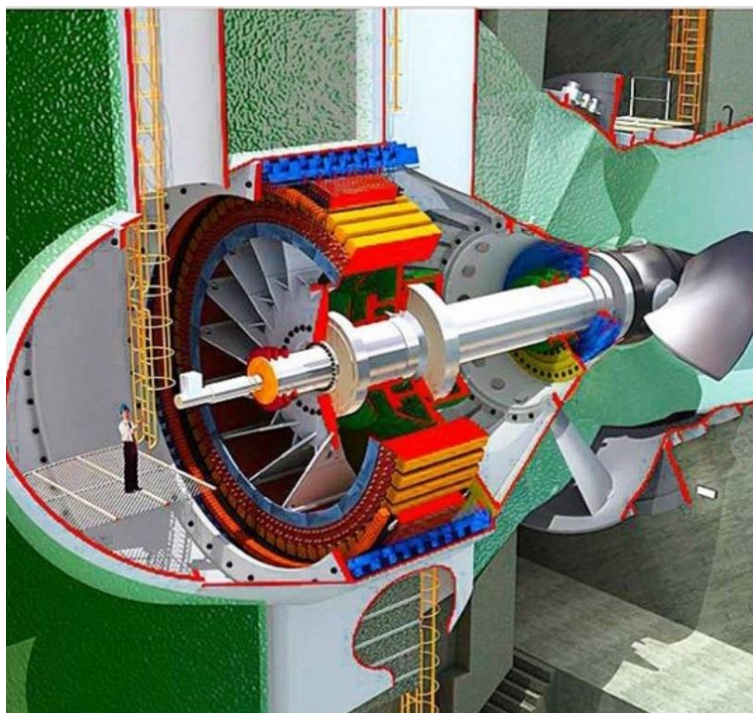
Fonte: Gomes (2010)

2.4.3.1 Turbina Bulbo com Multiplicador

Este tipo de turbina torna-se uma opção à turbina Kaplan, visto que atende a quedas na faixa entre 4 e 12 metros e potência até 1.700 kW. Seu uso é aconselhável para ocasiões onde há grande variação de vazão e possui bom funcionamento sob cargas parciais de até 10 a 20% da carga nominal (ELETROBRAS, 2000).

A Figura 5 representa uma turbina do tipo bulbo.

Figura 5 – Turbina Bulbo Multiplicador



Fonte: Santo Antonio Energia (2016)

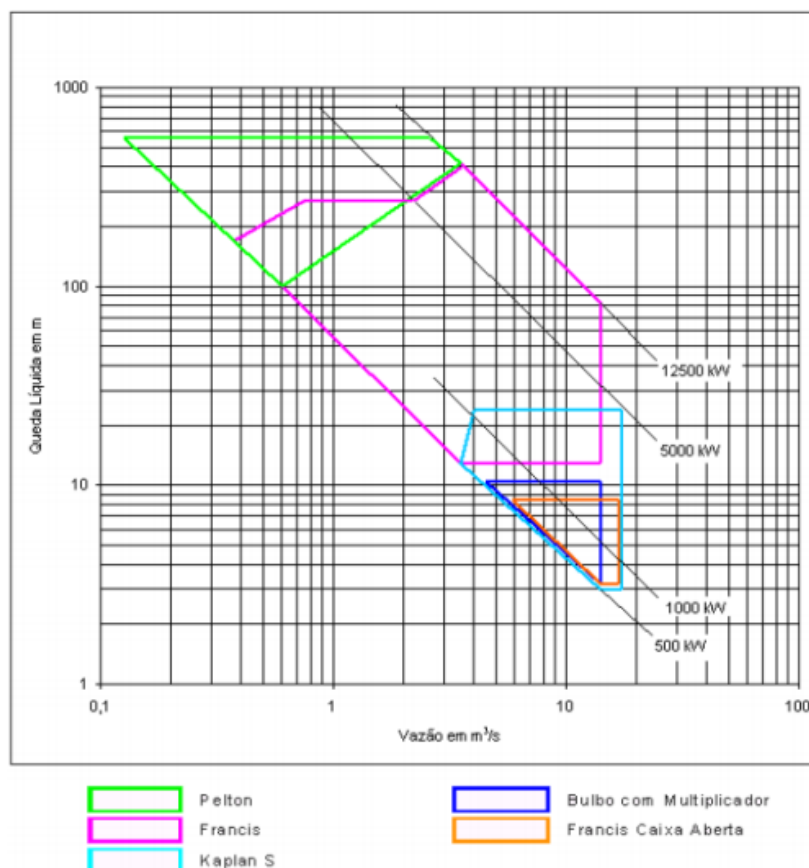
2.5 ESCOLHA TÉCNICA DE TURBINAS

Diversos fatores influenciam na escolha adequada da turbina a ser utilizada em uma central hidrelétrica. Entre eles, podem ser citados a rotação específica, custos, risco de cavitação, sistema de operação e aspectos ligados ao ambiente de instalação (FUCHS, SANTOS; SOUZA, 1983).

Além disso, a escolha das turbinas deve visar a facilidade de sua manutenção e operação. Fatores como robustez e confiabilidade devem ter grande importância, visto que toda a operação da turbina ocorre de modo não assistido (ELETROBRAS, 2000).

Na Figura 6 são apresentados valores da altura da queda em metros relacionados com os dados de vazão do sistema, assim como a potência estimada na saída em kW, a qual pode ser obtida fazendo a interpolação dos valores das linhas. Exemplificando, para uma queda de 70 metros, uma vazão de 7 m³/s e uma potência de 5000 kW, a turbina mais adequada seria uma Turbina Francis.

Figura 6 – Escolha do tipo de turbina



Fonte: Eletrobras (2000)

Todos os tipos de turbinas contam com um gerador acoplado, responsável pela transformação da energia mecânica, proveniente do movimento das águas, em energia elétrica.

2.6 ESTIMATIVA DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO

De acordo com a Eletrobras (2000), para o cálculo da potência do gerador proposto é necessário, em primeiro lugar, estimar a vazão do curso d'água. Uma das maneiras de calcular esse dado é pela fórmula continuidade, proposta na Equação 1.

$$Q = A \cdot V \quad (1)$$

sendo

- Q a vazão da água em m³/s;
- A a área da seção molhada em m²;
- V a velocidade de escoamento em m/s.

A área da seção molhada depende do tubo escolhido e para a obtenção da velocidade de escoamento da água, é necessário utilizar a Equação de Manning (Equação 2) (Eletrobras, 2000).

$$V = \frac{(A/p_m)^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n_{rug}} \quad (2)$$

sendo

- p_m o perímetro molhado em m;
- S a declividade do canal;
- n_{rug} o coeficiente de rugosidade.

Os dados p_m e S dependem do tubo escolhido e das especificações de projeto respectivamente. O valor do coeficiente de rugosidade varia de acordo com o material do duto. A Tabela 1 contém os valores mais utilizados.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de rugosidade

Material	Coefficiente de rugosidade
PVC	0,009
Cerâmica	0,011
Concreto centrifugado	0,013
Aço corrugado	0,021

Fonte: DRENARTEC (2006)

Com o dado da vazão (Q) é possível obter a potência do gerador (FARRET; SIMÕES, 2006). A fórmula para a potência nominal é dada pela equação 3.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \cdot N_g \cdot N_h \cdot N_t \quad (3)$$

sendo

- P a potência nominal em W;
- ρ a massa específica da água em kg/m³;

- g a aceleração da gravidade em m/s^2 ;
- Q a vazão da água em m^3/s ;
- h a altura da queda d'água em m ;
- N_g o rendimento do gerador;
- N_h o rendimento da tubulação;
- N_t o rendimento da turbina.

A massa específica da água e a aceleração da gravidade são conhecidos e a altura da queda d'água é medida. Os rendimentos do gerador, da tubulação e da turbina serão detalhados no capítulo 5.

3 GERADOR SÍNCRONO

Geradores síncronos são máquinas elétricas capazes de transformar energia mecânica em energia elétrica. Neste tipo de equipamento, a velocidade mecânica de rotação do gerador é sincronizada com a frequência elétrica (WEG, 2017; CHAPMAN, 2013).

3.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

O gerador síncrono é dividido em uma série de componentes, dentre os quais é possível citar como os mais importantes o estator, o rotor, os mancais, o sistema de refrigeração e o sistema de excitação.

3.1.1 Estator

Os principais componentes do estator, representado pela Figura 7, de um gerador síncrono são a carcaça, o núcleo ferromagnético e o enrolamento de armadura (WEG, 2003).

Figura 7 – Visão do estator de um gerador síncrono



Fonte: WEG (2003)

A carcaça, mostrada na Figura 8, é composta por chapas e perfis de aço soldados e possui como principais atribuições a proteção do equipamento e a refrigeração, além de comportar o enrolamento do estator e o pacote de chapas. Ela precisa ter uma certa rigidez estrutural, a fim de resistir contra possíveis esforços mecânicos, levando em conta que é o suporte estrutural da máquina (WEG, 2003).

Figura 8 – Carcaça do gerador



Fonte: WEG (2017)

O grau de proteção das máquinas é definido de acordo com a aplicação e define a resistência da máquina em relação à entrada de água e ao contato com partículas sólidas. Este grau é indicado por “IP” e dois algarismos, que significam respectivamente a proteção contra corpos estranhos e a proteção contra água (ZAFALON, 2013).

A Tabela 2 demonstra o significado de cada algarismo. Por exemplo, uma máquina de grau de proteção IP54 tem proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor e proteção contra respingos vindos de todas as direções.

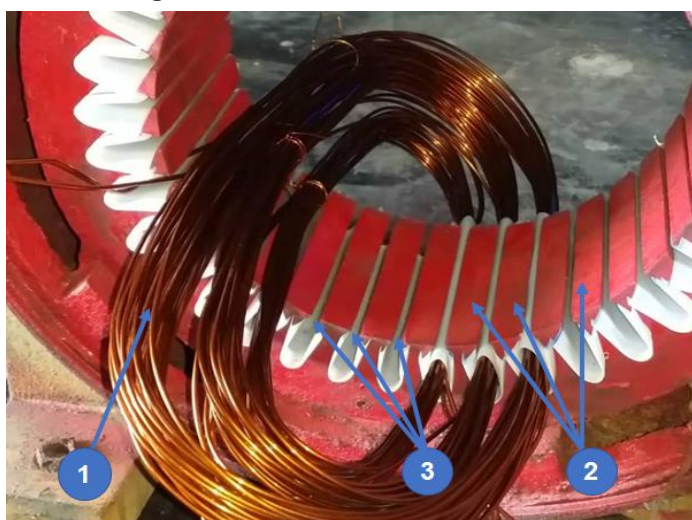
Tabela 2 – Grau de proteção

IP – Grau de proteção		
Algarismo	1º Algarismo	2º Algarismo
0	Sem proteção	Sem proteção
1	Proteção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 50 mm	Proteção contra pingos de água na vertical
2	Proteção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 12 mm	Proteção contra pingos de água até a inclinação de 15' com relação à vertical
3	Proteção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 2,5 mm	Proteção contra pingos de água até a inclinação de 60' com relação à vertical
4	Proteção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 1,0 mm	Proteção contra respingos vindos de todas as direções
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor	Proteção contra jatos de água vindos de todas as direções
6	Totalmente protegido contra a poeira	Proteção contra água de vagalhões
7	-	Imersão temporária
8	-	Imersão permanente

Fonte: ABNT (1980) e ABNT (1987)

O núcleo ferromagnético é um conjunto de chapas laminadas feitas de aço magnético. Nele estão contidos os dentes e as ranhuras da armadura, demonstrados pelo número 2 e 3 respectivamente na Figura 9. Sua principal função é alojar as bobinas da armadura, apresentadas pelo número 1 da Figura 9 (OLIVEIRA, 2009).

Figura 9 - Enrolamento de armadura



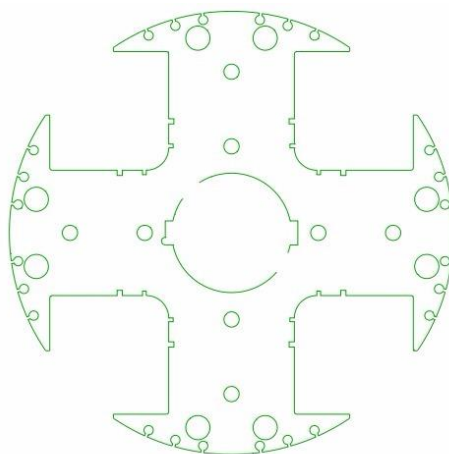
Fonte: SEITEC (2014)

3.1.2 Rotor

O rotor representa as partes girantes da máquina. Pode apresentar polos lisos ou salientes, de acordo com a aplicação e características construtivas (WEG, 2003).

Os rotores com polos salientes, conforme mostra a Figura 10, são normalmente utilizados para aplicações de baixa velocidade, devido ao seu elevado número de polos (REIS, 2013).

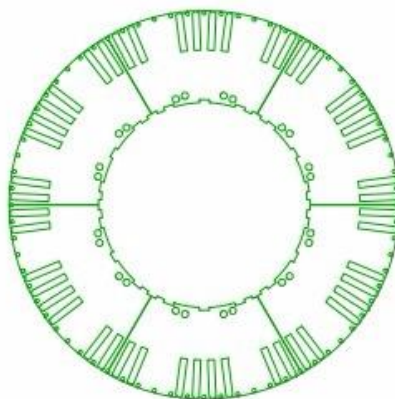
Figura 10 – Rotor de polos salientes



Fonte: WEG (2017)

Diferentemente dos rotores de polos salientes, os rotores de polos lisos (Figura 11) geralmente apresentam baixo número de polos, tornando-os aplicáveis para situações de alta velocidade. Além disso, máquinas de polos lisos apresentam normalmente um diâmetro reduzido em relação às de polos salientes, porém seu comprimento é maior (REIS, 2013).

Figura 11 – Rotor de polos lisos



Fonte: WEG (2017)

Ao contrário da máquina assíncrona, as correntes que circulam no enrolamento de campo (no rotor) das máquinas síncronas são contínuas no tempo (fluxo magnético constante), por esse motivo nestas máquinas não há perdas por corrente de Foucault no núcleo magnético do rotor, desconsiderando-se o fluxo de reação de armadura. Desta forma, esse componente do gerador pode ser de aço maciço e não de chapas empilhadas (GUEDES, 2001).

O eixo do gerador encontra-se no interior do rotor, sendo construído de acordo com a finalidade da máquina e solicitações de esforços (WEG, 2003).

Além do enrolamento de campo, o rotor abriga outro enrolamento, o enrolamento amortecedor. Tal enrolamento encontra-se na parte exterior do rotor de polos lisos ou nas ranhuras das sapatas polares dos rotores de polos salientes, conforme mostra a Figura 12. Sua configuração é basicamente uma gaiola, com barras atravessando as ranhuras e curto-circuitadas nas extremidades. Este enrolamento suaviza as harmônicas geradas, além de amortecer oscilações diante de variações de carga, estabilizando a rotação do equipamento (WEG, 2017; WEG, 2003).

Figura 12 - Enrolamento amortecedor



Fonte: WEG (2003)

3.1.3 Mancais

Os mancais são equipamentos mecânicos, nos quais apoia-se o eixo e, conseqüentemente, todo o rotor. A função dos mancais é basicamente possibilitar um

movimento com o menor atrito possível, além de alinhar e suportar o eixo do gerador (GUEDES, 1994).

Assim, diversos fatores influenciam na vida útil desses dispositivos, como os esforços axiais e radiais, a correta manutenção e lubrificação, a velocidade de operação e as condições ambientais nas quais estão inseridos (WEG, 2017).

A classificação dos mancais está relacionada com sua finalidade. Podem ser mancais de rolamento ou mancais de bucha (deslizamento).

A composição dos mancais de rolamentos (Figura 13) depende dos esforços aos quais são expostos, podendo ser de esferas ou de rolos cilíndricos (WEG, 2003).

Figura 13 – Mancal de Rolamento



Fonte: WEG (2017)

Os mancais de bucha possuem dois tipos de lubrificação: natural (Figura 14) e forçada (Figura 15). Na lubrificação natural, é formada uma camada de óleo entre o eixo e a superfície dos casquilhos do mancal. Para a utilização deste tipo de mancal, a temperatura da área de uso deve ser indicada antes da realização do projeto, evitando assim problemas de refrigeração. Já a lubrificação forçada é utilizada quando o tipo anterior não suporta as solicitações da aplicação, como em casos de grandes perdas por atrito ou ocasiões em que rotação específica é elevada (WEG, 2003).

Figura 14 – Mancal de bucha com refrigeração natural



Fonte: WEG (2017)

Figura 15 – Mancal de bucha com circulação forçada de óleo



Fonte: WEG (2017)

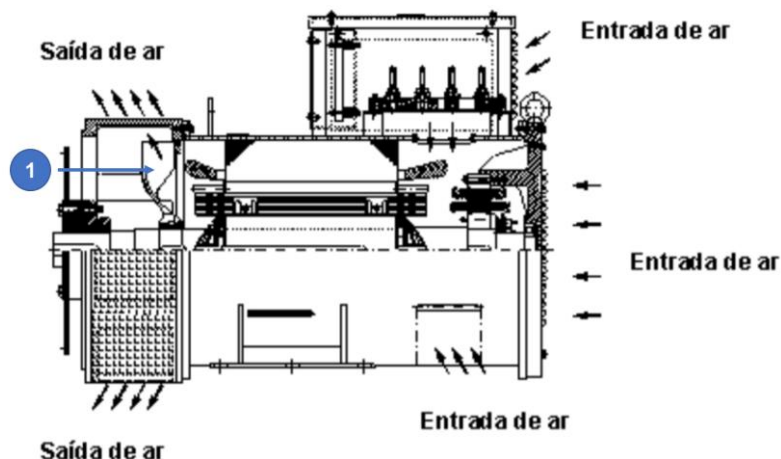
3.1.4 Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração é o mecanismo responsável por ventilar o motor e garantir que as trocas térmicas sejam efetivas. Atualmente os fabricantes vem construindo motores com ventilação aberta ou fechada (WEG, 2003).

3.1.4.1 Ventilação Aberta

Este sistema possui um ventilador interno de fluxo axial montado em seu eixo, que é responsável pela troca de ar garante que o ar quente no interior do gerador seja substituído pelo ar frio do meio, conforme indicado com o número 1 na Figura 16 (WEG, 2017).

Figura 16 – Refrigeração do gerador com ventilação aberta



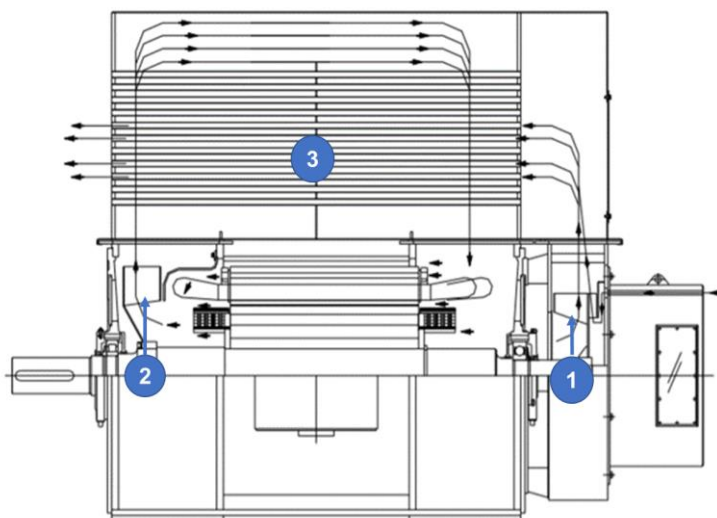
Fonte: WEG (2017)

3.1.4.2 Ventilação Fechada

Diferente do modelo aberto, o sistema fechado mantém o ar ambiente separado do ar no interior do gerador, o resfriamento é feito entre a carcaça e o meio. Conforme essa troca de calor é realizada, pode-se classificar o modelo fechado em 2 subtipos: trocador de calor Ar-Ar e trocador de calor Ar-água (WEG, 2017).

No modelo Ar-Ar, são montadas no eixo do gerador: um ventilador (1), que garante o fluxo do ar dentro do equipamento e outro ventilador (2) que garante a movimentação do ar ambiente pelos tubos e realiza a troca de calor, conforme exemplificado na Figura 17 (WEG, 2017).

Figura 17 – Refrigeração do gerador com trocador de calor ar-ar

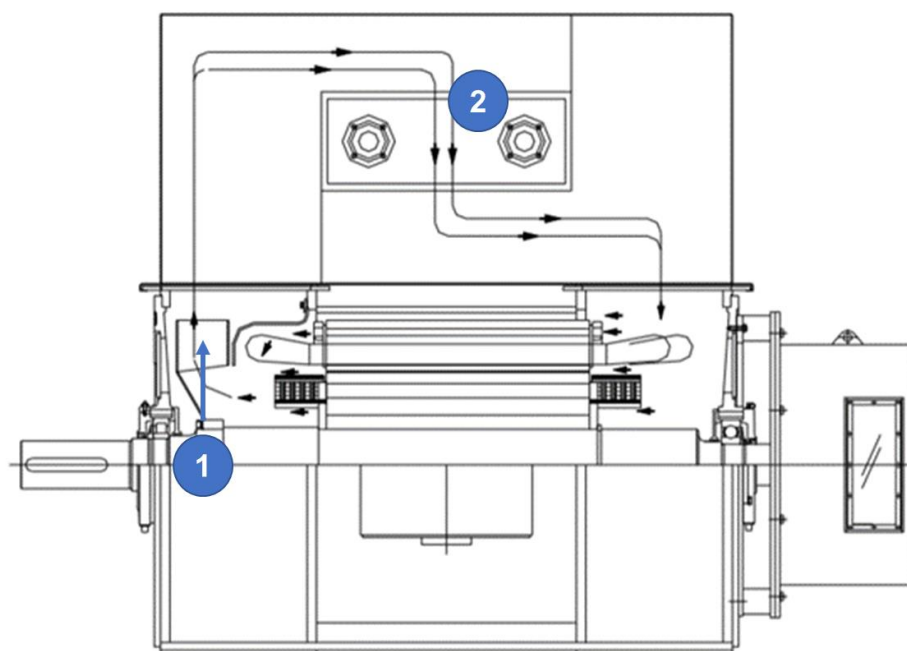


Fonte: WEG (2017)

Os tubos axiais indicados pelo número 3 na Figura 17 são feitos em sua maioria com alumínio trefilado, aço inox ou tubos especiais (WEG, 2017).

No modelo Ar-Água os ventiladores são instalados internamente, com a mesma função dos ventiladores do modelo Ar-Ar. O diferencial desse sistema é a existência de radiadores indicados pelo número 2 na Figura 18, onde a água gelada circula. Quando a hélice sinalizada pelo número 1 na Figura 18 força a circulação do ar quente no interior do gerador, o ar é forçado a passar por dentro dos radiadores, onde o calor é trocado no sistema de refrigeração dos radiadores (WEG, 2017).

Figura 18 – Refrigeração do gerador com trocador de calor ar-água



Fonte: WEG (2017)

3.1.5 Sistema de Excitação

O sistema de excitação consiste em aplicar uma corrente contínua no rotor do gerador e controlar a tensão terminal de armadura. Tal sistema pode utilizar ou não anéis coletores e escovas, além de utilizar um regulador de tensão, uma excitatriz principal e uma excitatriz auxiliar (WEG, 2003).

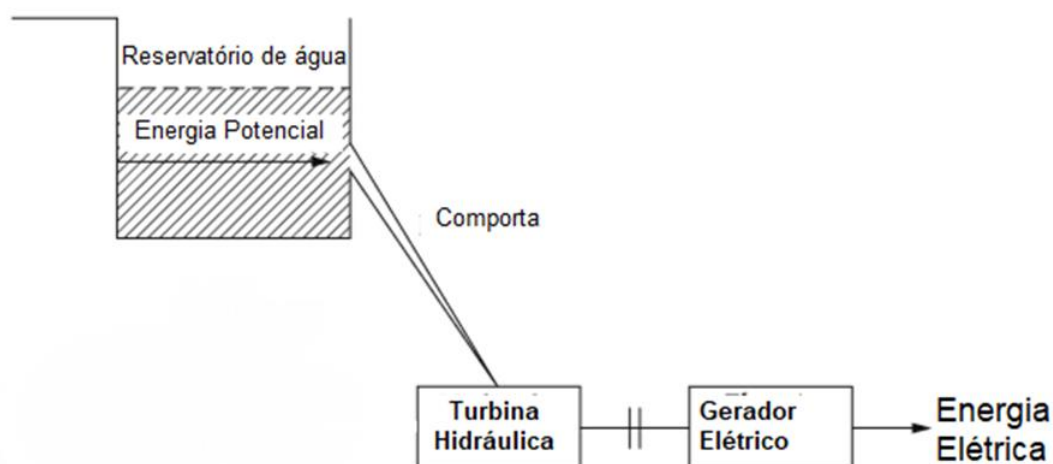
O sistema de excitação está detalhado no item 3.3.

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

3.2.1 Conceitos Gerais

O conceito de geração de energia gerada por aproveitamentos hídricos é explicada de maneira simplificada na Figura 19, onde o reservatório armazena a água e a libera pela comporta para as turbinas hidráulicas (máquina primária), que transformam energia potencial mecânica da água em energia rotacional mecânica. O gerador elétrico, acoplado ao eixo da turbina, converte a energia mecânica rotacional em energia elétrica (BOLDEA, 2015).

Figura 19 – Geração de energia em sistemas hídricos



Fonte: Boldea (2015)

Para gerar energia elétrica, o gerador síncrono necessita basicamente de duas condições: rotação em seu eixo, imposta por uma máquina primária e campo criado pelo rotor, seja por ímãs permanentes ou por eletroímãs, onde a corrente CC é fornecida pelo sistema de excitação (CHAPMAN, 2013).

Ao alimentar o enrolamento de campo com uma fonte de corrente contínua (CC) obtida através de um sistema de excitação, cria-se um campo magnético no circuito do rotor, este fenômeno é descrito pela lei de Ampère apresentada na Equação 4 (FITZGERALD; UMANS; KINGSLEY JUNIOR, 2006).

$$H = \frac{Ni}{L_n} \quad (4)$$

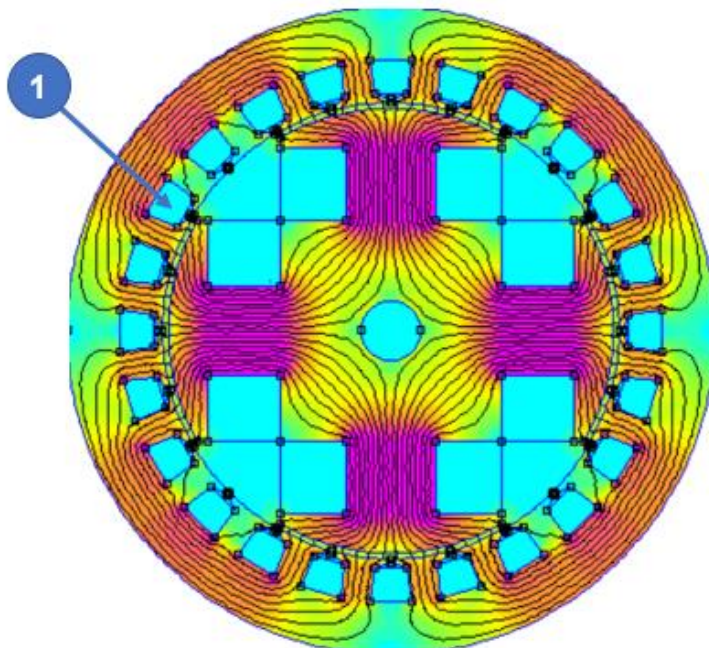
sendo

- H a intensidade do campo magnético em A.esp/m;

- Ni a corrente líquida que passa dentro do caminho de integração em A.esp;
- L_n o comprimento do caminho médio no núcleo em m.

Ao alimentar o rotor com uma fonte CC, cria-se um campo magnético, mostrado na Figura 20 (CHAPMAN, 2013).

Figura 20 – Fluxo magnético de um gerador de 4 polos



Fonte: lamamura (2018)

A partir do polo, este fluxo flui para o entreferro, passa pelo núcleo do estator e retorna aos polos adjacentes, cruzando novamente o entreferro. Ao entrar no estator, o fluxo cruza as bobinas do enrolamento de armadura, inseridas nas ranhuras do estator indicadas na Figura 20 pelo número 1. Se uma máquina primária fizer o gerador girar, as bobinas de armadura serão atravessadas por um fluxo variante no tempo. Quando isso acontece, uma tensão é induzida neste enrolamento (lei de Faraday), sendo diretamente proporcional à amplitude e à taxa de variação do fluxo em relação ao tempo, de acordo com a equação 5 (CHAPMAN, 2013).

Devido ao fluxo magnético variável que atravessa o estator, conseqüentemente irão surgir correntes de Foucault. Uma das maneiras de amenizar os efeitos destas correntes é utilizar um estator de núcleo laminado. Estas chapas são formadas por material ferromagnético e isoladas eletricamente entre si. Já o rotor não necessita ser laminado, visto que o fluxo que passa por ele é constante (BASTOS, 2008).

$$e_{ind} = -N_{espfb} \frac{d\Phi_{bob}}{dt} \quad (5)$$

sendo

- e_{ind} a tensão induzida na bobina em V;
- Φ_{bob} o fluxo que passa através da bobina;
- N_{espfb} o número de espiras de fio da bobina.

O sinal negativo nas equações é uma expressão da lei de Lenz. Essa lei afirma que o sentido com que a tensão cresce na bobina é tal que, se os terminais da bobina fossem colocados em curto-circuito, seria produzida uma corrente que causaria um fluxo oposto à variação original de fluxo (CHAPMAN, 2013).

A tensão alternada trifásica induzida no enrolamento de armadura (estator) devido ao fluxo que atravessa as bobinas da armadura possui frequência elétrica proporcional à velocidade de giro do rotor e ao número de polos do gerador. A taxa requerida de rotação para uma dada frequência pode sempre ser calculada a partir da equação 6 (FITZGERALD; UMANS; KINGSLEY JUNIOR, 2006).

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad (6)$$

sendo

- f a frequência elétrica, em Hz;
- p o número de polos do gerador;
- n a velocidade mecânica do campo magnético, em rpm (igual à velocidade do rotor nas máquinas síncronas).

A frequência elétrica deve ser gerada em um valor pré determinado, de modo que o gerador deve girar com uma velocidade fixa, dependendo do número de polos da máquina. Por exemplo, em uma máquina de dois polos a 60 Hz, o rotor deve girar a 3600 rotações por minuto, de acordo com a equação 6.

3.2.2 Circuito Equivalente

3.2.2.1 Polos Lisos

O circuito equivalente do gerador síncrono pode ser descrito como um modelo matemático que representa seu comportamento. Há uma queda de tensão entre a tensão interna gerada nas bobinas de armadura e a tensão terminal do gerador. Esta

queda de tensão acontece devido a três fatores: reação de armadura, autoindutância das bobinas de armadura e a resistência das bobinas (CHAPMAN, 2013).

O efeito conhecido como reação de armadura refere-se à corrente gerada no estator (armadura) quando uma carga é aplicada aos terminais do gerador. Essa corrente produz um campo magnético que distorce o campo magnético já existente do rotor e altera a tensão de fase resultante (CHAPMAN, 2013).

Assim sendo a tensão da reação de armadura é proporcional à corrente que circula no estator, sendo calculada conforme Equação 7.

$$\Delta V_{RA} = jX \cdot I_a \quad (7)$$

sendo

- ΔV_{RA} a tensão de reação de armadura em V;
- X uma constante de proporcionalidade;
- I_a a corrente que circula no estator em A;
- j representa o atraso de 90° da corrente em relação a tensão.

Além do efeito da reação de armadura, devem ser também consideradas as perdas causadas pela autoindutância (ΔV_{Xa}) e pela resistência do estator (ΔV_{Ra}) (CHAPMAN, 2013). Estas perdas são demonstradas nas equações 8 e 9 respectivamente.

$$\Delta V_{Xa} = jX_A \cdot I_a \quad (8)$$

$$\Delta V_{Ra} = R_A \cdot I_a \quad (9)$$

sendo

- X_A a reatância de armadura em Ω ;
- I_a a corrente de armadura em A;
- R_A a resistência de armadura em Ω .

Assim, pela Lei de Kirchhoff das tensões, tem-se que a tensão de saída nos terminais do gerador síncrono (V_ϕ), mostrada na equação 10, é dada pela tensão interna gerada em uma fase (E_A) subtraída das quedas de tensão descritas anteriormente (CHAPMAN, 2013).

$$V_\phi = E_A - jX \cdot I_a - jX_A \cdot I_a - R_A \cdot I_a \quad (10)$$

Da equação 10, pode-se combinar a constante de proporcionalidade da reação de armadura com a reatância de autoindutância em uma única reatância, nomeada como reatância síncrona da máquina (X_S). Essa combinação está descrita como:

$$X_S = X + X_A \quad (11)$$

Portanto, a equação que descreve a tensão de saída de um gerador síncrono é dada por:

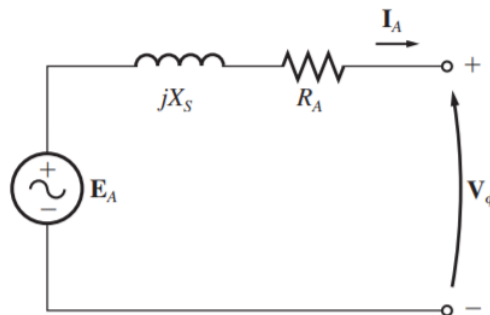
$$V_\phi = E_A - jX_S \cdot I_a - R_A \cdot I_a \quad (12)$$

sendo

- V_ϕ a tensão de saída nos terminais do gerador síncrono em V;
- E_A a tensão gerada interna em uma fase do gerador em V;
- X_S a reatância síncrona da máquina, sendo a soma entre a reatância da armadura e a autoindutância das bobinas em Ω ;
- R_A a resistência do estator em Ω .

A partir disso, o circuito equivalente de um gerador síncrono é apresentado na Figura 21.

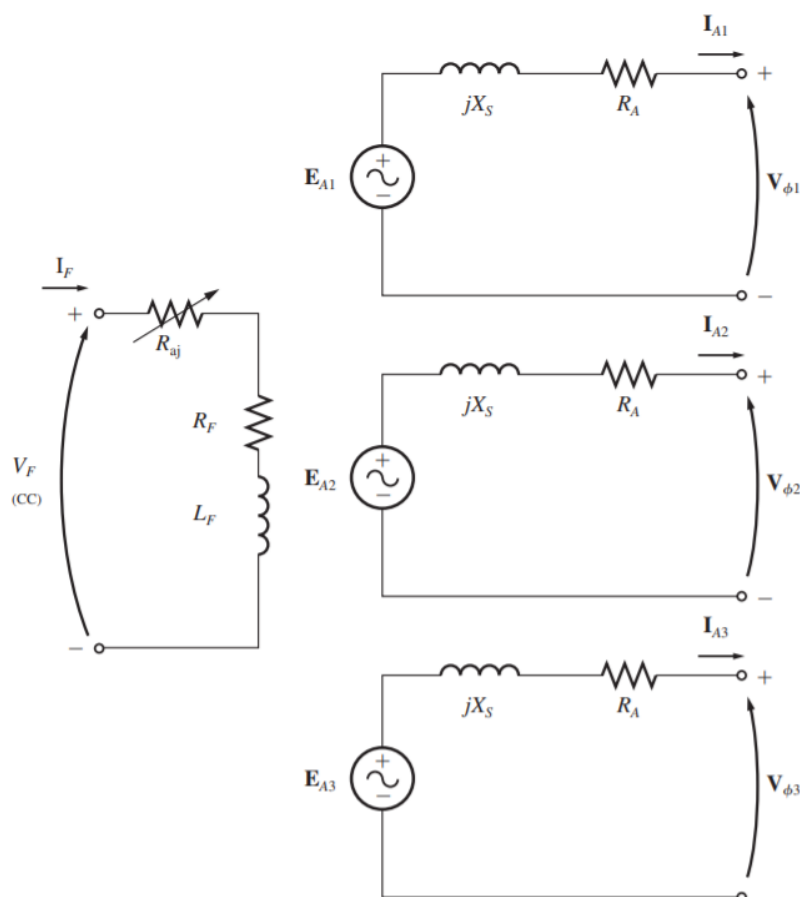
Figura 21 – Circuito equivalente gerador síncrono por fase



Fonte: Chapman (2013)

O circuito equivalente trifásico, considerando o circuito de campo, é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Circuito equivalente trifásico gerador síncrono



Fonte: Chapman (2013)

Sendo I_f a corrente de campo, R_F e L_F a resistência e indutância de campo, respectivamente, e R_{aj} um resistor ajustável simbolizando o controle do fluxo do campo.

3.2.2.2 Polos salientes

Em um gerador de polos salientes, o fluxo produzido tende a circular preferencialmente através dos polos. Esta região onde encontram-se os polos é denominada eixo direto. Já a região entre polos é chamada eixo de quadratura (FITZGERALD; UMANS; KINGSLEY JUNIOR, 2006).

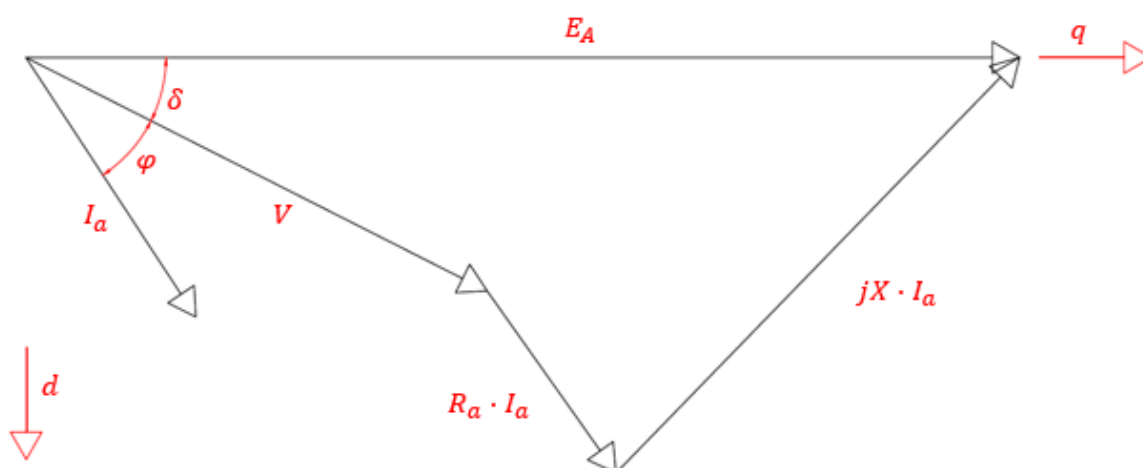
Neste tipo de máquina, a tensão interna gerada, a autoindutância e a resistência do enrolamento do estator permanecem constantes. Já a reação de armadura se altera (CHAPMAN, 2013).

Em geradores com polos salientes o valor da relutância magnética nos polos é baixo e entre os polos é alto. Sendo assim, uma força magnetomotriz cria um fluxo

maior na região dos polos comparado à região entre eles. Por consequência, a reatância em eixo direto X_d é maior que a reatância no eixo de quadratura X_q (SEN, 2013).

A fim de determinar a tensão terminal do gerador síncrono, deve-se realizar a análise do diagrama fasorial de uma máquina de polos salientes, mostrado na Figura 23.

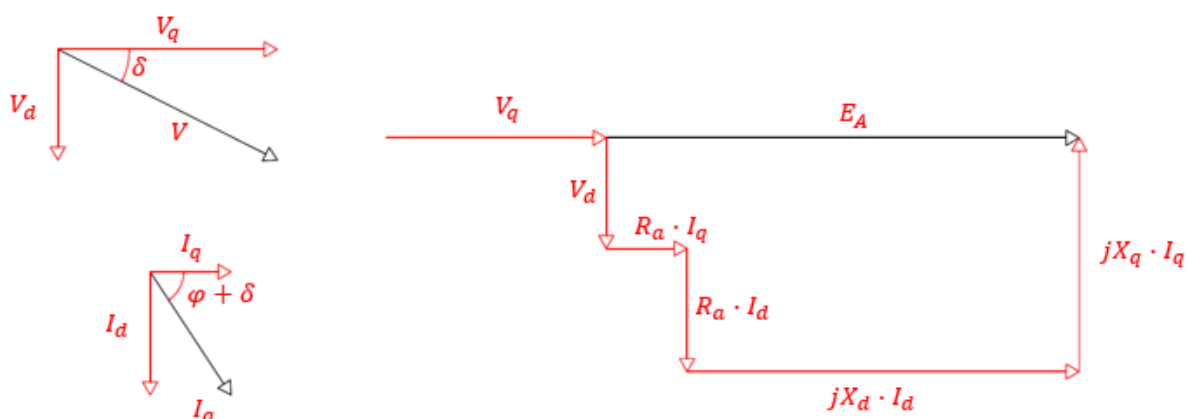
Figura 23 - Diagrama fasorial de um gerador síncrono com carga indutiva



Fonte: Autoria própria

Fazendo a decomposição da corrente e da tensão nos eixos direto e de quadratura, chega-se no seguinte diagrama fasorial, demonstrado na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama fasorial após a decomposição nos eixos direto e em quadratura



Fonte: Autoria própria

Através da análise do diagrama fasorial apresentado na Figura 24, pode-se calcular as componentes da corrente de armadura nos eixos direto e em quadratura,

por meio das equações 13 e 14. Em seguida, as componentes da tensão terminal fase-neutro nos eixos direto e em quadratura podem ser determinadas através das equações 15 e 16.

$$I_d = I_a \cdot \sin(\Phi + \delta) \quad (13)$$

$$I_q = I_a \cdot \cos(\Phi + \delta) \quad (14)$$

$$V_d = jX_q \cdot I_q - R_A \cdot I_d \quad (15)$$

$$V_q = E_A - jX_d \cdot I_d - R_A \cdot I_q \quad (16)$$

sendo,

- I_q a corrente de armadura no eixo em quadratura em A;
- I_d a corrente de armadura no eixo direto em A.
- V_q a tensão terminal fase-neutro no eixo em quadratura em V;
- V_d a tensão terminal fase-neutro no eixo direto em V;
- Φ o ângulo entre a tensão e a corrente em graus;
- δ o ângulo de carga em graus.

O ângulo entre a tensão e a corrente é determinado através do fator de potência da máquina, conforme mostra a equação 17. Segundo Sen (2013), o ângulo de carga pode ser determinado através da equação 18.

$$\Phi = \cos^{-1} FP \quad (17)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{I_a \cdot X_q \cdot \cos \Phi}{\frac{V_T}{\sqrt{3}} + I_a \cdot X_q \cdot \sin \Phi} \right) \quad (18)$$

Após a obtenção das tensões terminais fase-neutro em cada eixo pode-se calcular a tensão terminal fase-neutro total V_ϕ por meio da equação 19.

$$V_\phi = \sqrt{V_q^2 + V_d^2} \quad (19)$$

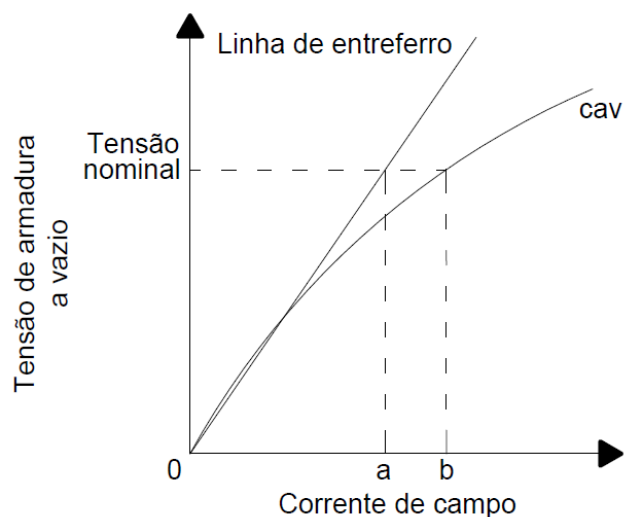
3.2.3 Comportamento do gerador a Vazio e sob Carga

3.2.3.1 Comportamento a vazio

Quando o gerador síncrono atua em vazio, a corrente de armadura I_a é nula. Assim, a tensão de terminal é igual a tensão interna induzida e a característica de

circuito aberto é dada pela relação entre a corrente de campo e a tensão induzida (Figura 25) (FITZGERALD; UMANS; KINGSLEY JUNIOR, 2006).

Figura 25 – Característica de circuito aberto



Fonte: Fitzgerald, Umans e Kingsley Junior (2006)

O comportamento linear inicial é chamado de linha de entreferro e apresenta a característica de operação não saturada. Com o crescimento da corrente de campo, a saturação do material magnético reduz a efetividade da corrente (FITZGERALD; UMANS; KINGSLEY JUNIOR, 2006).

3.2.3.2 Comportamento do gerador síncrono sob carga puramente resistiva

A corrente de campo, quando referente a uma carga puramente resistiva, produz um campo magnético próprio que gera dois polos defasados que são responsáveis por produzir uma queda de tensão nos enrolamentos de armadura. Isso faz com que seja necessário um aumento na corrente de campo para que se mantenha a tensão terminal (WEG, 2017).

3.2.3.3 Comportamento do gerador síncrono sob carga puramente indutiva

No caso de gerador síncrono atuando com uma carga indutiva, a corrente do estator é defasada em 90° de atraso em relação a tensão. Em consequência, o campo magnético do estator atua na mesma direção do campo principal, mas com polaridade oposta. Assim, o efeito da carga indutiva é desmagnetizante e para que se mantenha

a tensão nominal, é necessário um grande aumento da corrente de excitação (WEG, 2017).

3.2.3.4 Comportamento do gerador síncrono sob carga puramente capacitiva

Ao contrário da carga indutiva, a corrente de armadura da carga capacitiva é defasada de 90° adiantada em relação a tensão. Assim, o campo magnético do estator atua na mesma direção e polaridade do campo principal. Dessa forma, o campo tem efeito magnetizante e para que se mantenha a tensão nominal, é necessário reduzir o valor da corrente de excitação (WEG, 2017).

3.3 EXCITAÇÃO DE GERADORES

O sistema de excitação tem por finalidade fornecer corrente contínua para o circuito de campo do gerador síncrono. Além disso, têm funções de controle da tensão de armadura do gerador (NICOLAU, 2016).

No passado, o sistema convencional de excitação consistia em um gerador de corrente contínua conectado ao eixo do gerador síncrono. Com o surgimento de novas técnicas, mais eficientes e sem necessidade de manutenções frequentes, tal sistema passou a ser preterido (COSTA, 2001).

Atualmente, os sistemas de excitação dos geradores síncronos podem ser com ou sem a utilização de escovas.

3.3.1 Excitação com escovas

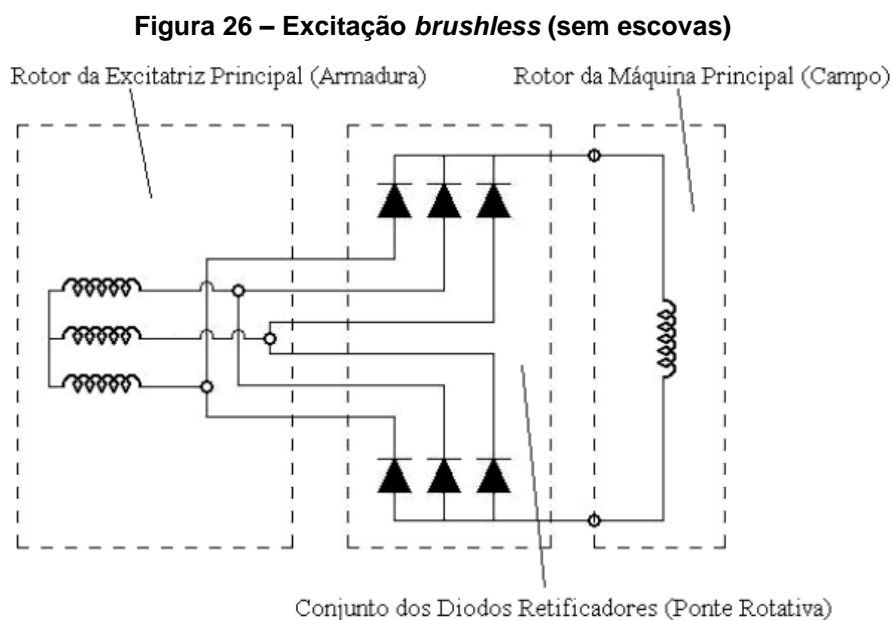
Neste tipo de excitação, a tensão contínua é fornecida ao sistema através de uma fonte CC, por meio de anéis coletores e escovas. No eixo do gerador síncrono haverão dois anéis coletores, os quais são conectados às extremidades do enrolamento CC do rotor. Além disso, cada anel está conectado a uma escova, as quais têm capacidade de condução de energia elétrica e baixo atrito (CHAPMAN, 2013).

A fim de manter a tensão de saída do gerador constante, é utilizado o regulador de tensão. Tal regulador monitora continuamente a tensão de saída do gerador e atua na excitatriz estática, responsável pela alimentação do campo (PINHEIRO, 2007).

Entre as vantagens que podem ser citadas na utilização da excitação por escovas, destaca-se o fato de que a corrente contínua é aplicada diretamente no rotor, possibilitando uma resposta mais rápida. Por outro lado, a maior manutenção das escovas e possíveis faiscamentos podem ser citados como desvantagens deste uso. Desta forma, este tipo de excitação não pode ser utilizado em ambientes de atmosfera explosiva e as frequentes interrupções por manutenção das escovas podem significar prejuízos financeiros consideráveis (PINHEIRO, 2007).

3.3.2 Excitação sem escovas

Para este tipo de excitação, escovas e anéis coletores não são necessários. Por outro lado, utiliza-se uma excitatriz principal, localizada no mesmo eixo do rotor, na qual são geradas tensões trifásicas alternadas. Desta forma, no eixo do gerador é montado um circuito retificador (seis diodos), responsável por receber a tensão alternada da excitatriz principal e transferir a corrente retificada diretamente ao rotor, sem a necessidade de escovas (PINHEIRO, 2007). Tal sistema é popularmente conhecido como *brushless*, cujo circuito elétrico pode ser observado na Figura 26.



Fonte: Pinheiro (2007)

Este tipo de excitação torna-se o mais aplicado comparado aos demais, pelo fato de possuir menores custos com manutenção, além de apresentar uma maior confiabilidade (CHAPMAN, 2013).

O regulador de tensão também é utilizado neste sistema, e tem a mesma funcionalidade do utilizado na excitação com escovas. Nos geradores *brushless*, a alimentação do regulador de tensão pode ser obtida de diferentes maneiras: através de bobina auxiliar, de excitatriz auxiliar, de uma fonte externa ou dos terminais do gerador.

3.3.2.1 Alimentação através de bobina auxiliar

Segundo o manual de Características e Especificações de Geradores WEG (2017), parte dos geradores síncronos possui um conjunto monofásico de bobinas, conforme Figura 27, que fica alojado em algumas ranhuras do estator principal. A função destas bobinas é fornecer potencia para o regulador de tensão.

Figura 27 – Bobinas auxiliares

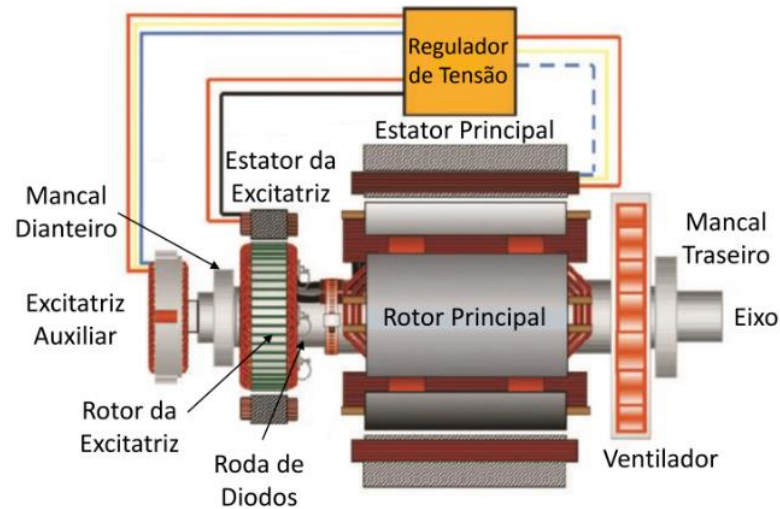


Fonte: Bazzo (2018)

3.3.2.2 Alimentação através de Excitatriz Auxiliar

A excitatriz auxiliar, também conhecida como PMG (*permanent magnet generator* - gerador de ímãs permanentes), fornece uma tensão alternada para o regulador de tensão. Tal gerador encontra-se no mesmo eixo da excitatriz principal e do rotor. O regulador de tensão recebe uma tensão trifásica da excitatriz auxiliar, a retifica, e transfere tensão CC para o campo da excitatriz principal (BOLDEA, 2015). A Figura 28 ilustra o um sistema de excitação brushless contento a excitatriz principal, a excitatriz auxiliar, os diodos para retificação da tensão e o regulador de tensão.

Figura 28 – PMG – Excitratiz auxiliar



Fonte: WEG (2017)

3.3.2.3 Alimentação através de uma fonte externa

A utilização de uma fonte externa é uma alternativa simples para a alimentação do regulador de tensão. Entretanto, a necessidade de disponibilidade de tensão torna-se a principal desvantagem desse recurso.

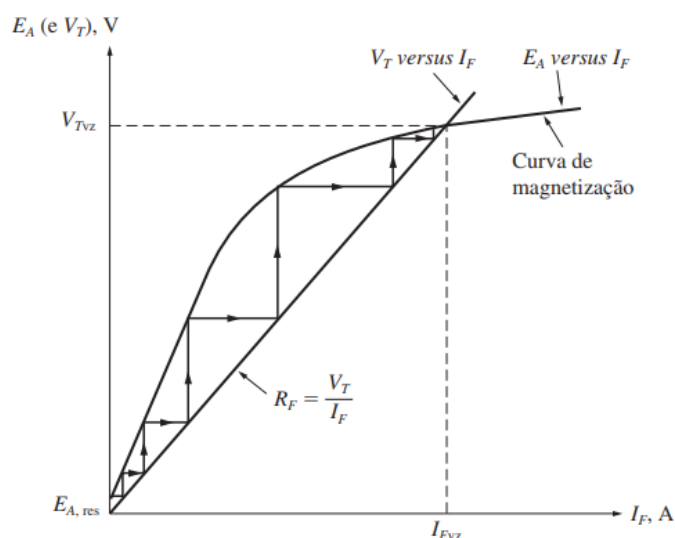
3.3.2.4 Alimentação através dos terminais do gerador

Assumindo que não há nenhuma carga conectada ao gerador, a geração inicial de tensão no gerador depende do fluxo residual nos seus polos. Com o início da rotação, uma tensão E_A , dada pela equação 20, será induzida, fazendo circular na bobina de campo uma corrente I_f . Essa circulação de corrente faz com que uma força magnetomotriz seja produzida nos polos, resultando conseqüentemente no aumento do fluxo (CHAPMAN, 2013).

$$E_A = K \cdot \phi_{res} \cdot \omega_m \quad (20)$$

Pode-se observar na equação 20 que com esse crescimento do fluxo há um incremento na tensão E_A , e, por conseqüência, uma elevação da tensão terminal V_T , aumentando a corrente I_f , o fluxo ϕ_{res} , e assim sucessivamente (CHAPMAN, 2013). Esse processo é denominado escorvamento, e segue representado pela Figura 29.

Figura 29 - Escorvamento na partida de um gerador síncrono



Fonte: Chapman (2013)

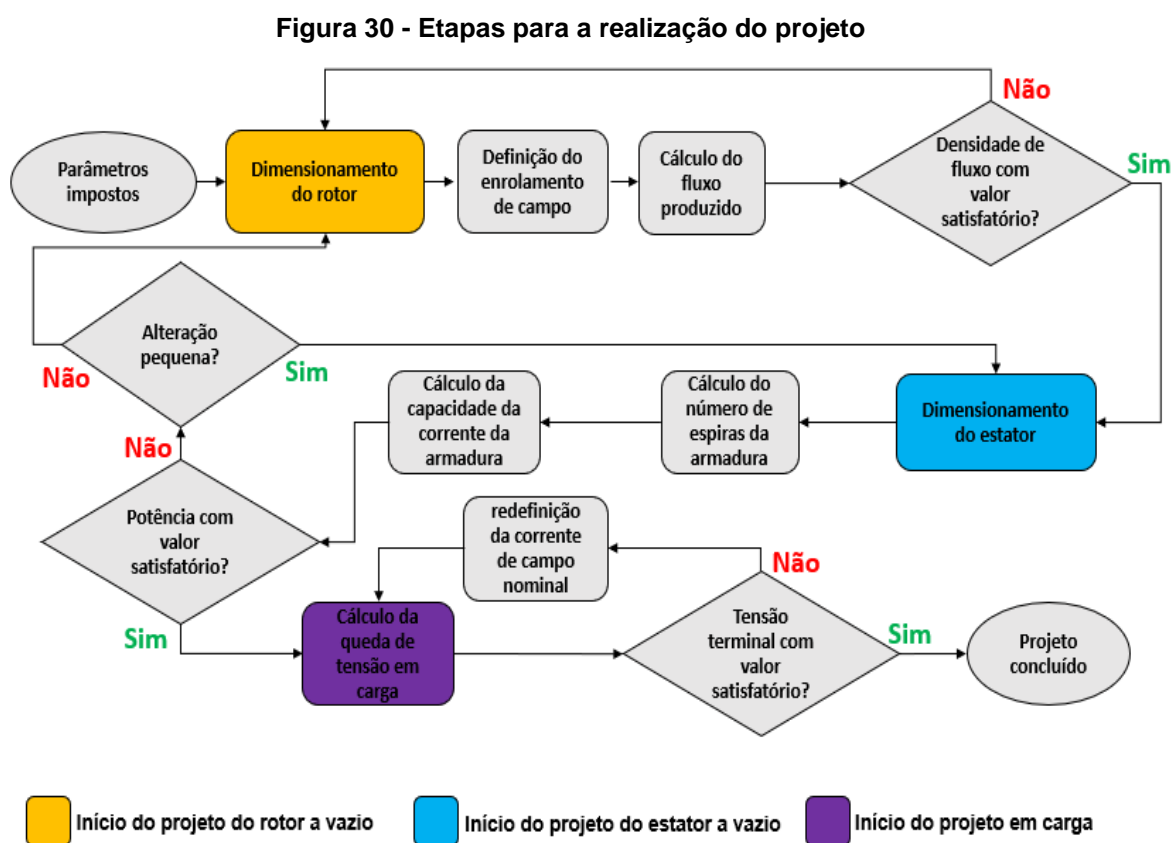
Na Figura 29 observam-se “degraus” para a demonstração da geração inicial de tensão, que representam a realimentação positiva entre a corrente de campo e a tensão interna. Porém, em um gerador real, E_A e I_f crescem conjuntamente até alcançarem as condições nominais (CHAPMAN, 2013).

Além disso, no final da curva, é possível observar o efeito da saturação magnética das faces polares. Tal fenômeno impossibilita o aumento regular da tensão de terminal do gerador (CHAPMAN, 2013).

4 PROJETO DO GERADOR

No item 2.6 foram demonstradas as formas de calcular a velocidade da água através do tubo, a vazão através deste mesmo tubo e, por fim, a potência de entrada do gerador. Com a obtenção do valor da potência, aliado às informações de frequência, rotação nominal, tensão terminal e fator de potência da máquina – as principais especificações do projeto.

A partir das descrições expostas no capítulo 3 a respeito das características construtivas e do princípio de funcionamento do gerador síncrono, é possível iniciar o projeto da máquina em questão. O projeto do gerador foi realizado em duas etapas, sendo a primeira a vazio, que é dividida nos projetos do rotor e estator, e em seguida considerando a aplicação de carga. A Figura 30 apresenta um fluxograma contendo, de forma simplificada, as etapas para a realização do projeto do gerador síncrono.



Fonte: Autoria própria

4.1 PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO A VAZIO

Para realização do projeto a vazio, é necessário estipular os valores de diâmetro externo do rotor, densidade de corrente de campo, corrente de campo a vazio, corrente de campo máxima, comprimento do entreferro, altura do pescoço e do colarinho da ranhura, número de ranhuras, largura de abertura da ranhura, número de caminhos em paralelo, número de camadas da bobinagem e densidade de corrente de armadura. Esses valores são alterados a fim de que as especificações da máquina sejam atendidas.

Além disso, são definidos uma série de fatores para que os parâmetros do gerador, como largura do pescoço do polo, altura do pescoço do polo e altura da sapata polar, estejam relacionados com os dados estipulados. A seguir são descritos os passos utilizados para a elaboração do projeto a vazio, iniciando-se pelo rotor e finalizando-se com o estator.

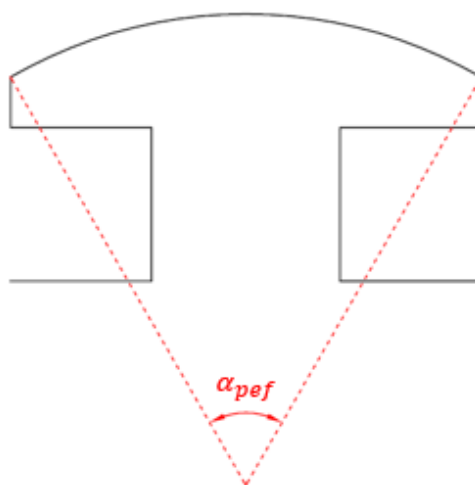
4.1.1 Rotor

Inicialmente, com os valores de rotação e frequência adotados, é possível calcular o número de polos do gerador, como demonstrado na equação 21.

$$p = \frac{120 \cdot f}{n} \quad (21)$$

A partir deste dado, consegue-se calcular o passo polar do gerador síncrono α_p , conforme a equação 22. Esse valor representa a distância angular entre dois polos adjacentes do gerador (CHAPMAN, 2013). Os polos da máquina não podem ficar grudados um ao outro, desta forma deve ser calculado o passo polar efetivo do gerador α_{pef} , demonstrado na Figura 31 e calculado na equação 23, para que haja uma distância (o fator de encurtamento do passo polar K_{α_p} pode ser alterado conforme o ângulo desejado entre os polos).

Figura 31 – Passo polar efetivo



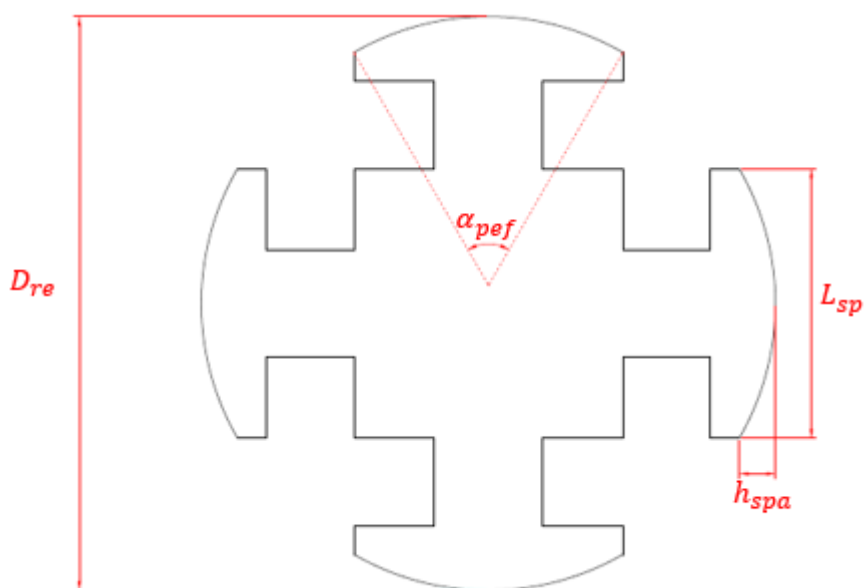
Fonte: Autoria própria

$$\alpha_p = \frac{360}{p} \quad (22)$$

$$\alpha_{pef} = K_{\alpha_p} \cdot \alpha_p \quad (23)$$

Com a obtenção de α_{pef} , juntamente com o valor do diâmetro externo do rotor D_{re} , consegue-se determinar geometricamente os valores da altura do arco da sapata polar e da largura da sapata polar (Figura 32). Assim, h_{spa} e L_{sp} são calculados, respectivamente, pelas equações 24 e 25.

Figura 32 - Parâmetros referentes às equações 24 e 25



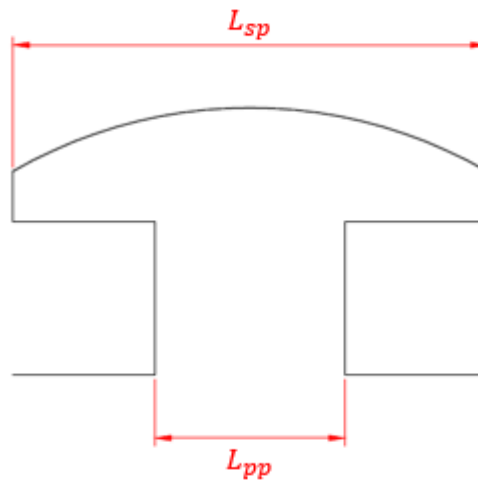
Fonte: Autoria própria

$$h_{spa} = D_{re} \cdot \left(0,5 - 0,5 \cdot \cos \left(\frac{\alpha_{pef}}{2} \right) \right) \quad (24)$$

$$L_{sp} = 2 \cdot \left(\frac{D_{re}}{2} \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{\alpha_{pef}}{2} \right) \quad (25)$$

A largura do pescoço do polo L_{pp} , representada na Figura 33, é determinada proporcionalmente à largura da sapata polar L_{sp} , conforme a equação 26. O valor de K_{pp} define a proporção entre a largura do pescoço do polo e a largura da sapata polar L_{sp} , o que, conseqüentemente, implica na área disponível para cobre.

Figura 33 – Largura da sapata polar e do pescoço do polo

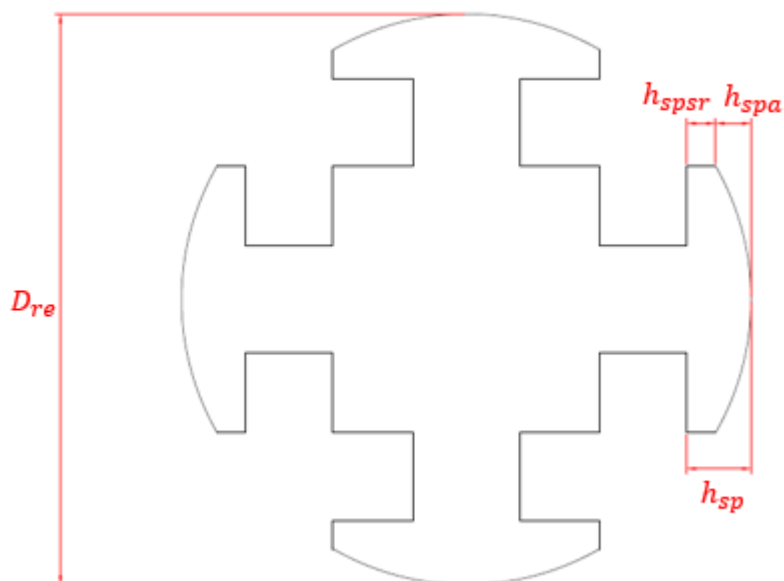


Fonte: Autoria própria

$$L_{pp} = L_{sp} \cdot K_{pp} \quad (26)$$

O valor da altura da seção reta da sapata polar h_{spSR} , calculado pela equação 27, é relacionado com o diâmetro externo do rotor e com o número de polos. O fator de ajuste da altura da seção reta da sapata polar em relação ao diâmetro e ao número de polos K_{hspsr} é alterado conforme os valores obtidos para h_{spSR} sejam construtivamente compatíveis. Com o valor de h_{spSR} , é possível estabelecer pela equação 28, a altura da sapata polar h_{sp} . Estes parâmetros estão demonstrados na Figura 34.

Figura 34 - Parâmetros referentes às equações 27 e 28



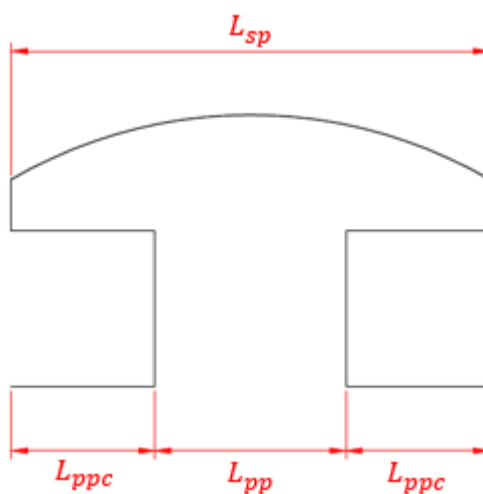
Fonte: Autoria própria

$$h_{spsr} = \frac{D_{re} \cdot K_{hspsr}}{p} \quad (27)$$

$$h_{sp} = h_{spsr} + h_{spa} \quad (28)$$

A largura complementar do pescoço do polo L_{ppc} , está relacionada a largura da sapata polar e largura do pescoço do polo, como representado na Figura 35 e na equação 29.

Figura 35 – Largura complementar do pescoço do polo

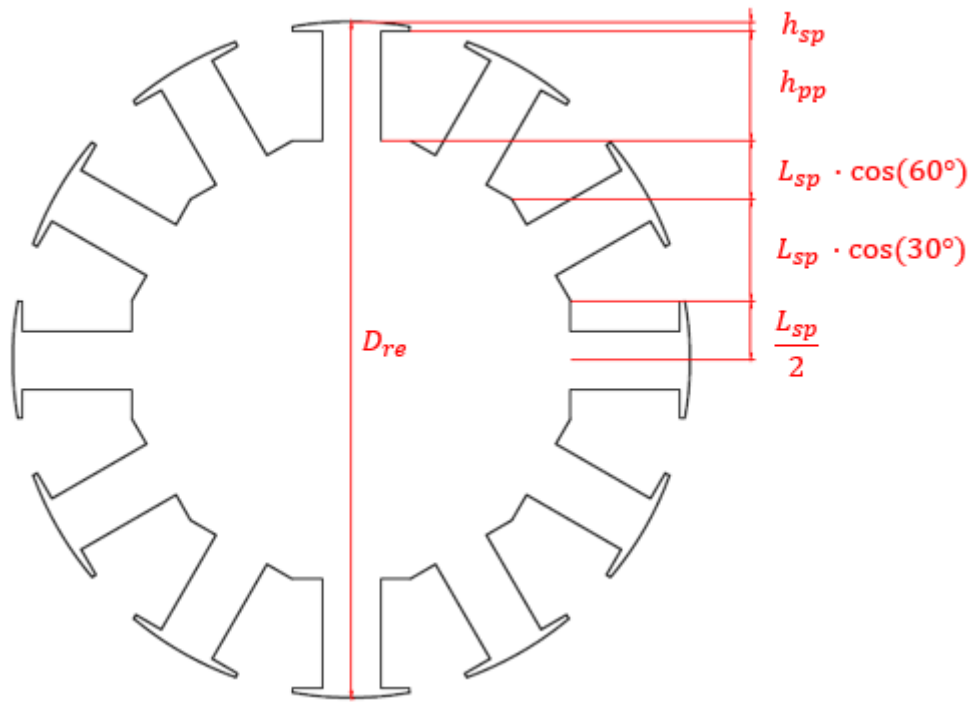


Fonte: Autoria própria

$$L_{ppc} = \left(\frac{L_{sp} - L_{pp}}{2} \right) \quad (29)$$

A altura do pescoço do polo, h_{pp} , para uma máquina de 12 polos é calculada através da equação 30, obtida geometricamente por meio da Figura 36.

Figura 36 - Altura do pescoço do polo



Fonte: Autoria própria

$$h_{pp} = \frac{D_{re}}{2} - L_{sp} \left(\frac{1}{2} + \cos(30^\circ) + \cos(60^\circ) \right) - h_{sp} \quad (30)$$

Definidos os valores da densidade de corrente J_c e corrente de campo máxima I_{cmax} admissível no campo, consegue-se calcular a área do condutor de campo A_{cc} , conforme conforme a equação 31 (BASTOS, 2008).

$$A_{cc} = \left(\frac{I_{cmax}}{J_c} \right) \quad (31)$$

Com o valor da área do condutor, e pré estabelecendo um fator de enchimento do condutor de campo K_{pe} (percentual da área disponível ao enrolamento de campo efetivamente preenchida com cobre), determina-se o número de espiras do enrolamento de campo N_{ce} (o maior número possível de espiras), através da multiplicação entre a altura do pescoço do polo, o fator de enchimento e a largura

complementar do pescoço, dividindo pela área do condutor de campo, conforme a equação 32.

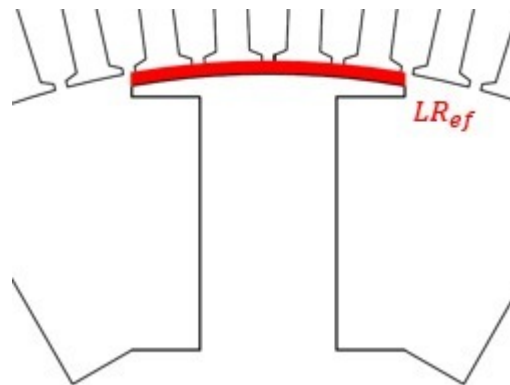
$$N_{ce} = \frac{h_{pp} \cdot L_{ppc} \cdot K_{pe}}{A_{cc}} \quad (32)$$

Efetuada a multiplicação entre N_{ce} e a corrente de campo a vazio I_{cvz} , é possível obter o valor da força magnetomotriz por polo fmm_c , como representado na equação 33 (BASTOS, 2008).

$$fmm_c = N_{ce} \cdot I_{cvz} \quad (33)$$

A largura da relutância eficaz no entreferro LR_{ef} , representada na Figura 37, é calculada através da equação 34. O fator K_{ef} foi utilizado para realizar um refinamento no cálculo, caso se observe que o fluxo atravessa o entreferro por uma área maior àquela ocupada pela sapata polar, esse fator pode ser ajustado.

Figura 37 - Largura da relutância eficaz no entreferro



Fonte: Autoria própria

$$LR_{ef} = \frac{K_{ef} \cdot D_{re} \cdot \alpha_{pef}}{2} \quad (34)$$

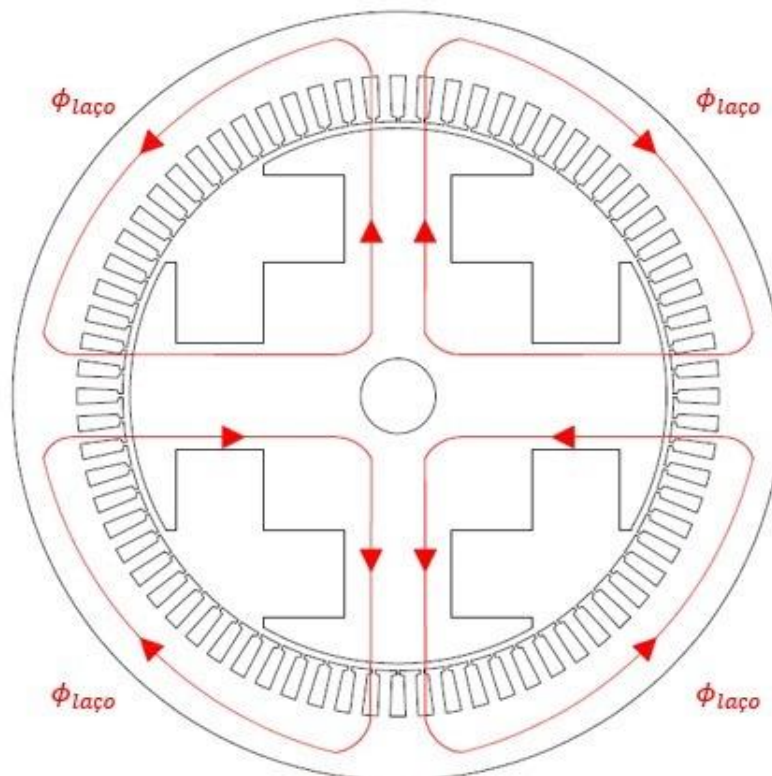
Com valores definidos para o comprimento axial C_{ax} e para o comprimento do entreferro L_{ef} , pode-se calcular por meio da equação 35 a relutância do entreferro R_{ef} .

$$R_{ef} = \frac{L_{ef}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot C_{ax} \cdot LR_{ef}} \quad (35)$$

Segundo Bastos (2008), havendo uma força magnetomotriz fmm_c , um fluxo ϕ_{laco} , apresentado na Figura 38, é produzido. Similarmente à lei de Ohm, a qual associa tensão e corrente em um circuito elétrico, a relação entre fluxo e força magnetomotriz é dada pela equação 36. O número 2 no denominador desta equação

é explicado devido a LR_{ef} ocupar todo o polo e como o fluxo é em apenas um laço, este valor deve ser dividido pela metade.

Figura 38 - Fluxo produzido



Fonte: Autoria própria

$$\phi_{laço} = \frac{fmm_c}{2 \cdot R_{ef}} \quad (36)$$

Para obter o fluxo total no pescoço do pólo ϕ_{pp} basta dobrar o valor do fluxo em um laço $\phi_{laço}$, visto que ao atravessar o entreferro e chegar ao estator este fluxo total que passa pelo pescoço do pólo divide-se pela metade, conforme mostra a Figura 38.

Conhecendo o valor do fluxo ϕ_{pp} pode-se calcular o valor da densidade de fluxo magnético B_{pp} no pescoço do pólo, conforme a equação 37.

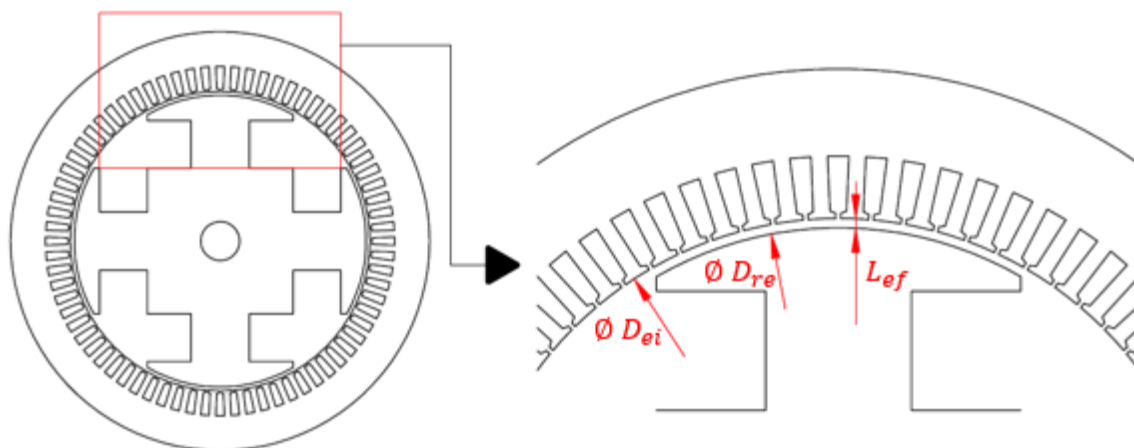
$$B_{pp} = \frac{\phi_{pp}}{L_{pp} \cdot C_{ax}} \quad (37)$$

Nesta etapa do projeto é necessário avaliar se o valor da densidade de fluxo magnético está apropriado. Caso não esteja, deve-se ajustar os fatores para refinar o projeto. A realização do desenho do projeto do rotor também auxilia na verificação de inconsistências. Caso todos os parâmetros estejam de acordo, pode-se dar início ao projeto do estator.

4.1.2 Estator

Inicialmente, é necessário determinar o diâmetro interno do estator D_{ei} (Figura 39), de acordo com a equação 38.

Figura 39 – Diâmetro interno do estator

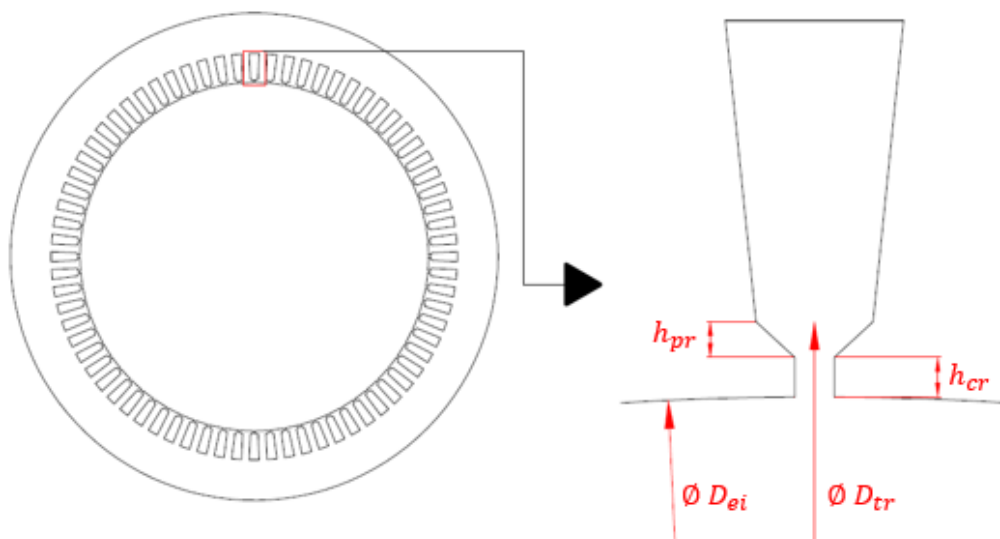


Fonte: Autoria própria

$$D_{ei} = D_{re} + (2 \cdot L_{ef}) \quad (38)$$

Com essa informação, aliada a valores pré-definidos para a altura do pescoço e do colarinho da ranhura (h_{pr} e h_{cr} respectivamente), é possível determinar o valor do diâmetro do topo da ranhura D_{tr} , representado na Figura 40, conforme a equação 39.

Figura 40 - Paramêtros referentes à equação 39

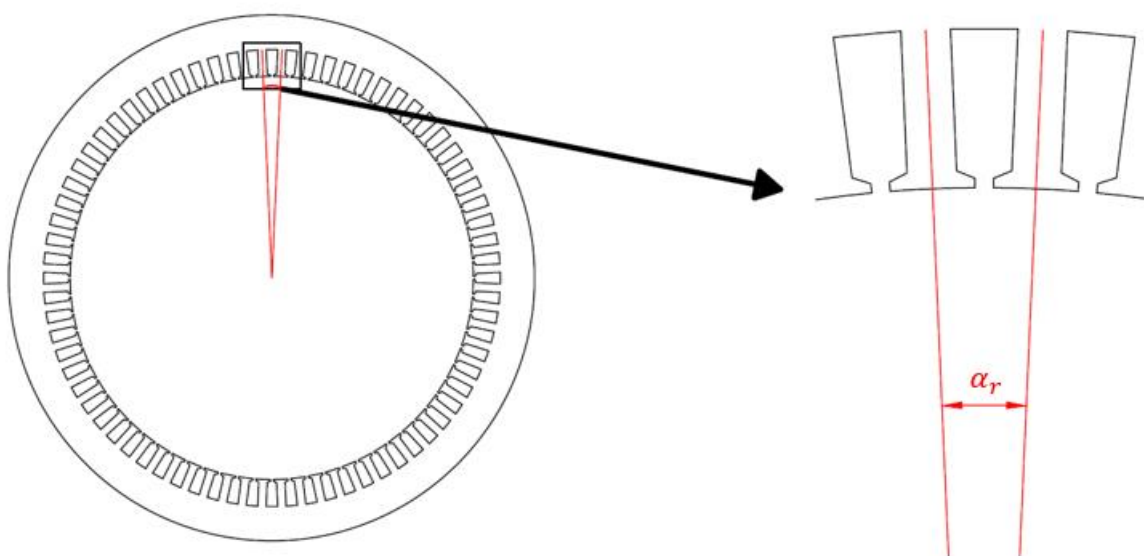


Fonte: Autoria própria

$$D_{tr} = D_{ei} + 2 \cdot (h_{pr} + h_{cr}) \quad (39)$$

O cálculo do passo da ranhura α_r , demonstrado na Figura 41, é realizado através da equação 40. Para se obter este dado, é necessário definir um valor para o número de ranhuras N_r do estator.

Figura 41 – Passo da ranhura



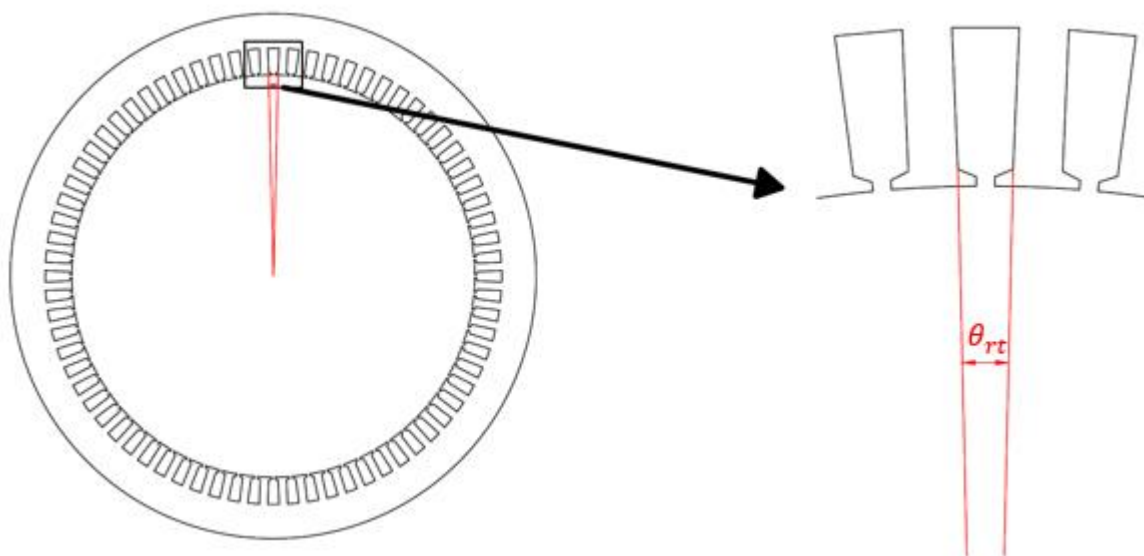
Fonte: Autoria própria

$$\alpha_r = \frac{360}{N_r} \quad (40)$$

Definindo um valor para o fator K_{dr} , fator entre a largura do dente e a largura do topo da ranhura, pode-se determinar o valor do ângulo ocupado pela ranhura no topo θ_{rt} , demonstrado na Figura 42, conforme a equação 41.

$$\theta_{rt} = \frac{\alpha_r}{1 + K_{dr}} \quad (41)$$

Figura 42 – Ângulo ocupado pela ranhura no topo



Fonte: Autoria própria

Sendo assim, a largura do topo da ranhura L_{rt} , representada na Figura 43, pode ser calculada de acordo com a equação 42.

Figura 43 – Largura do topo da ranhura

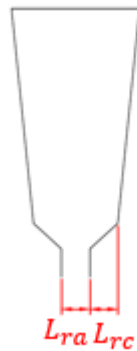


Fonte: Autoria própria

$$L_{rt} = D_{tr} \cdot \sin\left(\frac{\theta_{rt}}{2}\right) \quad (42)$$

Estabelecendo um valor para a largura da abertura da ranhura L_{ra} , é possível determinar a largura do colarinho da ranhura L_{rc} através da equação 43. A largura da abertura e a largura do colarinho da ranhura estão representados na Figura 44.

Figura 44 – Largura de abertura e largura do colarinho da ranhura



Fonte: Autoria própria

$$L_{rc} = \frac{L_{rt} - L_{ra}}{2} \quad (43)$$

Trigonometricamente, o ângulo do colarinho θ_{rc} (Figura 45) é definido de acordo com a equação 44.

Figura 45 – Ângulo do colarinho

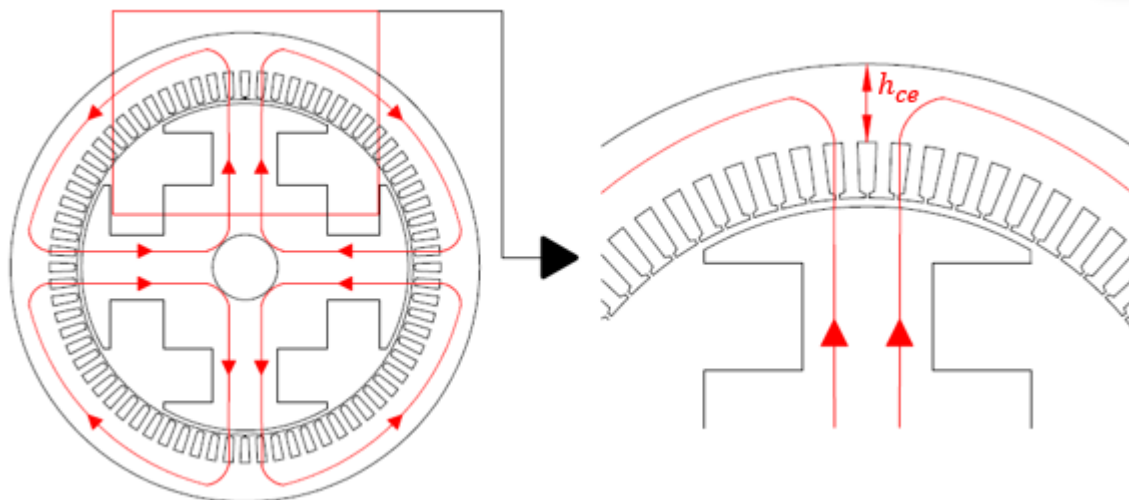


Fonte: Autoria própria

$$\theta_{rc} = \tan^{-1} \left(\frac{h_{cr}}{L_{rc}} \right) \quad (44)$$

A altura da coroa do estator h_{ce} , demonstrada na Figura 46, é determinada através da equação 45, com a utilização de um fator K_{pc} , que relaciona a largura do pescoço do polo e a largura da coroa do estator. O fluxo que passa pela coroa do estator é metade do fluxo do polo, portanto o valor de K_{pc} deve ser superior a 50% para evitar que a coroa fique com uma densidade de fluxo superior à do pescoço do polo.

Figura 46 – Altura da coroa do estator

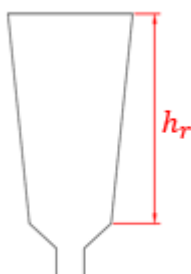


Fonte: Autoria própria

$$h_{ce} = K_{pc} \cdot L_{pp} \quad (45)$$

Para o cálculo da altura da ranhura h_r (Figura 47), é possível estipular um fator K_{cr} , que associa a altura da coroa do estator e a altura da ranhura. Com isso, na equação 46 tem-se:

Figura 47 – Altura da ranhura

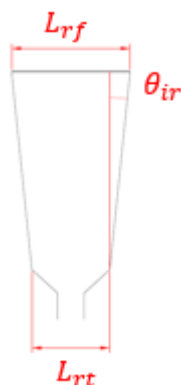


Fonte: Autoria própria

$$h_r = K_{cr} \cdot h_{ce} \quad (46)$$

O ângulo de inclinação da ranhura θ_{ir} é a metade do passo da ranhura α_r , desta forma, os dentes são paralelos. Com isso, a largura da ranhura no fundo L_{rf} pode ser calculada através da equação 47. As representações do ângulo de inclinação da ranhura e da largura da ranhura no fundo encontram-se na Figura 48.

Figura 48 - Parâmetros referentes à equação 47

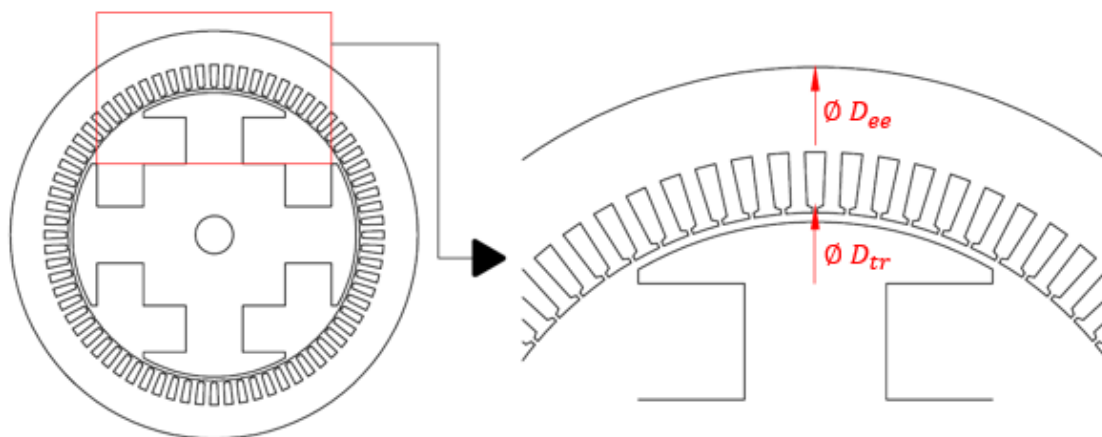


Fonte: Autoria própria

$$L_{rf} = L_{rt} + 2 \cdot h_r \cdot \tan(\theta_{ir}) \quad (47)$$

Tendo conhecimento dos valores do diâmetro do topo da ranhura, da altura da coroa e da altura da ranhura, é possível determinar o diâmetro externo do estator D_{ee} (Figura 49) por meio da equação 48.

Figura 49 – Diâmetro externo do estator



Fonte: Autoria própria

$$D_{ee} = D_{tr} + (2 \cdot h_r) + (2 \cdot h_{ce}) \quad (48)$$

O comportamento não senoidal da densidade de fluxo em máquinas reais e a grande presença de componentes harmônicas justifica o uso de enrolamentos de passo encurtado neste projeto. Normalmente, quando maior o grau de harmônicas registrado, menor será a tensão de fase obtida na saída do sistema. A partir de certo

ponto (acima da nona harmônica), tais efeitos podem ser desprezados (CHAPMAN, 2013).

Escolhendo adequadamente um valor para o encurtamento do passo da bobina da armadura, consegue-se suprimir quase todas as componentes harmônicas na saída do gerador (CHAPMAN, 2013).

Definindo um valor para o encurtamento do passo da bobina de armadura EA_{pb} , consegue-se determinar o passo da bobina de armadura α_{ab} conforme a equação 49. Com α_{ab} , é possível determinar o fator de encurtamento de passo da bobina da armadura K_{aeb} de acordo com a equação 50.

$$\alpha_{ab} = \alpha_p \cdot EA_{pb} \cdot \left(\frac{p}{2}\right) \quad (49)$$

$$K_{aeb} = \text{sen} \left(\frac{\alpha_{ab}}{2} \right) \quad (50)$$

Um gerador síncrono deve possuir um conjunto de bobinas por polo. Tais conjuntos podem ser ligados em série ou em paralelo, a depender da característica construtiva da máquina. Desta forma, o número de caminhos em série N_{cs} pode ser calculado de acordo com a equação 51, utilizando o número de polos e o número de caminhos em paralelo N_{cp} .

$$N_{cs} = \frac{p}{N_{cp}} \quad (51)$$

Segundo Chapman (2013), número de bobinas por polo e por fase da armadura N_{bpf} é determinado a partir do número de camadas da bobinagem N_{rc} , número de ranhuras e número de polos, como mostra a equação 52. Com o valor de N_{bpf} é possível calcular o fator de distribuição da bobina de armadura KA_{db} , conforme a equação 53.

$$N_{bpf} = \frac{N_r \cdot N_{rc}}{3 \cdot 2 \cdot p} \quad (52)$$

$$KA_{db} = \frac{\text{sen} \left(\frac{N_{bpf} \cdot \alpha_r}{2} \right)}{N_{bpf} \cdot \text{sen} \left(\frac{\alpha_r}{2} \right)} \quad (53)$$

Nem todo o fluxo produzido pelos polos é concatenado pelas bobinas da armadura, parte deste fluxo se dispersa. Definindo, através de simulação, um valor para o percentual do fluxo do campo enlaçado pelos enrolamentos de armadura K_{\emptyset} , consegue-se obter o número total de espiras da armadura por fase N_{at} por meio da

equação 54. Com este dado, é possível determinar o número de espiras por bobina N_{ab} conforme a equação 55.

$$N_{at} = \frac{\left(\frac{V_T}{\sqrt{3}}\right)}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot K_{\phi} \cdot K A_{ab} \cdot K_{aeb} \cdot f \cdot \phi_{pp}} \quad (54)$$

$$N_{ab} = \frac{N_{at}}{N_{bpf} \cdot N_{cs}} \quad (55)$$

A área da ranhura S_r é determinada através da equação 56, utilizando a altura da ranhura, a largura da ranhura no fundo e largura do topo da ranhura.

$$S_r = \left(\frac{L_{rt} + L_{rf}}{2}\right) \cdot h_r \quad (56)$$

Estabelecendo um valor para o fator de enchimento da ranhura K_{re} , pode-se calcular a área dos condutores do enrolamento da armadura S_{ac} através da equação 57.

$$S_{ac} = \frac{K_{re} \cdot S_r}{N_{ab}} \quad (57)$$

Definindo a densidade de corrente da armadura J_a pode-se calcular, através da equação 58, a corrente admissível nos condutores de armadura I_a . Com essa corrente pode-se estimar a potência elétrica de saída do gerador síncrono P_e por meio da equação 59. Neste caso, por se tratar de um projeto a vazio, estão sendo desconsideradas as perdas e a queda de tensão. O valor da potência é apenas uma referência para o projeto.

$$I_a = J_a \cdot S_{ac} \quad (58)$$

$$P_e = 3 \cdot I_a \cdot \frac{V_T}{\sqrt{3}} \cdot FP \quad (59)$$

Caso o valor de P_e não esteja de acordo com desejado, deve-se ajustar os fatores do projeto. Considerando que a potência, a corrente, a área dos condutores, a área da ranhura e os fatores K_{cr} e K_{pc} estão entrelaçados, é possível alterar a potência sem alterar o projeto do rotor da máquina. Caso não seja possível por meio destes parâmetros, é necessário alterar as dimensões principais da máquina como o D_{re} e C_{ax} , porém isto implica na mudança do projeto do rotor.

4.2 PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES EM CARGA

Em carga, a tensão nos terminais do gerador é diferente da tensão interna gerada, pois existem quedas de tensão devido às indutâncias das bobinas, à resistência e à reação de armadura. Portanto, neste item deve-se estimar as quedas de tensão para a finalização do projeto.

Os valores das indutâncias de eixo direto e de quadratura são complexos para serem obtidos por meio de equações analíticas através das características construtivas da máquina, pois os modelos desenvolvidos são adequados apenas a geometrias específicas. Sendo assim, é possível obter os valores das indutâncias de eixo direto e de quadratura (L_d e L_q respectivamente) através de uma simulação, observando os valores máximo e mínimo no gráfico da indutância própria. A partir destes valores, obtêm-se L_d e L_q através das equações 60 e 61 respectivamente. Através das fórmulas 62 e 63 são calculadas as reatâncias X_d e X_q .

$$L_d = \frac{L_{máx}}{2} \quad (60)$$

$$L_q = \frac{L_{mín}}{2} \quad (61)$$

$$X_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_d \quad (62)$$

$$X_q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_q \quad (63)$$

sendo,

- L_{max} a indutância máxima simulada em mH;
- L_{min} a indutância mínima simulada em mH;
- X_d a reatância do eixo direto em Ω ;
- X_q a reatância do eixo de quadratura em Ω .

Para o cálculo das resistências de armadura e de campo, inicialmente deve-se calcular o comprimento do arco formado pelo passo da bobina de armadura, a partir da equação 64.

$$D\alpha_{Ac_b} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{tr}}{2} + \frac{h_r}{2} \right) \cdot \frac{\alpha_{ab}}{2 \cdot \pi} \quad (64)$$

sendo,

- $D\alpha_{Ac_b}$ o comprimento do arco formado pelo passo da bobina de armadura em mm.

A partir do valor de $D\alpha_{Acb}$ consegue-se determinar o valor do comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura pela equação 65. Com este comprimento de arco, pode-se estipular o comprimento médio de uma espira da armadura, através da equação 66. Já o comprimento médio de uma espira do campo pode ser calculado com a equação 67, e depende de parâmetros calculados no projeto do rotor.

$$A_{Acb} = \pi \cdot \left(\frac{D\alpha_{Acb}}{2} \right) \quad (65)$$

$$C_{A1e} = 2 \cdot C_{ax} + 2 \cdot A_{Acb} \quad (66)$$

$$C_{C1e} = 2 \cdot (C_{ax} + L_{ppc}) + 2 \cdot (L_{pp} + L_{ppc}) \quad (67)$$

sendo,

- A_{Acb} o comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura em mm;
- C_{A1e} o comprimento de uma espira da Armadura (médio) em mm;
- C_{C1e} o Comprimento de uma espira do Campo (médio) em mm.

Por fim, a partir da área do condutor de campo e da área dos condutores do enrolamento da armadura, deve-se pesquisar em um catálogo de cabos as resistências por quilômetro dos condutores da armadura e do campo R_{Akm_fio} e R_{Ckm_fio} . Com essas informações, juntamente com os valores de C_{C1e} e C_{A1e} , pode-se determinar a resistência de uma fase do enrolamento de armadura e a resistência do enrolamento de campo através das equações 68 e 69.

$$R_A = C_{A1e} \cdot N_{ab} \cdot N_{bpf} \cdot N_{cs} \cdot R_{Akm_fio} \quad (68)$$

$$R_C = C_{C1e} \cdot N_{ce} \cdot R_{Ckm_fio} \quad (69)$$

sendo,

- R_A a resistência de uma fase do enrolamento de armadura em Ω ;
- R_C a resistência do enrolamento de campo em Ω ;
- R_{Akm_fio} a resistência dos condutores do enrolamento da armadura por quilômetro, em Ω/km ;
- R_{Ckm_fio} a resistência do condutor de campo por quilômetro, em Ω/km .

Em seguida, é necessário calcular a tensão interna induzida em carga E_{A_n} . Para isso, primeiramente calcula-se o fluxo no pescoço do polo Φ_{pp_n} com corrente de campo nominal I_{cn} , de acordo com a equação 70.

$$\Phi_{pp-n} = \frac{N_{ce} \cdot I_{cn}}{R_{ef}} \quad (70)$$

Com o valor do fluxo no pescoço do polo com corrente de campo nominal pode-se obter a tensão interna induzida em carga E_{A-n} (equação 71) relacionando este fluxo com o número de bobinas por polo e por fase da armadura, o número de caminhos em série, o número de espiras por bobina, a frequência e os fatores pertinentes para o cálculo.

$$E_{A-n} = \sqrt{2} \cdot N_{bpf} \cdot N_{cs} \cdot N_{ab} \cdot f \cdot K_{\emptyset} \cdot K_{aeb} \cdot K A_{db} \cdot \Phi_{pp-n} \quad (71)$$

Após a obtenção de E_{A-n} , é necessário obter a tensão terminal em carga. Conforme explicado no item 3.2.2.2 e como o gerador em questão possui carga indutiva, deve-se realizar a análise do diagrama fasorial presente na Figura 24. Primeiramente, deve-se calcular Φ e δ conforme as equações 17 e 18. Com isso, é possível calcular I_d , I_q , V_d , V_q por meio das equações 13, 14, 15 e 16 respectivamente. Por fim, a tensão terminal fase-neutro total V_{ϕ} é calculada através da equação 19.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO

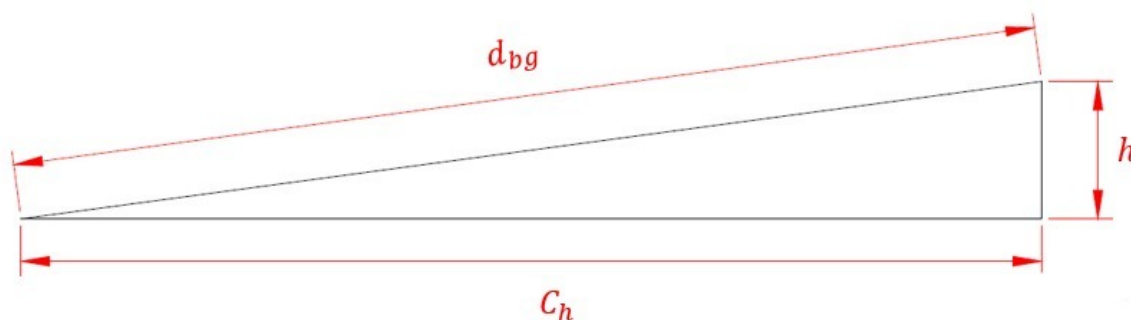
No item 2.6 foram demonstradas as equações necessárias para o cálculo da vazão da queda d'água em questão, da velocidade de escoamento e da potência de entrada do gerador síncrono. Com a utilização de tubos de PVC com diâmetro d de 0,1 metros, pode-se determinar a área da seção molhada A com a utilização da equação 72 e perímetro molhado p_m por meio da equação 73.

$$A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 78,54 \text{ cm}^2 \quad (72)$$

$$p_m = \pi \cdot d = 31,42 \text{ cm} \quad (73)$$

A partir de medições realizadas na fazenda Putunã, foram obtidos os valores da altura da queda d'água h (12m) e a distância entre a barragem e o gerador d_{bg} (90m). Com a utilização do teorema de Pitágoras, obteve-se a componente horizontal C_h (89,2m) demonstrada na Figura 50. Com os valores de h e C_h , é possível obter a declividade S , conforme a equação 74.

Figura 50 - Medições na queda d'água



Fonte: Autoria própria

$$S = \frac{h}{C_h} = \frac{12}{89,2} = 0,13 \quad (74)$$

Com o auxílio da Tabela 1, pode-se obter o coeficiente de rugosidade do PVC, material do tubo utilizado ($n = 0,009$). Com este valor, aliado aos valores de A , p_m e S , é possível obter a velocidade de escoamento e a vazão da queda d'água.

Devido ao tamanho do gerador e da queda d'água em questão, a escolha da turbina não pode ser feita como explicado no item 2.5. Foi realizada uma pesquisa em

lojas da área e para as especificações deste projeto são encontrados modelos de turbinas Pelton de pequeno porte, demonstrada na Figura 51. Portanto, apesar de numericamente não se encaixar na Figura 6, este foi o tipo de turbina escolhida.

Figura 51 - Turbina Pelton de pequeno porte



Fonte: Mercado Livre (2019)

De acordo com Macintyre (1983), o rendimento de turbinas Pelton de pequeno porte chega a 0,85 – valor considerado para N_t no cálculo da potência. Já o rendimento N_h , da tubulação, foi considerado com valor de 0,95, devido a possíveis perdas causadas pelo material durante o processo.

Com isso, é possível determinar o valor da potência de entrada do gerador (P). Para a realização das medições, foram utilizados 4 tubos de PVC. Desta forma, a potência obtida na equação 3 deverá ser quadruplicada. Os valores de V , Q e P estão demonstrados na Tabela 3.

O valor de frequência foi determinado de acordo com o padrão adotado no Brasil e a tensão terminal foi escolhida para não ser necessária a utilização de um transformador. O gerador síncrono foi projetado para atender cargas até o fator de potência estipulado. A rotação imposta neste projeto foi de 600 rpm, sendo assim, o gerador em questão é de 12 polos.

Tabela 3 - Especificações do projeto

Dado	Valor	Unidade
Vazão (Q)	0,02737	m ³ /s
Velocidade (V)	3,4844	m/s
Potência nominal (P)	10402,08	W
Frequência nominal (f)	60	Hz
Rotação nominal (n)	600	rpm
Tensão terminal (V_T)	380	V
Fator de potência (FP)	0,8	-

Fonte: Autoria própria

5.2 PROJETO

A fim de atender às especificações do projeto demonstradas na Tabela 3, aplicando a metodologia mostrada no Capítulo 4 foram realizados 2 projetos, buscando chegar o mais próximo de tais características. O primeiro projeto apresentou algumas falhas e o segundo foi feito visando solucionar tais problemas. Nos próximos itens serão demonstrados os parâmetros impostos em cada projeto e os resultados adquiridos.

5.2.1 Projeto 1

No Capítulo 4 foram mostradas as fórmulas necessárias para a realização do projeto de um gerador síncrono, com a utilização de diversos fatores. Estes fatores, mostrados na Tabela 4, têm como principal função tornar a máquina projetada exequível, além de torna-la compatível com os parâmetros elétricos (especificações do projeto).

Tabela 4 - Fatores utilizados no projeto 1

Fator	Valor
Fator de encurtamento do passo polar (K_{α_p})	2/3
Fator de ajuste do pescoço do polo em relação à sapata polar (K_{pp})	0,5
Fator de ajuste da altura da seção reta da sapata polar em relação ao diâmetro e ao número de polos (K_{hspsr})	0,168
Fator de enchimento do condutor de campo (K_{pe})	0,8
Fator da relutância efetiva do entreferro (K_{ef})	1
Fator entre a largura do dente e a ranhura no topo (K_{dr})	0,9
Fator entre a largura do pescoço do polo e a largura da coroa do estator (K_{pc})	1,2
Fator entre a altura da coroa do estator e a altura da ranhura (K_{cr})	0,95
Percentual do fluxo do campo enlaçado pelos enrolamentos de armadura (K_{\emptyset})	0,938
Fator de enchimento da ranhura (K_{re})	0,5

Fonte: Autoria própria

Além dos fatores mostrados na Tabela 4, foram impostos diversos parâmetros construtivos e elétricos. Assim como os fatores, os parâmetros construtivos têm como principal finalidade tornar as dimensões da máquina plausíveis. Já os parâmetros elétricos são valores usualmente utilizados em máquinas elétricas. Por exemplo, o valor de EA_{pb} escolhido foi de 5/6, visando diminuir os efeitos da harmônica de quinta ordem (BOLDEA, 2015).

Tabela 5 - Parâmetros impostos no projeto 1

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro externo do rotor (D_{re})	242	mm
Densidade de corrente do campo (J_c)	5	A/mm ²
Corrente de campo (I_{cvz})	2,5	A
Corrente de campo máxima (I_{cmax})	5	A
Comprimento axial (C_{ax})	137	mm
Comprimento do entreferro (L_{ef})	1,5	mm
Altura do pescoço da ranhura (h_{pr})	1	mm
Altura do colarinho da ranhura (h_{cr})	0,95	mm
Número de ranhuras (N_r)	72	-
Largura da abertura da ranhura (L_{ra})	1,2	mm
Encurtamento do passo da bobina de armadura (EA_{pb})	5/6	-
Número de caminhos em paralelo (N_{cp})	1	-
Número de camadas da ranhura (N_{rc})	1	-
Densidade de corrente da armadura (J_a)	5	A/mm ²

Fonte: Autoria própria

De acordo com as equações demonstradas no item 4.1, juntamente com os dados da Tabela 4 e da Tabela 5, foram obtidos os resultados do projeto do rotor e do estator, mostrados na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6 - Resultados do projeto do rotor no projeto 1

Resultado	Valor	Unidade
Número de polos (p)	12	Polos
Passo polar (α_p)	30	°
Passo efetivo do polo (α_{pef})	20	°
Altura do arco da sapata polar (h_{spa})	1,84	mm
Largura da sapata polar (L_{sp})	42,02	mm
Largura do pescoço do polo (L_{pp})	21,01	mm
Altura da seção reta da sapata polar (h_{spsr})	3,39	mm
Altura da sapata polar (h_{sp})	5,23	mm
Largura complementar do pescoço do polo (L_{ppc})	10,51	mm
Altura do pescoço do polo (h_{pp})	37,36	mm
Área do condutor de campo (A_{cc})	1	mm ²
Número de espiras do enrolamento de campo (N_{ce})	314	-
Força magnetomotriz por polo do campo (fmm_c)	784,99	A.esp
Largura da relutância eficaz no entreferro (LR_{ef})	42,24	mm
Relutância do entreferro (R_{ef})	206285,21	A.esp/Wb
Fluxo magnético de um laço ($\phi_{laço}$)	0,0019	Wb
Fluxo magnético no pescoço do polo (ϕ_{pp})	0,0038	Wb
Densidade de fluxo magnético no pescoço do polo (B_{pp})	1,32	T

Fonte: Autoria própria

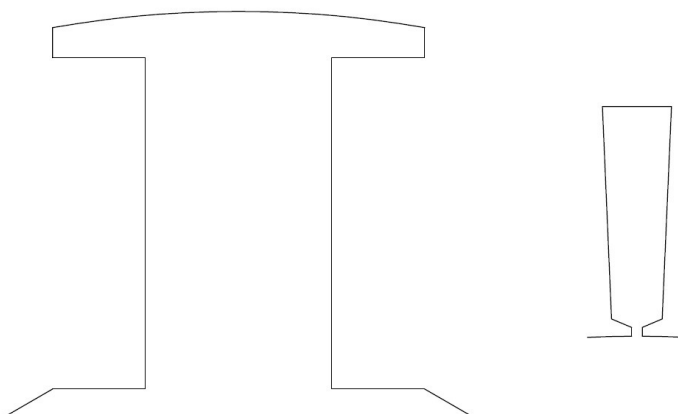
Tabela 7 - Resultados do projeto do estator no projeto 1

Resultado	Valor	Unidade
Diâmetro interno do estator (D_{ei})	245	mm
Diâmetro do topo da ranhura (D_{tr})	248,9	mm
Passo da Ranhura (α_r)	5	°
Ângulo ocupado pela ranhura no topo (θ_{rt})	2,63	°
Largura do topo da ranhura (L_{rt})	5,72	mm
Largura do colarinho da ranhura (L_{rc})	2,26	mm
Ângulo do colarinho (θ_{rc})	22,82	°
Altura da coroa do estator (h_{ce})	25,21	mm
Altura da ranhura (h_r)	23,95	mm
Ângulo de inclinação da ranhura (θ_{ir})	2,5	°
Largura da ranhura no fundo (L_{rf})	7,81	mm
Diâmetro externo do estator (D_{ee})	347,23	mm
Passo da bobina de armadura (α_{ab})	150	°
Fator de encurtamento de passo da bobina da armadura (K_{aeb})	0,9659	-
Número de caminhos em série (N_{cs})	12	-
Número de bobinas por polo e por fase da armadura (N_{bpf})	1	-
Fator de distribuição da bobina de armadura (KA_{ab})	1	-
Número total de espiras da armadura por fase (N_{at})	238,71	-
Número de espiras por bobina (N_{ab})	19,89	-
Área da ranhura (S_r)	161,95	mm ²
Área dos condutores do enrolamento da armadura (S_{ac})	4,07	mm ²
Corrente admissível nos condutores de armadura (I_a)	20,35	A
Potência elétrica de saída (P_e)	10717,22	W

Fonte: Autoria própria

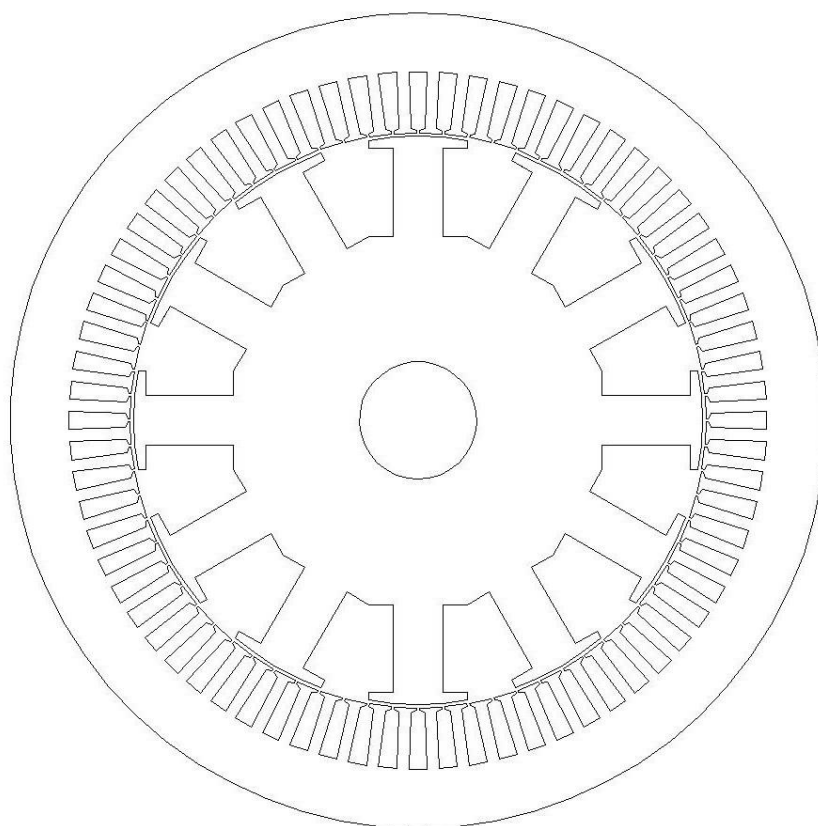
A partir dos dados demonstrados na Tabela 5, na Tabela 6 e na Tabela 7 foram realizados desenhos da máquina projetada. Na Figura 52 está representado um polo e uma ranhura da máquina e o gerador síncrono completo encontra-se na Figura 53.

Figura 52 – Um polo e uma ranhura do gerador do projeto 1



Fonte: Autoria própria

Figura 53 – Gerador completo do projeto 1



Fonte: Autoria própria

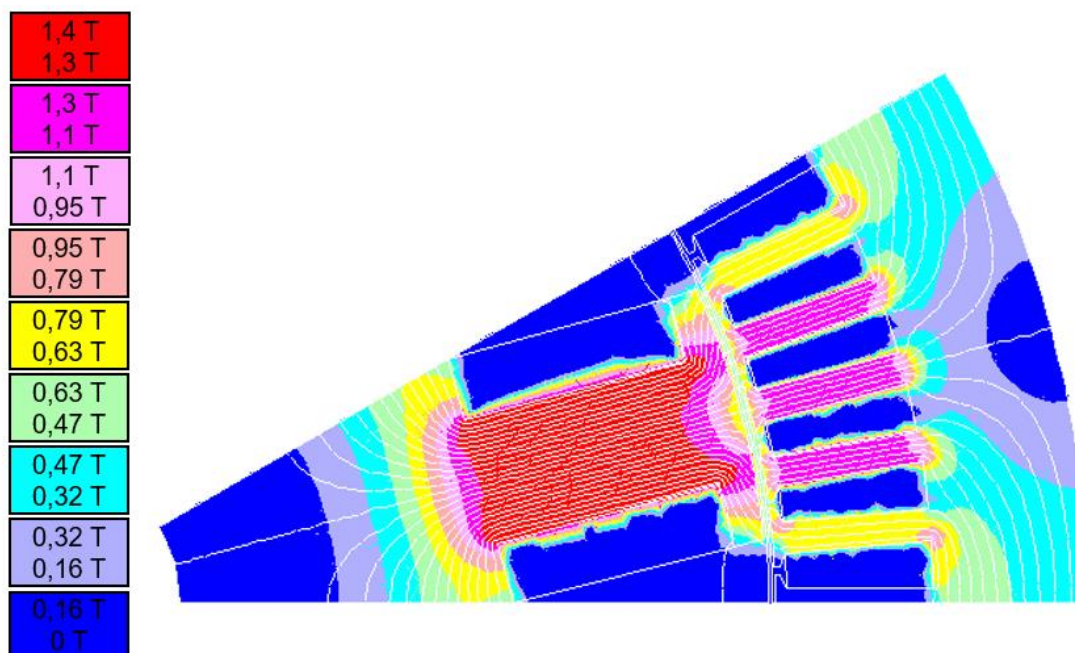
Para a validação dos resultados obtidos no projeto realizado foi utilizado o método dos elementos finitos, através do software EFCAD. Primeiramente, foi realizada a simulação com os resultados obtidos no projeto a vazio para validar os parâmetros físicos da máquina.

Para a realização da simulação, é necessário definir o esquema de bobinagem da máquina. Considerando uma máquina de 72 ranhuras, conforme escolhido para este projeto, o esquema de bobinagem está representado no Apêndice A.

Inserindo as dimensões da máquina, os parâmetros elétricos e o esquema de bobinagem no Software EFCAD, a primeira análise realizada foi a verificação do valor da densidade de fluxo no pescoço do polo B_{PP} . O resultado obtido na planilha de cálculos foi de 1,32 T, conforme observado na Tabela 6.

Na Figura 54, consegue-se observar a variação dos valores de B_{PP} em determinada região da máquina. Observa-se que, no pescoço do polo, o valor de B_{PP} varia entre 1,3 T e 1,4 T.

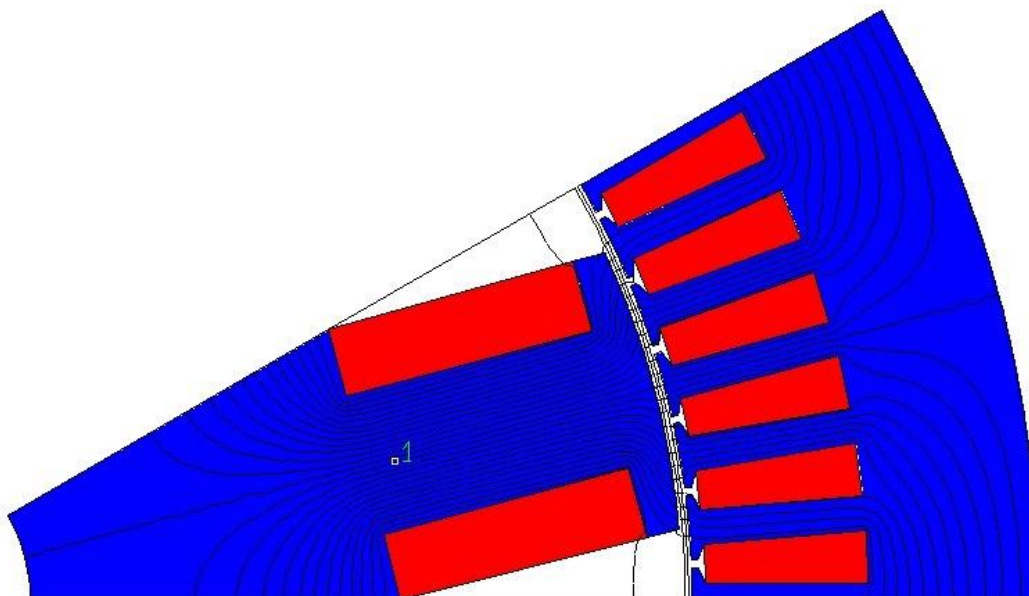
Figura 54 - Valores da densidade de fluxo a vazio no projeto 1



Fonte: Autoria própria

Na Figura 55, pode-se observar o comportamento das linhas de fluxo através de um polo do gerador síncrono projetado. Escolhendo um ponto bem ao centro do pescoço do polo, conforme mostrado na Figura 55, o valor de B_{PP} é de 1,33 T, sendo um valor muito próximo do calculado na planilha.

Figura 55 - Linhas de fluxo em um polo do gerador síncrono a vazio no projeto 1



Fonte: Autoria própria

Neste projeto, ao serem calculados os valores das componentes harmônicas nas tensões de fase, consegue-se notar na Tabela 8 o alto conteúdo harmônico de terceira ordem e seus múltiplos. O índice DHT (distorção harmônica total) encontrado foi de 10%.

Tabela 8 - Componentes harmônicas nas tensões de fase a vazio no projeto 1

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	7,13	85,42
5	2,49	21,76
7	2,83	-41,29
9	2,99	75,55
11	3,84	12,34
13	1,38	128,14
15	0,69	-115,17

Fonte: Autoria própria

Segundo Chapman (2013), os valores nas três fases das componentes harmônicas de terceira ordem (amplitude e fase) são os mesmos. Isso também se aplica para as componentes múltiplas de três. Desta forma, como o gerador em questão é ligado em estrela, ao calcular-se a tensão de linha (realizado por meio de

simulação, efetuando ponto a ponto a subtração de duas tensões de fase), o valor destas harmônicas é nulo, como mostra a Tabela 9. Neste caso, DHT é de 6%

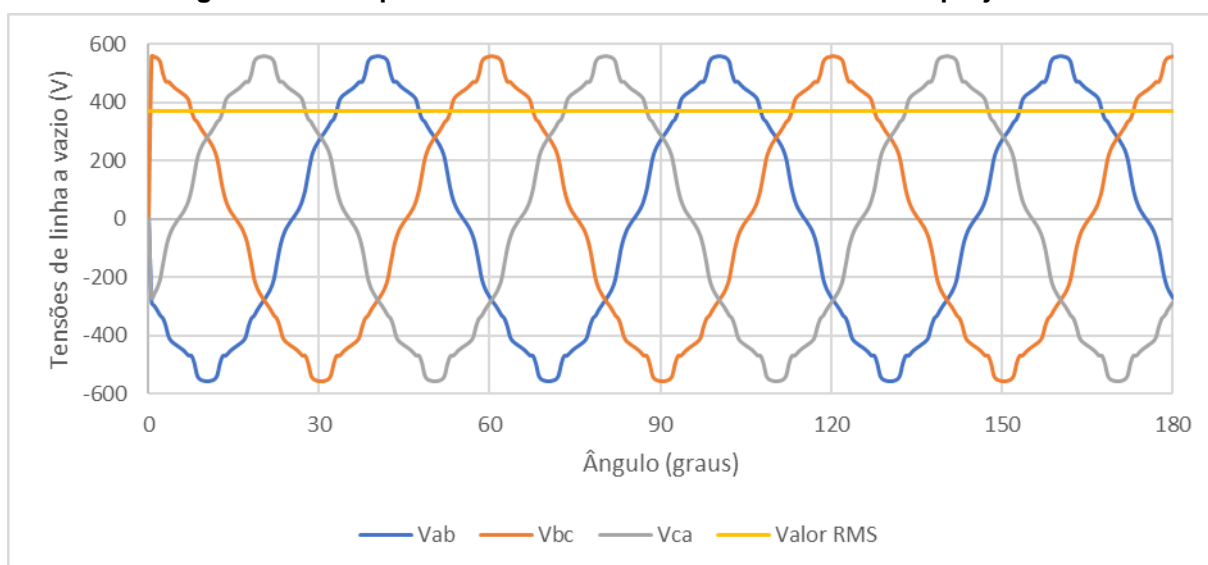
Tabela 9 - Componentes harmônicas nas tensões de linha a vazio no projeto 1

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	0,00	-56,82
5	2,48	-128,26
7	2,83	108,74
9	0,00	48,70
11	3,84	-137,66
13	1,38	-81,85
15	0,00	123,77

Fonte: Autoria própria

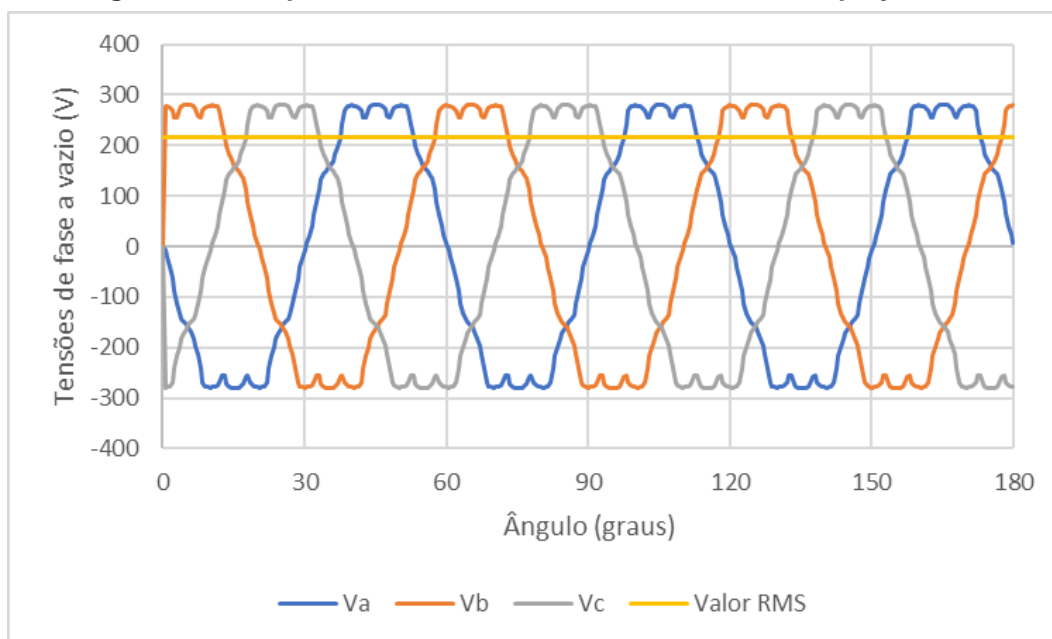
Outro valor importante obtido através da simulação a vazio foi o da tensão de linha eficaz (371,38 V). Comparando este valor com a tensão nominal de entrada, 380 V, há uma diferença percentual de 2,27%, valor satisfatório para o gerador projetado. O valor da tensão de fase obtido foi de 215,05 V. O comportamento das tensões de linha e de fase no projeto 1 estão representadas na Figura 56 e na Figura 57, respectivamente.

Figura 56 – Comportamento das tensões de linha a vazio no projeto 1



Fonte: Autoria própria

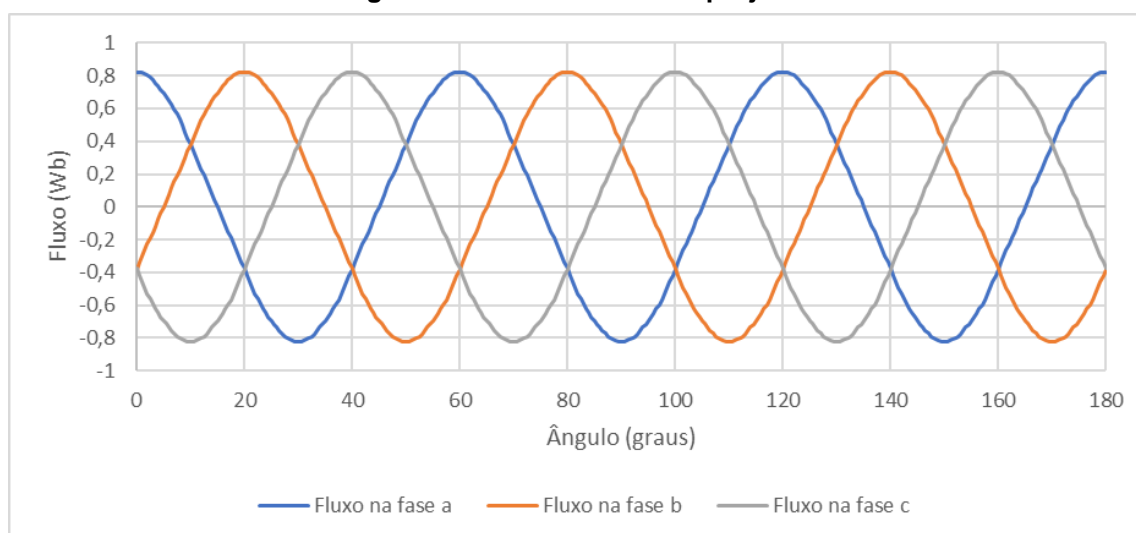
Figura 57 - Comportamento das tensões de fase a vazio no projeto 1



Fonte: Autoria própria

Além das formas de onda das tensões de linha e fase, foi obtida a forma de onda do fluxo do gerador síncrono, conforme mostra a Figura 58. Apesar do comportamento do fluxo parecer senoidal, realizando a derivada destas curvas, as formas de onda resultantes são as tensões de fase, representadas na Figura 57.

Figura 58 – Fluxo a vazio no projeto 1

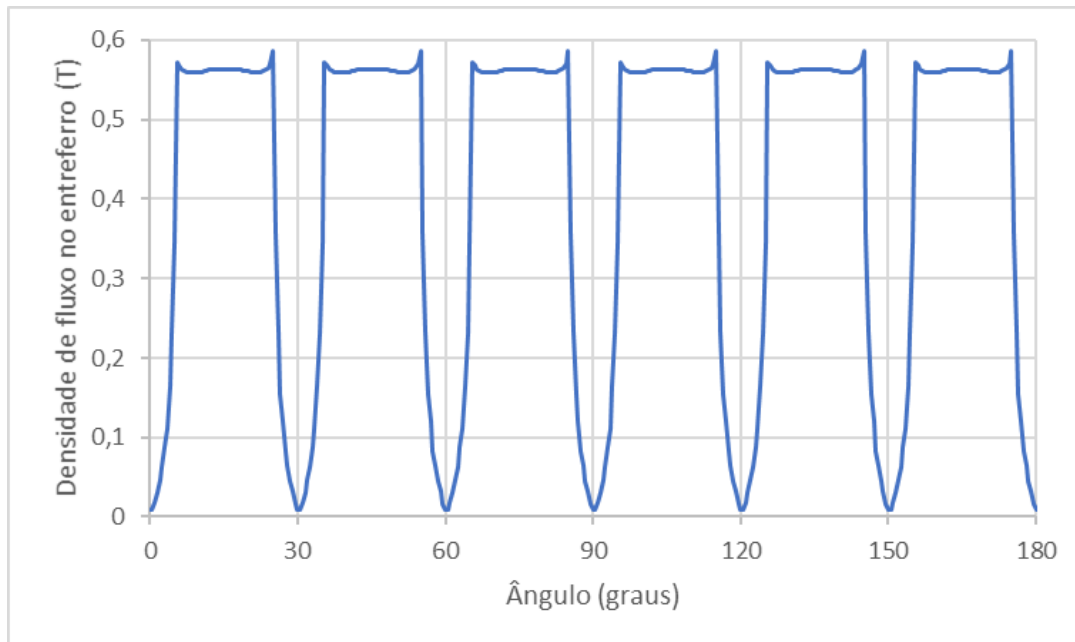


Fonte: Autoria própria

A Figura 59 mostra a densidade de fluxo no entreferro em função da posição. Observa-se que, até 5 graus, a densidade de fluxo é praticamente nula. De 5 a 25 graus (acima do polo) a densidade de fluxo tem valor constante, e de 25 a 30 graus é

praticamente nula novamente. Isso deve-se ao valor escolhido para K_{α_p} (2/3). Como o valor do passo polar é 30 graus, a partir deste ponto este processo se repete.

Figura 59 – Densidade de fluxo no entreferro no projeto 1

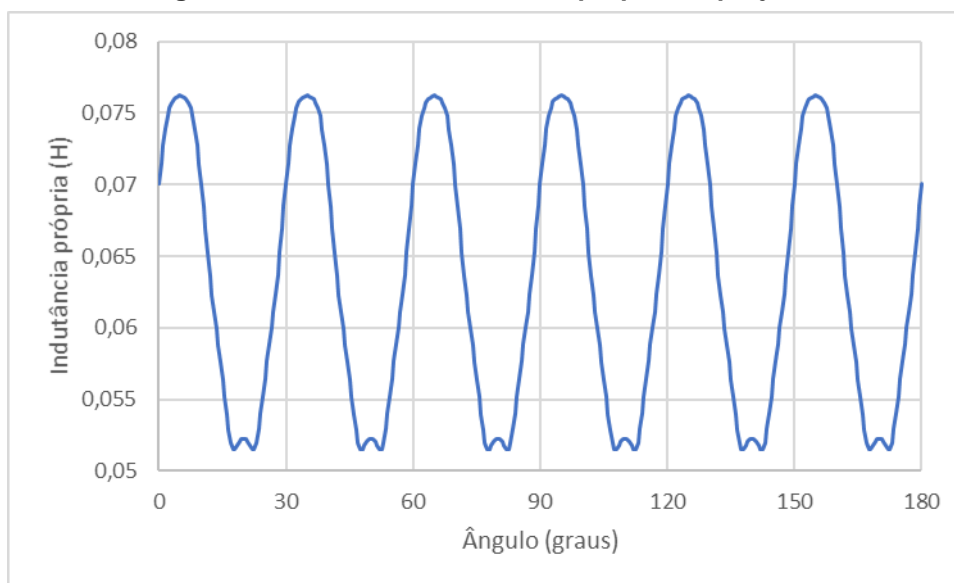


Fonte: Autoria própria

Com a obtenção de resultados satisfatórios no projeto a vazio, foi realizada uma nova simulação a vazio para que fosse possível obter as reatâncias de eixo direto e em quadratura (X_d e X_q). Para isto, foi utilizado como referência nesta simulação o esquema de bobinagem apresentado no apêndice A, ligando em série as fases 1 e 3 do gerador síncrono aplicando uma corrente contínua de valor nominal, sem a injeção de corrente na fase 2 e no rotor (KOLZER, 2017).

Neste procedimento, assim como demonstrado no item 4.2, para a obtenção das indutâncias L_d e L_q é necessário observar os valores mínimo e máximo do gráfico da indutância própria. De acordo com a Figura 60, os valores de L_{min} e L_{max} são, respectivamente, 51,49 mH e 76,22 mH.

Figura 60 – Gráfico da indutância própria do projeto 1



Fonte: Autoria própria

A partir dos valores da área condutores do enrolamento da armadura S_{ac} e da área do condutor de campo A_{cc} , obteve-se através de uma tabela de cabos (Anexo A) a resistência em Ω/km destes condutores.

Para os condutores de campo, foram utilizados cabos AWG17, cuja seção é de $1,04 \text{ mm}^2$ e R_{Ckm_fio} é de $16,34 \Omega/\text{km}$. Já para os condutores de armadura, optou-se por cabos AWG11, de seção $4,17 \text{ mm}^2$ e R_{Akm_fio} de $4,07 \Omega/\text{km}$. Utilizando as seções dos cabos escolhidas, o valor do fator de enchimento do condutor de campo e o fator de enchimento da ranhura foram respectivamente $0,83$ e $0,51$. Levando em consideração que esses fatores foram escolhidos de maneira conservadora, essa pequena diferença encontrada não causou grandes alterações nos resultados obtidos.

Com estes valores, aliados aos dados do projeto a vazio, foram obtidos os resultados para o projeto do gerador síncrono de polos salientes em carga, conforme o procedimento descrito no item 4.2. Tais resultados estão mostrados na Tabela 10. Nesta etapa do projeto, o objetivo principal é que a tensão terminal fase-neutro V_ϕ atinja um valor eficaz próximo a 220 V . Para alcançar este valor, é necessário alterar a corrente de campo nominal I_{cn} . Neste caso, I_{cn} foi alterada até o valor de $5,48 \text{ A}$, ultrapassando o limite máximo estipulado ($I_{cmax} = 5 \text{ A}$).

Tabela 10 - Resultados do projeto 1 em carga

Resultados	Valor	Unidade
Indutância de eixo direto (L_d)	38,10	mH
Indutância de eixo de quadratura (L_q)	25,70	mH
Reatância de eixo direto (X_d)	14,34	Ω
Reatância de eixo de quadratura (X_q)	9,70	Ω
Comprimento do passo da bobina de armadura ($D\alpha_{Acb}$)	357,16	mm
Comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura (A_{Acb})	561,03	mm
Comprimento de uma espira da armadura (médio) (C_{A1e})	1396,06	mm
Resistência de uma fase do enrolamento de armadura (R_A)	1,38	Ω
Comprimento de uma espira do campo (médio) (C_{C1e})	358,05	mm
Resistência do enrolamento de campo (R_C)	1,87	Ω
Fluxo no pescoço do polo com corrente de campo de nominal ($\Phi_{pp,n}$)	0,0083	Wb
Tensão Interna Induzida em carga ($E_{A,n}$)	480,91	V
Ângulo entre a tensão e a corrente (ϕ)	36,87	$^\circ$
Ângulo de carga (δ)	25,06	$^\circ$
Componente da Corrente de armadura orientada com o eixo em quadratura (I_q)	9,58	A
Componente da Corrente de armadura orientada com o eixo direto (I_d)	17,96	A
Componente da Tensão terminal fase-neutro no eixo em quadratura (V_q)	209,64	V
Componente da Tensão terminal fase-neutro no eixo direto (V_d)	68,10	V
Tensão terminal fase-neutro (V_ϕ)	220,42	V

Fonte: Autoria própria

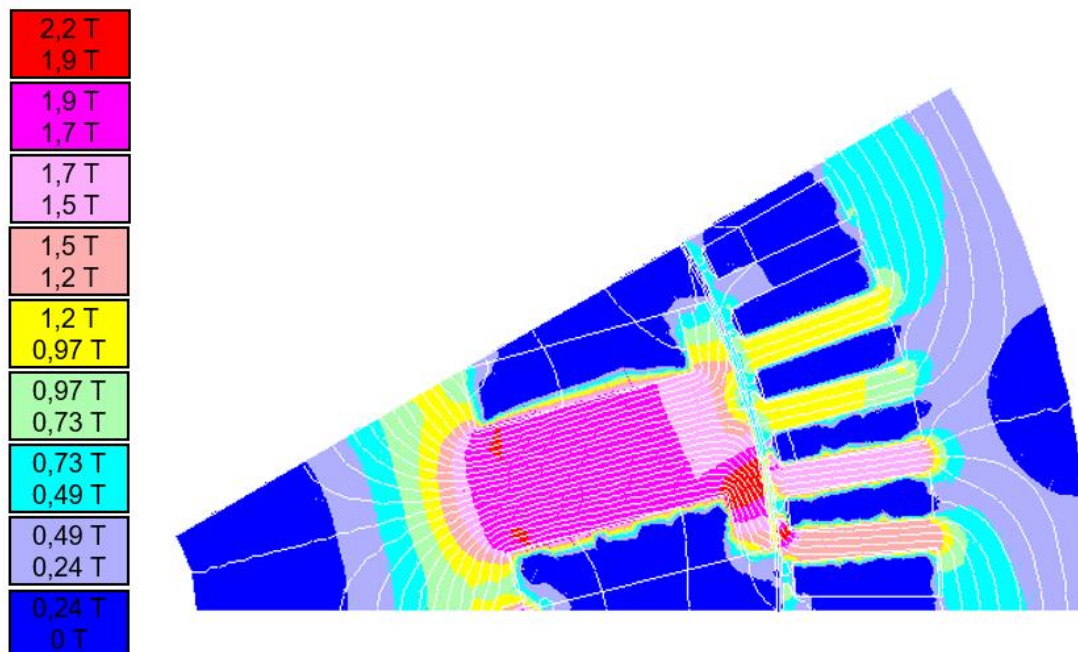
Por fim, para dar início à simulação em carga, é necessário calcular a impedância de carga nominal Z_{carga} , demonstrada na equação 75.

$$Z_{carga} = \frac{V_\phi \angle 0}{I_a \angle -\phi} = 10,8294 \angle 36,8699^\circ \quad (75)$$

A simulação em carga é realizada para validar as características elétricas da máquina. Já no início desta simulação, consegue-se notar na Figura 61 os efeitos da

aplicação de um valor elevado de I_{cn} . O valor da densidade de fluxo em todo o pescoço do polo apresentou um valor acima do esperado, chegando próximo a 1,9 T.

Figura 61 – Valores da densidade de fluxo do gerador síncrono em carga no projeto 1



Fonte: Autoria própria

Além do alto valor de B_{pp} mostrado na Figura 61, pode-se observar o efeito das componentes harmônicas de frequência em carga. Assim como na simulação a vazio, a terceira harmônica é a que apresenta valor mais significativo nas tensões de fase, como mostrado na Tabela 11. Neste cenário, DHT é 14%.

Tabela 11 - Componentes harmônicas nas tensões de fase em carga no projeto 1

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	13,04	-167,82
5	1,13	-71,38
7	1,38	-155,89
9	4,04	-64,87
11	2,16	80,04
13	2,78	-131,97
15	0,32	-58,70

Fonte: Autoria própria

Obtendo as tensões de linha, pode-se observar a redução significativa das componentes múltiplas de 3, como mostra a Tabela 12. Nesta situação, DHT apresentou um valor de 4%.

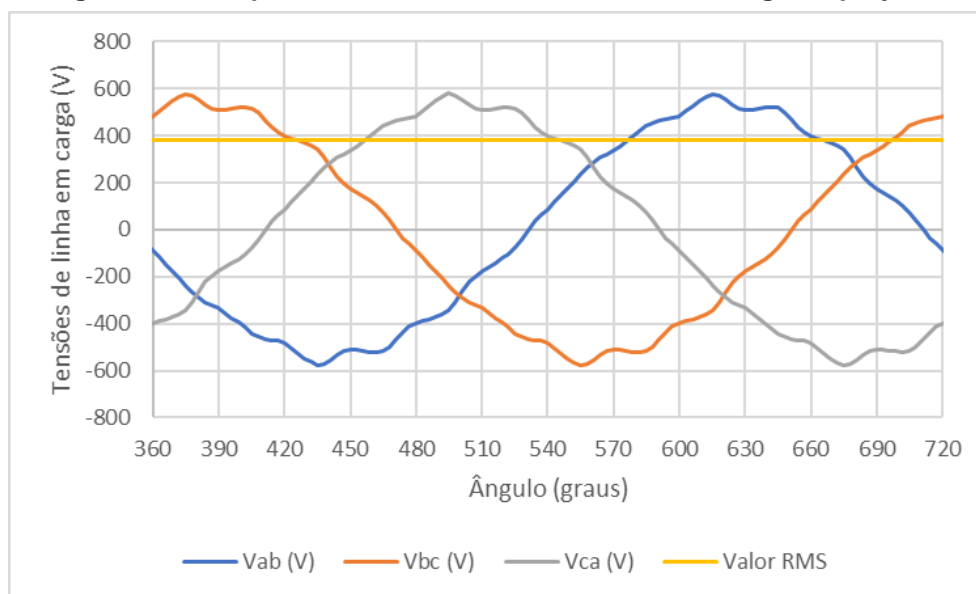
Tabela 12 - Componentes harmônicas nas tensões de linha em carga no projeto 1

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	0,03	-79,26
5	1,14	-101,80
7	1,39	-125,10
9	0,03	-119,58
11	2,15	50,63
13	2,79	-101,86
15	0,02	67,82

Fonte: Autoria própria

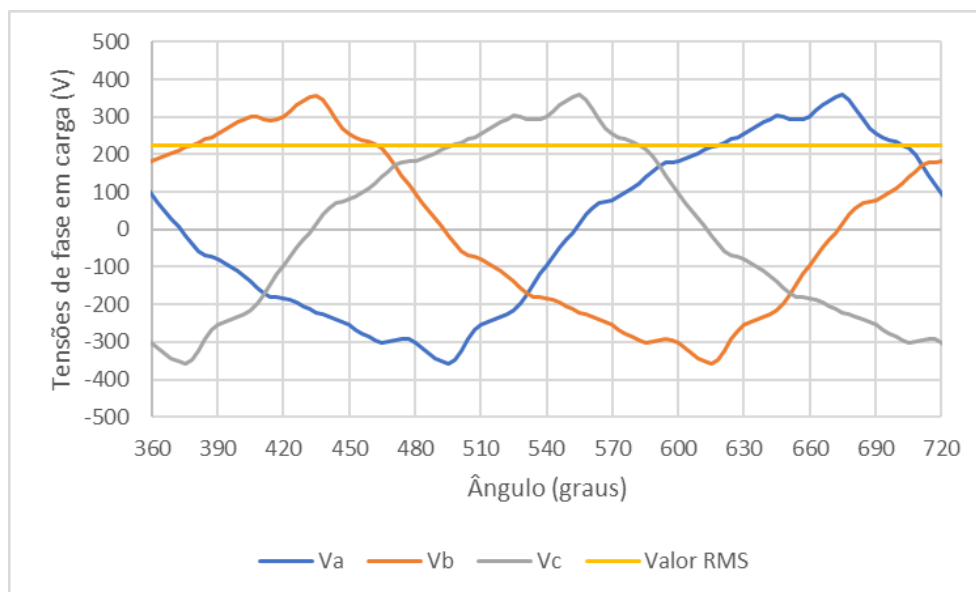
A partir da simulação em carga, e já considerando a queda de tensão não só na resistência de armadura, mas também nas reatâncias X_d e X_q , obteve-se um valor para a tensão de linha eficaz de 383,57 V. Realizando a comparação com o valor da tensão nominal de entrada eficaz, 380 V, a diferença percentual foi de 0,939%. A Figura 62 mostra o comportamento das 3 tensões de linha (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) desconsiderando o transitório. O valor eficaz da tensão de fase obtido foi de 223,58 V, sendo uma diferença de 1,43% comparada ao valor de V_ϕ . O comportamento das tensões de fase pode ser observado na Figura 63.

Figura 62 - Comportamento das tensões de linha em carga no projeto 1



Fonte: Autoria própria

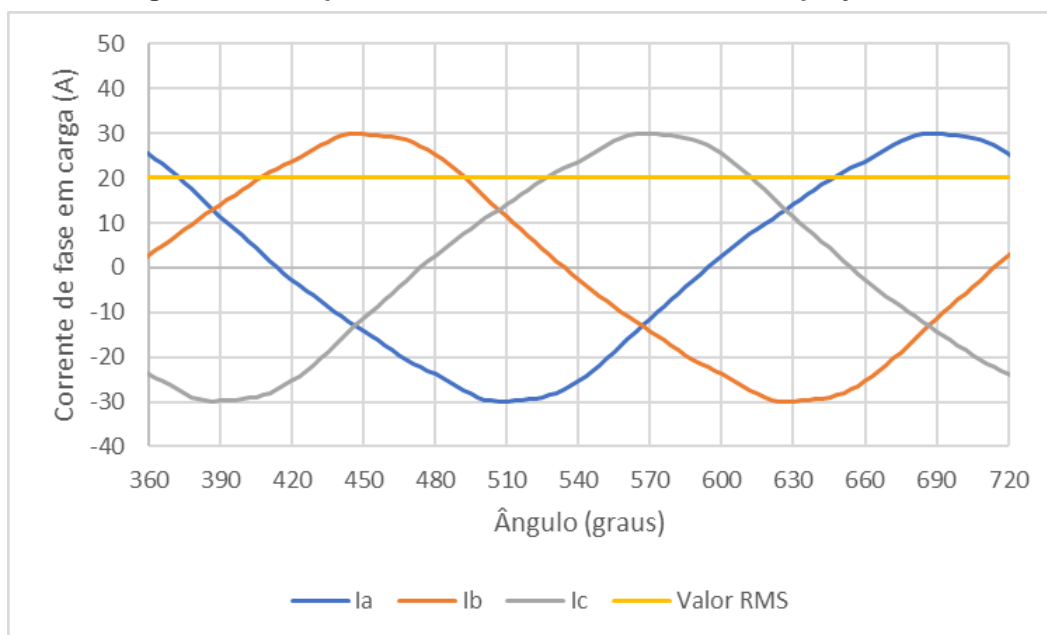
Figura 63 - Comportamento das tensões de fase em carga no projeto 1



Fonte: Autoria própria

O valor da corrente I_a na simulação em carga foi de 20,23 A. Comparando com o valor obtido nas planilhas de cálculo (20,35 A), a diferença foi de 0,612%. A Figura 64 demonstra o comportamento das 3 correntes (I_a , I_b e I_c) obtidas por simulação.

Figura 64 - Comportamento das correntes de fase no projeto 1



Fonte: Autoria própria

Apesar dos resultados apresentarem boa concordância com os resultados provenientes da simulação, o valor da corrente de campo I_{cn} necessário para se atingir a tensão nominal nos terminais do gerador ($V_{\phi} = 220$ V) com carga nominal foi de 5,48 A. Com esse valor, a densidade de corrente nos condutores de campo ultrapassa o limite máximo definido de 5 A/mm², inviabilizando o projeto 1.

5.2.2 Projeto 2

A fim de solucionar os problemas encontrados no projeto 1, foram realizadas uma série de mudanças. Para que fosse possível atingir um valor de V_{ϕ} próximo a 220 V sem impor uma I_{cn} maior que I_{cmax} , o valor da corrente máxima foi elevado de 5 A para 7,5 A, aumentando consequentemente a seção do condutor de campo.

Levando em consideração a realização de um novo projeto, outra melhoria possível é a redução das componentes harmônicas presentes no projeto 1. Para isso, definiu-se o número de ranhuras como 144 (no projeto 1, $N_r = 72$). Desta forma, o número de bobinas por polo e por fase muda de 1 para 2, tornando o enrolamento que anteriormente era concentrado em distribuído, como demonstrado no Apêndice B.

As componentes harmônicas relacionadas às ranhuras dependem da geometria e do número de ranhuras (FLORES; FORNIELES, 2015). A ordem destas componentes é calculada de acordo com a equação 76.

$$v_{ranhura} = \frac{2 \cdot M \cdot N_r}{p} \pm 1 \quad (76)$$

sendo,

- $v_{ranhura}$ a ordem da componente harmônica;
- M número inteiro, normalmente igual a 1, com o qual se produzem os harmônicos de ranhura de menor frequência.

Analisando a equação 76, pode-se observar que o aumento do número de ranhuras faz com que as componentes apareçam em uma ordem maior. No caso deste trabalho, as componentes harmônicas que apareceram na 11ª ordem (projeto 1), tendem a aparecer na 23ª ordem. Isto é de extrema importância, visto que quanto maior a ordem da harmônica, menor sua influência no funcionamento da máquina.

Assim como no projeto 1, foram adotados uma série de fatores e também foram impostos diversos parâmetros, conforme mostram as Tabela 13 e Tabela 14. O valor de K_{pp} foi reduzido visando aumentar a área disponível para cobre e o valor de I_{cmax} foi aumentado para que houvesse um aumento da seção do condutor de campo.

Tabela 13 - Fatores utilizados no projeto 2

Fator	Valor
Fator de encurtamento do passo polar (K_{α_p})	2/3
Fator de ajuste do pescoço do polo em relação à sapata polar (K_{pp})	0,43
Fator de ajuste da altura da seção reta da sapata polar em relação ao diâmetro e ao número de polos (K_{hpspr})	0,168
Fator de enchimento do condutor de campo (k_{pe})	0,8
Fator da relutância efetiva do entreferro (K_{ef})	1
Fator entre a largura do dente e a ranhura no topo (K_{dr})	0,8
Fator entre a largura do pescoço do polo e a largura da coroa do estator (K_{pc})	1,21
Fator entre a altura da coroa do estator e a altura da ranhura (K_{cr})	0,95
Percentual do fluxo do campo enlaçado pelos enrolamentos de armadura (K_{\emptyset})	0,9
Fator de enchimento da ranhura (K_{re})	0,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 - Parâmetros impostos no projeto 2

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro externo do rotor (D_{re})	254,5	mm
Densidade de corrente do campo (J_c)	5	A/mm ²
Corrente de campo (I_{cvz})	2,5	A
Corrente de campo máxima (I_{cmax})	7,5	A
Comprimento axial (C_{ax})	160,7	mm
Comprimento do entreferro (L_{ef})	1,5	mm
Altura do pescoço da ranhura (h_{pr})	1	mm
Altura do colarinho da ranhura (h_{cr})	0,47	mm
Número de ranhuras (N_r)	144	-
Largura da abertura da ranhura (L_{ra})	0,9	mm
Encurtamento do passo da bobina de armadura (EA_{pb})	5/6	-
Número de caminhos em paralelo (N_{cp})	1	-
Número de camadas da ranhura (N_{rc})	1	-
Densidade de corrente da armadura (J_a)	5	A/mm ²

Fonte: Autoria própria

Os fatores utilizados e parâmetros impostos foram aplicados na metodologia apresentada no item 4.1. A partir disso, obtiveram-se os resultados do projeto do rotor e do estator, mostrados na Tabela 15 e na Tabela 16.

Tabela 15 - Resultados do projeto do rotor no projeto 2

Resultado	Valor	Unidade
Número de polos (p)	12	Polos
Passo polar (α_p)	30	°
Passo efetivo do polo (α_{pef})	20	°
Altura do arco da sapata polar (h_{spa})	1,93	mm
Largura da sapata polar (L_{sp})	44,19	mm
Largura do pescoço do polo (L_{pp})	19,00	mm
Altura da seção reta da sapata polar (h_{spsr})	3,56	mm
Altura da sapata polar (h_{sp})	5,50	mm
Largura complementar do pescoço do polo (L_{ppc})	12,60	mm
Altura do pescoço do polo (h_{pp})	39,29	mm
Área do condutor de campo (A_{cc})	1,5	mm ²
Número de espiras do enrolamento de campo (N_{ce})	264	-
Força magnetomotriz por polo do campo (fmm_c)	659,98	A.esp
Largura da relutância eficaz no entreferro (LR_{ef})	44,42	mm
Relutância do entreferro (R_{ef})	167224,68	A.esp/Wb
Fluxo magnético de um laço ($\varnothing_{laço}$)	0,0020	Wb
Fluxo magnético no pescoço do polo (\varnothing_{pp})	0,0039	Wb
Densidade de fluxo magnético no pescoço do polo (B_{pp})	1,29	T

Fonte: Autoria própria

Tabela 16 - Resultados do projeto do estator no projeto 2

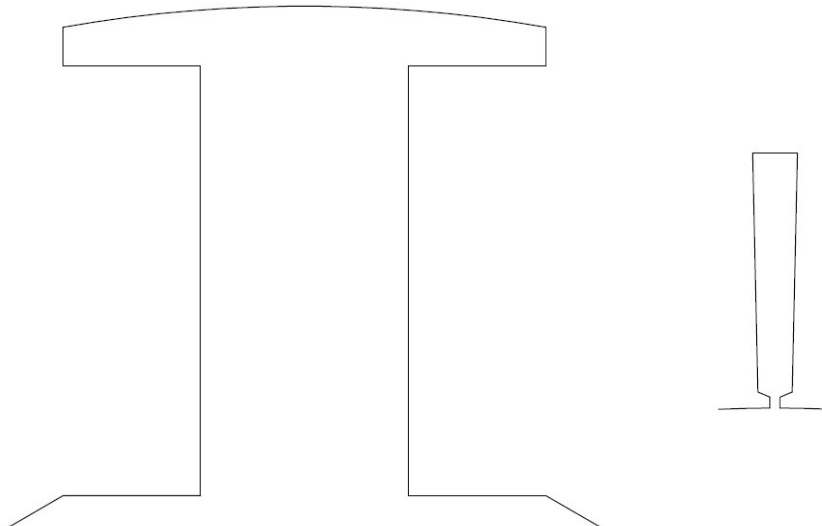
Resultado	Valor	Unidade
Diâmetro interno do estator (D_{ei})	257,5	mm
Diâmetro do topo da ranhura (D_{tr})	260,44	mm
Passo da Ranhura (α_r)	2,5	°
Ângulo ocupado pela ranhura no topo (θ_{rt})	1,39	°
Largura do topo da ranhura (L_{rt})	3,16	mm
Largura do colarinho da ranhura (L_{rc})	1,13	mm
Ângulo do colarinho (θ_{rc})	22,62	°
Altura da coroa do estator (h_{ce})	22,99	mm
Altura da ranhura (h_r)	21,84	mm
Ângulo de inclinação da ranhura (θ_{ir})	1,25	°
Largura da ranhura no fundo (L_{rf})	4,11	mm
Diâmetro externo do estator (D_{ee})	350,12	mm
Passo da bobina de armadura (α_{ab})	150	°
Fator de encurtamento de passo da bobina da armadura (K_{aeb})	0,9659	-
Número de caminhos em série (N_{cs})	12	-
Número de bobinas por polo e por fase da armadura (N_{bpf})	2	-
Fator de distribuição da bobina de armadura (KA_{db})	0,9998	-
Número total de espiras da armadura por fase (N_{at})	239,93	-
Número de espiras por bobina (N_{ab})	10	-
Área da ranhura (S_r)	79,36	mm ²
Área dos condutores do enrolamento da armadura (S_{ac})	3,97	mm ²
Corrente admissível nos condutores de armadura (I_a)	19,85	A
Potência elétrica de saída (P_e)	10451,89	W

Fonte: Autoria própria

Utilizando os dados demonstrados na Tabela 14, na Tabela 15 e na Tabela 16 foram realizados desenhos da máquina projetada. Na Figura 65 está representado um

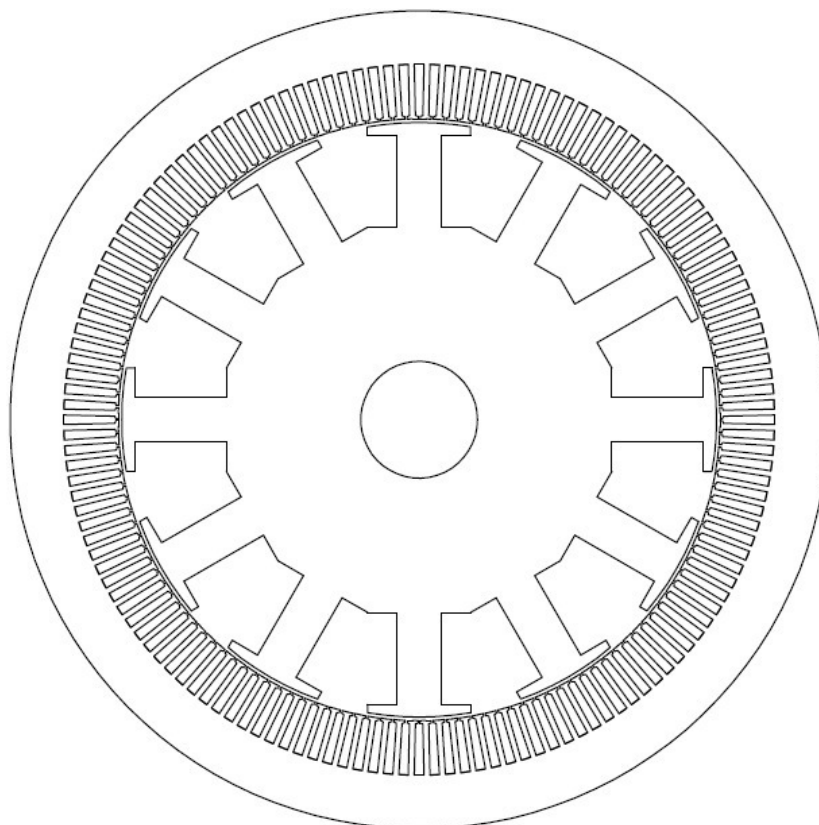
polo e uma ranhura da máquina e o gerador síncrono completo encontra-se na Figura 66.

Figura 65 – Um polo e uma ranhura do gerador do projeto 2



Fonte: Autoria própria

Figura 66 - Gerador completo do projeto 2

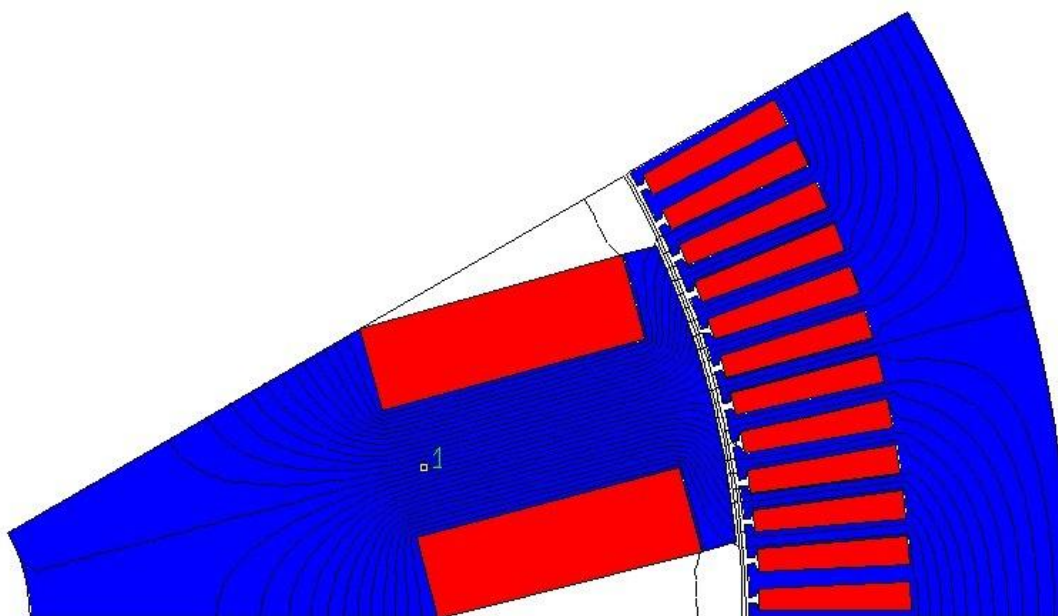


Fonte: Autoria própria

A primeira etapa para a validação do projeto é a simulação a vazio. Para esta simulação, deve-se definir o esquema de bobinagem do gerador. Levando em conta que o número de ranhuras foi alterado, o esquema de bobinagem também se altera. O novo esquema está representado no Apêndice B.

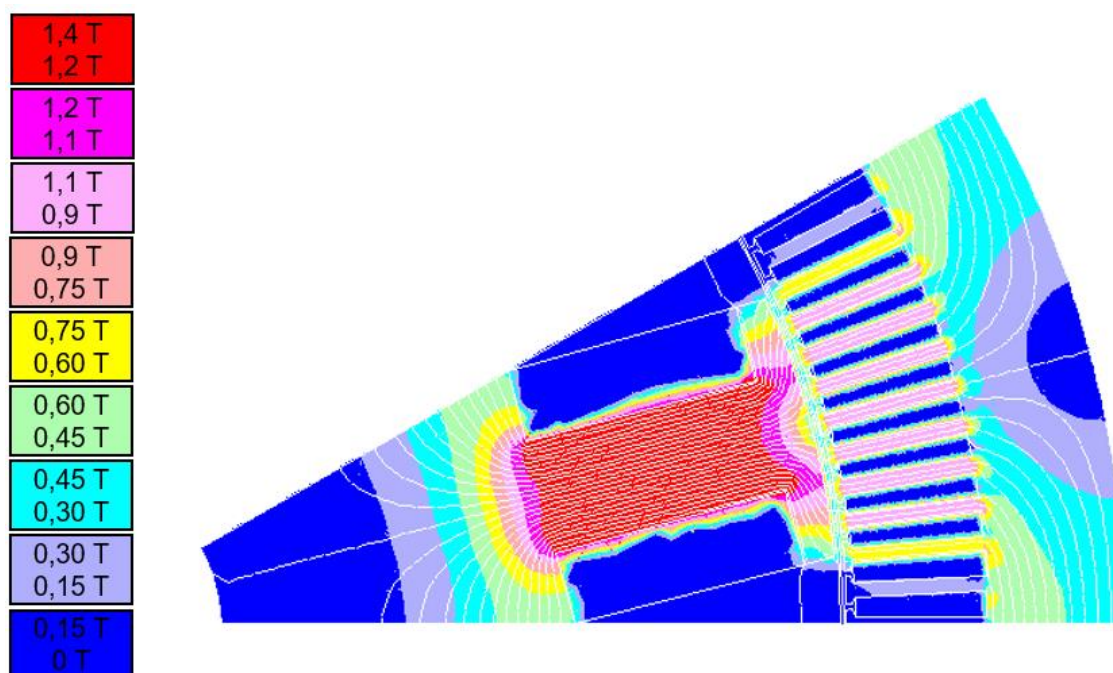
Inicialmente, novamente utilizando o Software EFCAD, verificou-se o valor de B_{pp} . O valor calculado foi de 1,29 T, conforme demonstrado na Tabela 15. Na Figura 67, observam-se as linhas de fluxo passando através de um polo do gerador projetado. Selecionando um ponto no centro do pescoço do polo, o valor de B_{pp} é 1,28 T, sendo um valor muito próximo ao valor calculado. A Figura 68 apresenta os valores da densidade de fluxo em uma determinada região da máquina e demonstra que o valor da densidade de fluxo no pescoço do polo varia entre 1,2 a 1,4 T.

Figura 67 - Linhas de fluxo em um polo do gerador síncrono a vazio no projeto 2



Fonte: Autoria própria

Figura 68 - Valores da densidade de fluxo a vazio no projeto 2



Fonte: Autoria própria

Bem como no projeto 1, nas tensões de fase as componentes harmônicas de terceira ordem e suas múltiplas apresentam valores significativos, como mostra a Tabela 17. Conforme a equação 76, ao elevar o número de ranhuras do estator da máquina, foi confirmado que os efeitos da 11^a harmônica foram refletidos na 23^a ordem. O índice DHT resultante foi de 7%.

Conforme explicado no item 5.2.1, as harmônicas de terceira ordem e suas múltiplas foram suprimidas nas tensões de linha, como mostra a Tabela 18. Neste caso, DHT é 3%.

Tabela 17 - Componentes harmônicas nas tensões de fase a vazio no projeto 2

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	6,31	-94,46
5	2,07	82,41
7	1,63	-100,56
9	0,94	-103,14
11	0,33	73,24
13	0,51	-109,71
15	0,44	-112,46
17	0,19	64,39
19	0,45	-118,77
21	0,60	-122,86
23	1,87	56,00
25	0,67	-127,04

Fonte: Autoria própria

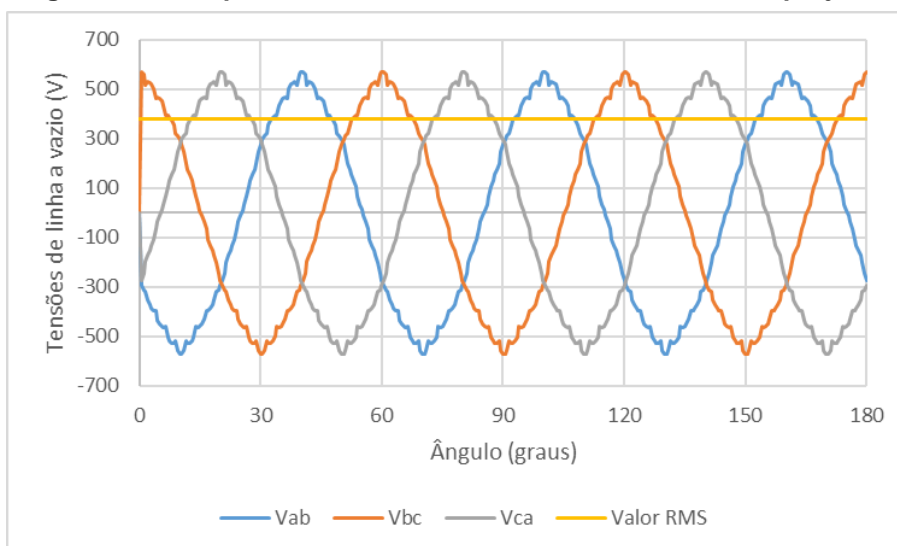
Tabela 18 - Componentes harmônicas nas tensões de linha a vazio no projeto 2

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	0,00	143,47
5	2,07	52,33
7	1,64	-70,11
9	0,00	6,22
11	0,33	43,09
13	0,51	-80,06
15	0,00	-70,60
17	0,19	34,84
19	0,45	-89,23
21	0,00	-121,07
23	1,87	26,05
25	0,67	-96,69

Fonte: Autoria própria

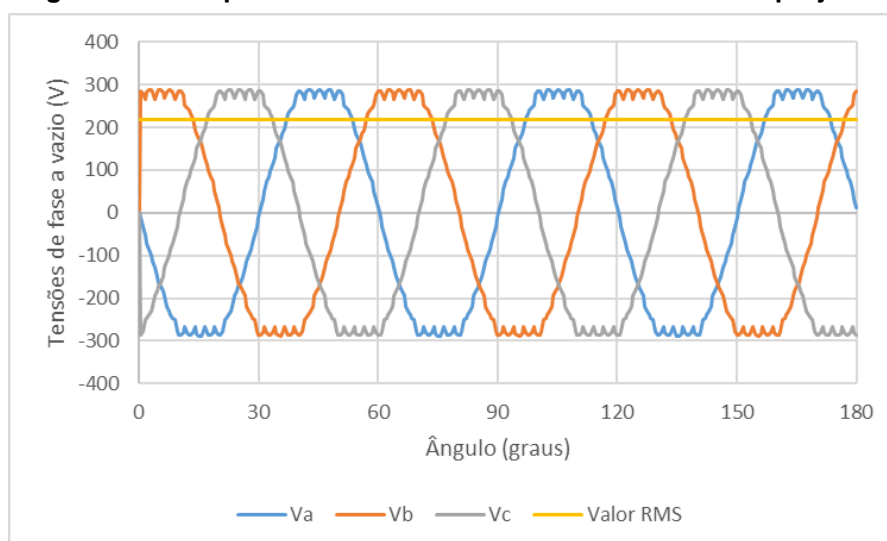
Além disso, a partir da simulação a vazio foi obtido o valor de 378,32 V para a tensão de linha eficaz, ou seja, uma diferença de 0,47% comparado ao valor estipulado para V_T , 380 V. Já a tensão de fase eficaz apresentou o valor de 218,89 V, o que, em relação ao valor de V_ϕ , significa uma diferença de 0,51%. Os valores encontrados são satisfatórios para a continuidade do projeto. As tensões de linha estão representadas na Figura 69 e as de fase estão demonstradas na Figura 70. Realizando uma comparação com o projeto 1, pode-se observar que as ondulações das tensões de fase têm maior frequência e menor amplitude, devido à duplicação do número de ranhuras e redução na largura de abertura das ranhuras.

Figura 69 - Comportamento das tensões de linha a vazio no projeto 2



Fonte: Autoria própria

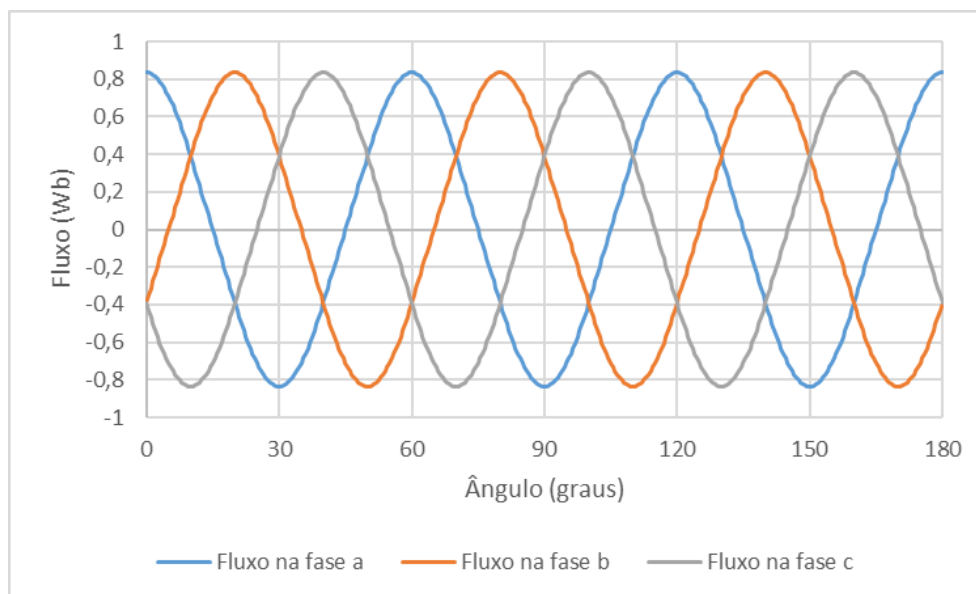
Figura 70 - Comportamento das tensões de fase a vazio no projeto 2



Fonte: Autoria própria

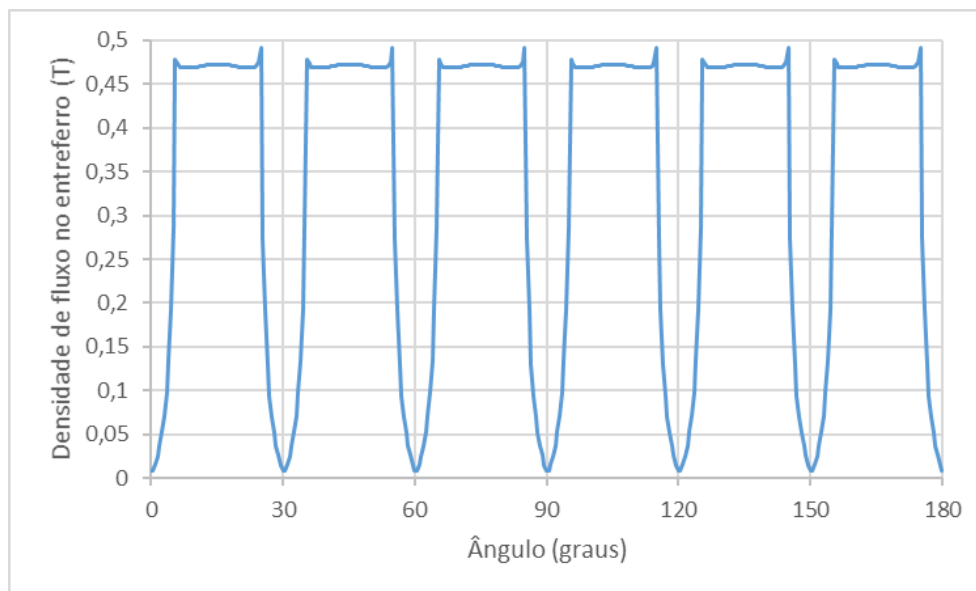
Além da forma de onda da tensão, foram obtidas as formas de onda do fluxo da máquina e da densidade de fluxo no entreferro em função da posição, conforme mostra a Figura 71 e a Figura 72.

Figura 71 - Fluxo a vazio no projeto 2



Fonte: Autoria própria

Figura 72 - Densidade de fluxo no entreferro no projeto 2



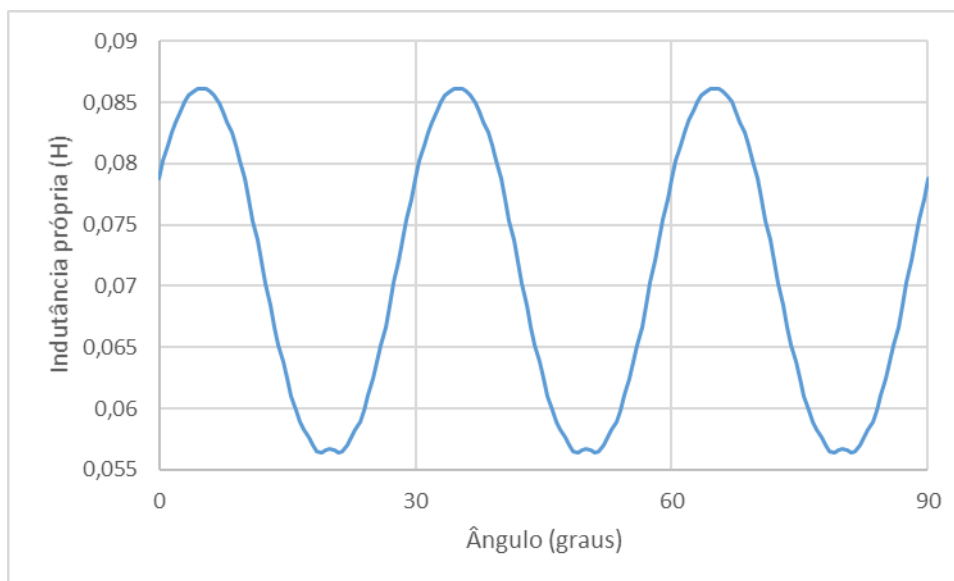
Fonte: Autoria própria

Após a verificação de que os resultados a vazio foram satisfatórios, foi realizada uma nova simulação para a obtenção das reatâncias de eixo direto e em quadratura (X_d e X_q), da mesma maneira apresentada no projeto 1. Porém, como o número de

ranhuras do projeto 2 foi alterado, o esquema de bobinagem utilizado nesta etapa está apresentado no Apêndice B.

Para encontrar o valor das indutâncias L_d e L_q é necessário observar os valores mínimo e máximo do gráfico da indutância própria. Através da Figura 73, pode-se concluir que os valores de L_{min} e L_{max} são, respectivamente, 56,40 mH e 86,10 mH.

Figura 73 – Gráfico da indutância própria do projeto 2



Fonte: Autoria própria.

Para que o projeto tenha uma maior precisão, foi realizada uma associação de cabos para os condutores de campo e de armadura, de acordo com os valores apresentados no Anexo A.

No caso do condutor de armadura, foram associados sete cabos AWG20 e um cabo AWG22, totalizando 3,97 mm². Para este projeto o valor de I_{cmax} foi aumentado para 7,5 A, já que no projeto 1 este limite teve que ser ultrapassado. Este aumento, levou a um aumento da seção do condutor de campo para 1,5 mm². Sendo assim, foi realizada a associação de dois cabos AWG19 e dois cabos AWG27, resultando em 1,5 mm².

Para os condutores de armadura, foi realizada uma associação em paralelo, obtendo um valor resultante para R_{Akm_fio} de 4,2817 Ω/km. Já para os condutores de campo, o valor resultante para R_{Ckm_fio} foi de 11,3319 Ω/km.

Através da obtenção destes valores, juntamente com os dados do projeto a vazio, foram obtidos os resultados do projeto do gerador em carga. Neste ponto do

projeto, para que V_ϕ atinja o valor esperado de 220 V, o valor de I_{cn} foi alterado até 5,804 A, não ultrapassando o limite estipulado de 7,5 A. Estes resultados estão mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados do projeto 2 em carga

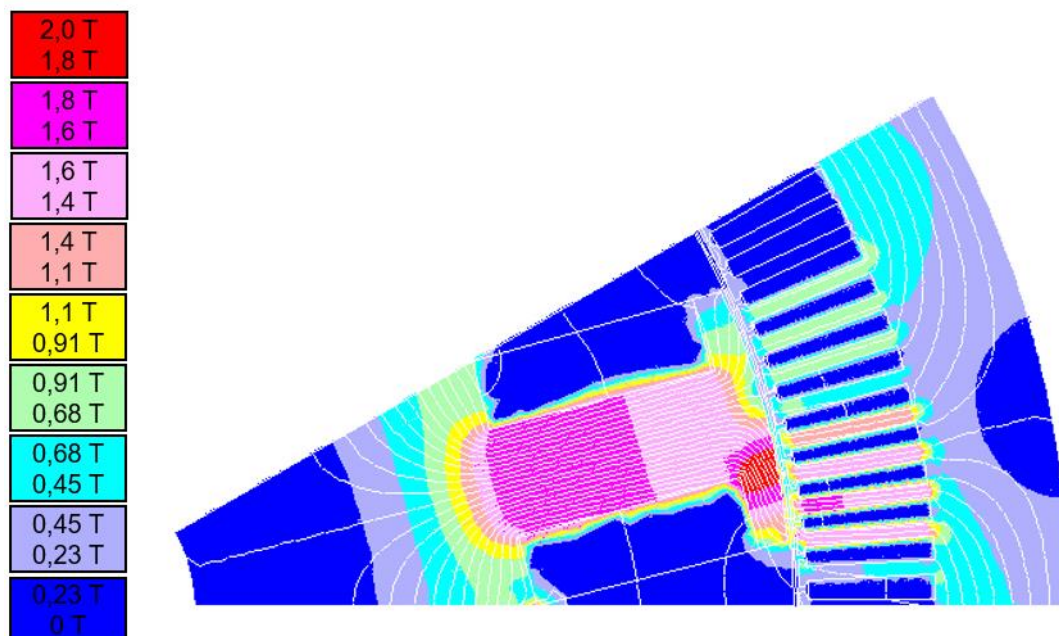
Resultados	Valor	Unidade
Indutância de eixo direto (L_d)	43,10	mH
Indutância de eixo de quadratura (L_q)	28,20	mH
Reatância de eixo direto (X_d)	16,23	Ω
Reatância de eixo de quadratura (X_q)	10,63	Ω
Comprimento do passo da bobina de armadura ($D\alpha_{Ac_b}$)	369,51	mm
Comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura (A_{Ac_b})	580,42	mm
Comprimento de uma espira da armadura (médio) (C_{A1e})	1482,25	mm
Resistência de uma fase do enrolamento de armadura (R_A)	1,52	Ω
Comprimento de uma espira do campo (médio) (C_{C1e})	409,79	mm
Resistência do enrolamento de campo (R_C)	1,23	Ω
Fluxo no pescoço do polo com corrente de campo de nominal (Φ_{pp-n})	0,0092	Wb
Tensão Interna Induzida em carga ($E_{A,n}$)	509,34	V
Ângulo entre a tensão e a corrente (Φ)	36,87	$^\circ$
Ângulo de carga (δ)	26,01	$^\circ$
Componente da Corrente de armadura orientada com o eixo em quadratura (I_q)	9,05	A
Componente da Corrente de armadura orientada com o eixo direto (I_d)	17,67	A
Componente da Tensão terminal fase-neutro no eixo em quadratura (V_q)	208,79	V
Componente da Tensão terminal fase-neutro no eixo direto (V_d)	69,30	V
Tensão terminal fase-neutro (V_ϕ)	219,99	V

Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 74, pode-se observar que o valor de B_{pp} varia entre 1,4 T e 1,8 T, valor abaixo do encontrado na simulação em carga do projeto 1. Através da

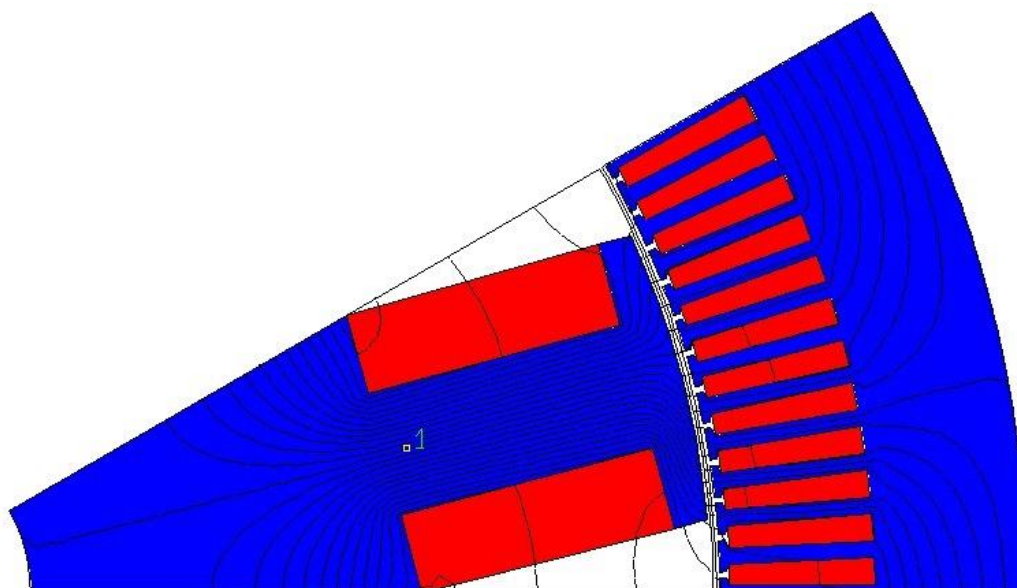
Figura 75 observou-se que, escolhendo um ponto na área crítica do pescoço do polo, obteve-se um valor de B_{pp} igual a 1,68 T.

Figura 74 - Valores da densidade de fluxo do gerador síncrono em carga no projeto 2



Fonte: Autoria própria

Figura 75 - Linhas de fluxo em um polo do gerador síncrono em carga no projeto 2



Fonte: Autoria própria

Além da análise dos valores da densidade de fluxo, também foi feita a observação dos efeitos das componentes harmônicas em carga. Da mesma forma que a simulação a vazio, a terceira harmônica é a que apresenta valor mais

significativo nas tensões de fase, como mostra a Tabela 20. Neste cenário, DHT atingiu 17%.

Tabela 20 - Componentes harmônicas nas tensões de fase em carga no projeto 2

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	16,57	-165,91
5	2,02	-71,66
7	0,51	-172,94
9	0,8	-41,75
11	0,18	28,76
13	0,08	-84,62
15	0,41	55,05
17	0,20	160,67
19	0,25	112,52
21	1,09	-151,98
23	0,91	-10,97
25	0,74	177,39

Fonte: Autoria própria

A Tabela 21 mostra as componentes harmônicas nas tensões de linha, apresentando uma redução significativa deste índice, totalizando um valor de DHT de 2%. Tal resultado é satisfatório comparado ao encontrado no projeto 1, onde a distorção foi de 4%. Além disso, os efeitos consideráveis que anteriormente apareciam na 11ª ordem harmônica passam a aparecer na 23ª ordem, comprovando a funcionalidade da equação 76.

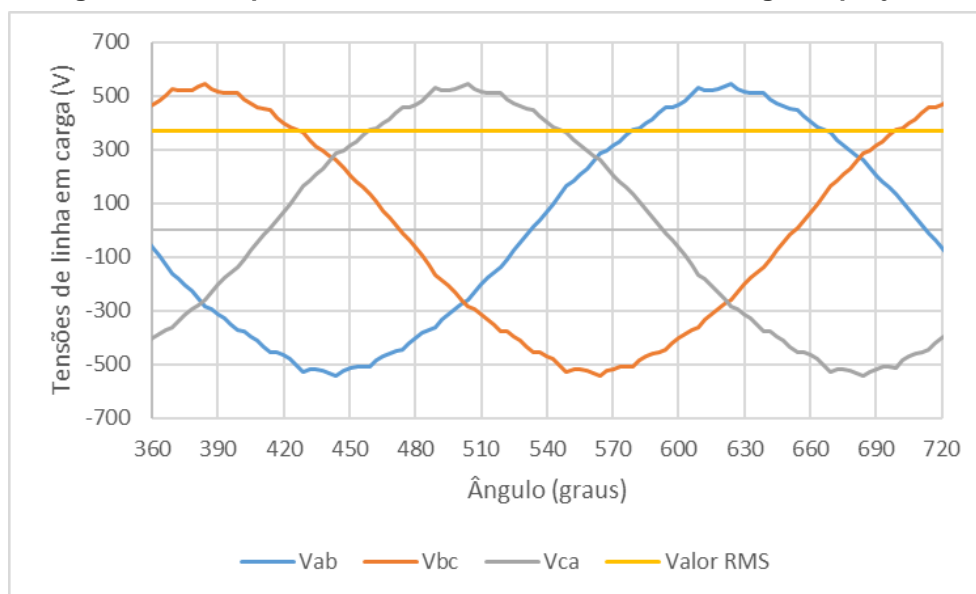
Tabela 21 - Componentes harmônicas nas tensões de linha em carga no projeto 2

Ordem harmônica	%	fase (°)
3	0,03	-50,79
5	2,02	-101,45
7	0,53	-139,76
9	0,00	-173,60
11	0,17	4,17
13	0,09	-52,69
15	0,01	-91,76
17	0,20	130,63
19	0,25	141,95
21	0,01	46,85
23	0,91	-40,91
25	0,74	-151,72

Fonte: Autoria própria

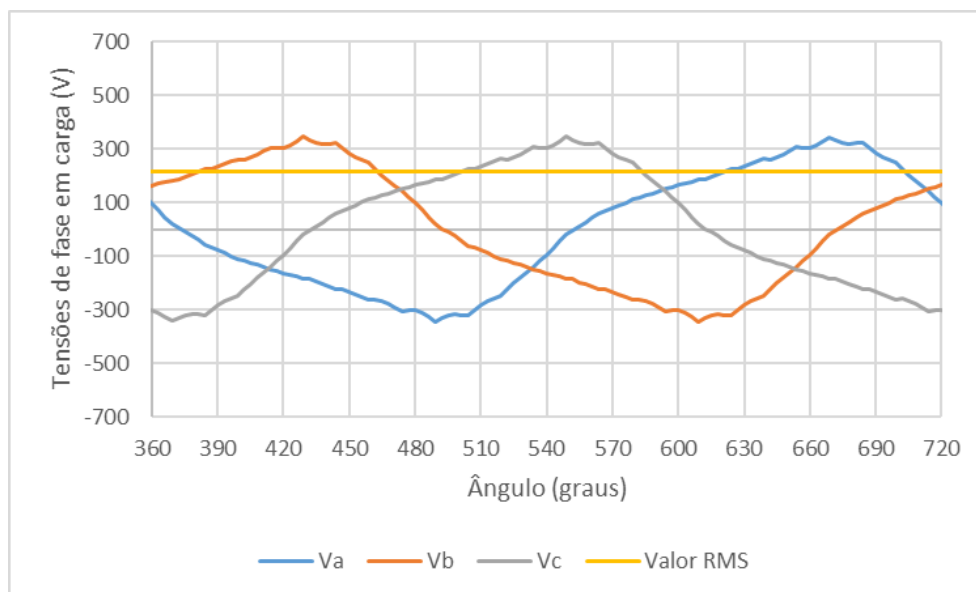
Com a realização da simulação em carga e levando em consideração a queda de tensão causada por R_A , X_d e X_q obteve-se um valor eficaz para a tensão de linha de 368,46 V. Realizando uma analogia com o valor da tensão nominal de entrada, 380 V, a diferença encontrada foi de 3,04%. As curvas das tensões de linha (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) estão representadas na Figura 76. Já a tensão de fase eficaz encontrada foi 215,75 V, apresentando uma diferença de 1,90% em relação a V_ϕ . O comportamento das tensões de fase pode ser observado na Figura 77.

Figura 76 - Comportamento das tensões de linha em carga no projeto 2



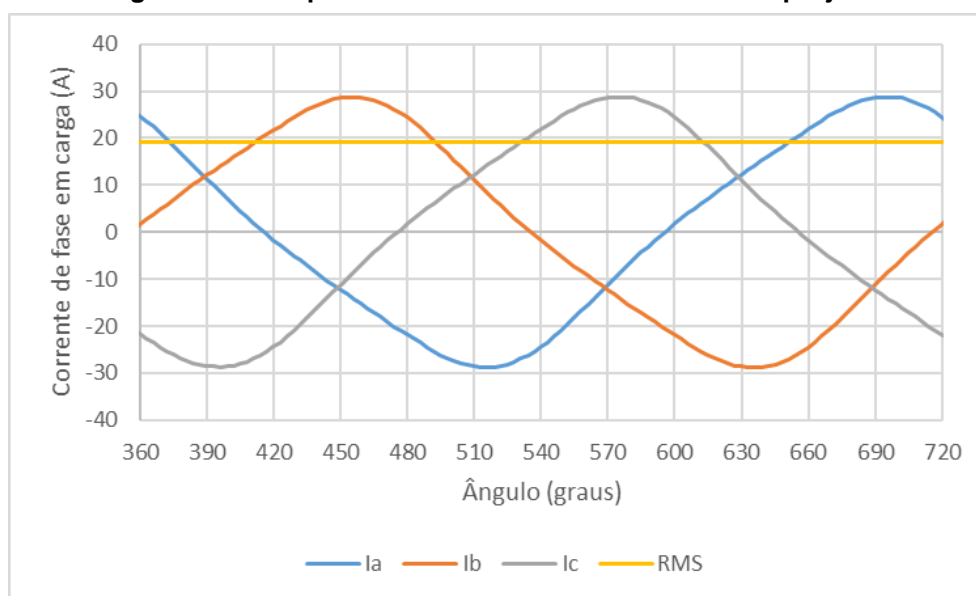
Fonte: Autoria própria

Figura 77 - Comportamento das tensões de fase em carga no projeto 2



Fonte: Autoria própria

Por meio da simulação, também foi obtido o valor da corrente de fase eficaz, igual a 19,03 A. Comparando este valor ao valor calculado de 19,85 A a diferença encontrada foi de 4,16%. As correntes de fase (I_a , I_b e I_c) estão demonstradas na Figura 78.

Figura 78 - Comportamento das correntes de fase no projeto 2

Fonte: Autoria própria

Utilizando os valores de correntes e tensões obtidos na simulação, é possível calcular a potência através da equação 52. O valor encontrado na simulação foi de 9713,27 W, ou seja, uma diferença de 6,62% em relação ao valor calculado de 10402,08 W. Desta forma, analisando as divergências encontradas, pode-se concluir que o projeto é válido, visto que a corrente de campo máxima não foi extrapolada, as harmônicas apresentaram valores aceitáveis e a máquina projetada é construtível.

Entretanto ainda houve uma diferença na potência elétrica de saída comparada ao valor calculado, que pode ser explicado pelas simplificações utilizadas para a elaboração do projeto. Entre elas, destacam-se a relutância do ferro ter sido desprezada e as dispersões de fluxo não terem sido consideradas.

É possível estipular, por meio de simulação, qual deve ser o valor real da corrente de campo nominal para que a tensão de linha em carga atinja um valor eficaz próximo a 380 V. Com este dado é possível recalculer a potência e assim provar que, com o projeto 2, onde a seção do condutor do campo foi dimensionada com uma margem maior comparada ao projeto 1, é possível atingir a potência calculada. Após esta simulação, o valor de corrente de campo encontrado foi de 6,65 A. Com isso a nova tensão de linha eficaz é 383,69 V e a nova corrente de fase eficaz é 19,81 A, culminando em uma potência de saída de 10529,46 W. Este valor simulado ultrapassa o valor da potência inicialmente calculada, além de manter uma certa margem com

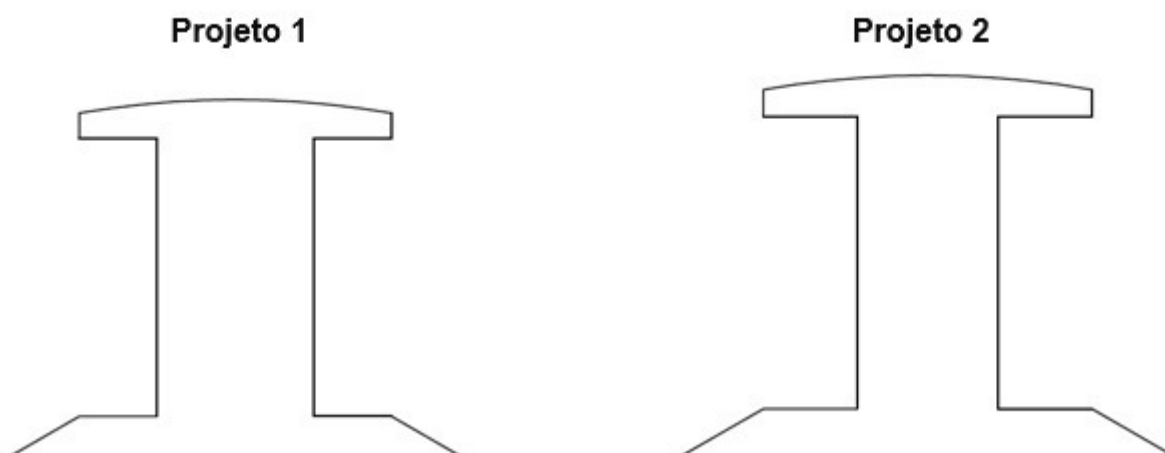
relação a corrente máxima estipulada (7,5 A). Portanto, com o gerador do projeto 2 é possível atender todas as especificações de projeto.

5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROJETOS

Para resolver os problemas encontrados no projeto 1, as principais modificações aplicadas ao segundo projeto foi dobrar o número de ranhuras e sobredimensionar o condutor de campo. A fim de facilitar a observação das principais diferenças entre ambos os projetos, a seguir são demonstrados desenhos lado a lado de ambas as máquinas.

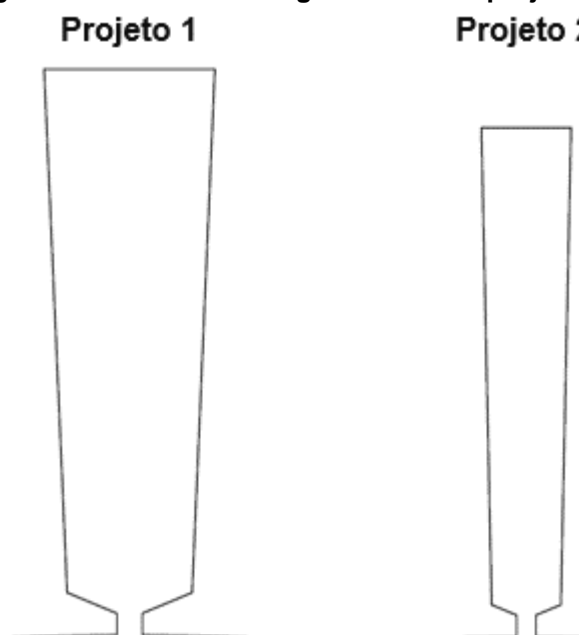
Como pode-se observar na Figura 79, o pescoço do polo do gerador do projeto 2 ficou um pouco mais fino, devido ao fator K_{pp} aplicado. Outras dimensões também sofreram alterações, porém não implicam em grandes mudanças no projeto.

Figura 79 - Polos dos geradores dos projetos 1 e 2



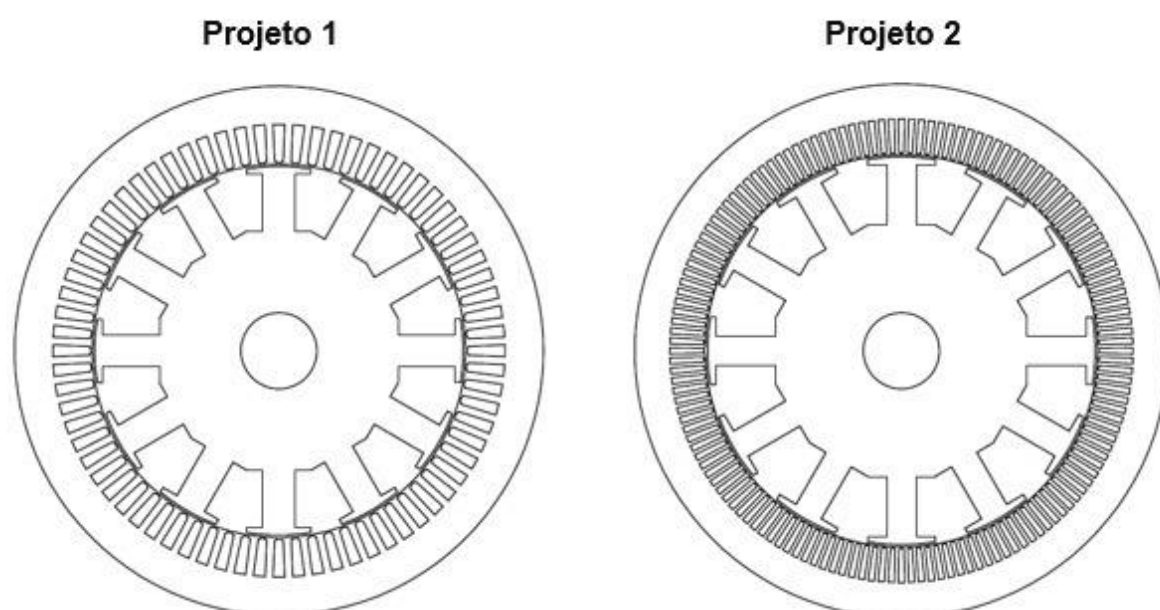
Fonte: Autoria própria

Na Figura 80 são comparadas as ranhuras dos 2 projetos. No gerador do projeto 2, a ranhura apresenta-se mais fina devido ao aumento do número de ranhuras do estator.

Figura 80 - Ranhuras dos geradores dos projetos 1 e 2

Fonte: Autoria própria

Conforme observa-se na Figura 81, embora os dois geradores aparentemente não apresentem uma diferença considerável de tamanho, pelo fato do comprimento axial do projeto 2 ser de 160,7 mm e do projeto 1 ser 137 mm, há uma diferença considerável no volume das duas máquinas. O gerador do projeto 1 apresenta volume de 12973,40 cm³, enquanto no projeto 2 o volume é 15471,41 cm³.

Figura 81 - Geradores síncronos dos projetos 1 e 2

Fonte: Autoria própria

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma metodologia para o projeto de geradores síncronos. A definição dos parâmetros do projeto foi realizada através de cálculos analíticos. Já a validação do projeto foi realizada por meio do método dos elementos finitos, através de simulação no software EFCAD, com o objetivo de observar o comportamento do gerador síncrono a vazio e em carga.

O projeto de geradores síncronos mostrou-se muito complexo, pois envolve um número alto de variáveis para um número baixo de equações, fazendo com que devam ser impostos os valores de diversas variáveis. A excelência do projeto será atingida de acordo com a experiência do projetista, o qual modificará os fatores e parâmetros impostos da melhor maneira possível, a fim de atingir as especificações do projeto.

O aprendizado obtido ao longo deste trabalho fez com que, com a observação das divergências encontradas no projeto 1, fosse possível alterar pontualmente alguns dados e parâmetros a fim de que tais problemas fossem resolvidos. Como no projeto 1 a corrente nominal utilizada excedeu o limite máximo permitido, no projeto 2 a seção do condutor foi aumentada. Aliado a isso, desejando reduzir os efeitos das componentes harmônicas presentes, o número de ranhuras do estator foi dobrado.

Conforme mostrado na validação do projeto, houve uma pequena divergência entre os resultados obtidos na planilha de cálculo e os valores alcançados na simulação. Independente desta diferença, os resultados foram satisfatórios. Porém isto pode ser amenizado com um refino no cálculo, considerando a relutância do ferro da máquina e os caminhos de dispersão do fluxo magnético. O conteúdo harmônico pode ser significativamente reduzido com o uso de polos de entreferro variável. Estes aspectos não considerados poderiam ser abordados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Caderno Temático de Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2. ed. Brasília, 2016. 15 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 28 set. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012**. 2017. Disponível em: <<https://tinyurl.com/yaxkjfe>>. Acesso em: 05 fev. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº. 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº. 673, de 04 de agosto de 2015**. Brasília, 2015.

ANDRADE, Alan Sulato de. **Eixos**. Curitiba, 2017. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT102-Aula01.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6445: Turbinas hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação**. 2016. 53 p.

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática**. 3. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2008. 396 p.

BAZZO, Thiago de Paula Machado. **Geradores Síncronos**. Curitiba, 2018.

BERGSTRÖM, David; MALMROS, Christoffer. **Finding Potential Sites for Small-Scale Hydro Power in Uganda: a Step to Assist the Rural Electrification by the Use of GIS.: A Minor Field Study**. Suécia, 2005. 82 p.

BOLDEA, Ion. **Synchronous Generators**. 2. ed. Timisoara, Romania: CRC Press, 2015. 465 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <<https://tinyurl.com/ybyeamdq>>. Acesso em: 09 out. 2017.

CALABRÓ, Leonardo. Geração Distribuída – Novo Ciclo de Desenvolvimento. In: **FORUM COGEN – CANALENERGIA**, São Paulo, 2013.

CAMARGO, Ivan Marques de Toledo. Panorama da oferta e do consumo de energia elétrica no Brasil para os próximos anos. **Revista Brasileira de Energia**, v.13, n.1,

p.1-10, 2007. Disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/rbe/revista/24/>>. Acesso em: 11 out. 2017.

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013. 684p.

COSTA, Antonio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**. Florianópolis, 2001. Cap. 5. p. 105-125. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y66l49m5>>. Acesso em: 15 set. 2018

DRENARTEC COMÉRCIO DE TUBOS LTDA. **Manual técnico: Tubos Estruturados de PVC RIB LOC**. 2006.

ELETROBRAS, **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**, 2000.

ELY, Fernando; SWART, Jacobus W., Energia solar fotovoltaica de terceira geração. **O Setor Elétrico**: Espaço IEEE, n. 105, p.138-139, out. 2014. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y9ht7v4x>>. Acesso em: 19 out. 2017.

ENERGIA, Santo Antônio. **Curiosidades sobre as turbinas bulbo**. 2016. Disponível em: <<http://www.santoantonioenergiaevoce.com.br/index.php/curiosidades-sobre-as-turbinas-bulbo/>>. Acesso em: 03 set. 2018.

FARRET, Felix A.; SIMÕES, M. Godoy. **Integration sources of energy of alternative**. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, 2006. 471 p.

FITZGERALD, A. E.; UMANS, Stephen D.; KINGSLEY JUNIOR, Charles. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006

FLORES, José Manuel Fregoso; FORNIELES, Francesc. **Harmônicos de ranhura em sistemas de geração elétrica**. 2015. 5 p. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y2axy7rq>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

FUCHS, Rubens Dario; SOUZA, Zulcy de; SANTOS, Afonso H. Moreira. **Centrais hidro e termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá-MG: Escola de Engenharia, 1983.

GOMES, Carla da Gama Soares. **Noções de geração de energia utilizando algumas fontes de baixo impacto ambiental**. 2010. 92 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

GUEDES, Manuel Vaz. **Máquinas Elétricas II – Apontamentos**. Porto, Portugal, 2001.

GUEDES, Manuel Vaz. **O Alternador Síncrono Trifásico nos Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos**. Porto, 1994. 41 p. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y25vhbx7>>. Acesso em: 05 ago. 2018.

HIDROENERGIA. **Tipos de Turbinas Hidráulicas**. 2018. Disponível em: <<https://www.hidroenergia.com.br/tipos-de-turbinas-hidraulicas/>>. Acesso em: 05 set. 2018.

IAMAMURA, Bruno Akihiro Tanno. **Notas de aula**. Curitiba, 2018.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Energias Renováveis**. 2014. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y3rnqh45>>. Acesso em 10 out. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Notas sobre Geração Distribuída**. 2001. 23p.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **O QUE É GERAÇÃO DISTRIBUÍDA?**. 2017. Disponível em: <<https://tinyurl.com/ybdorbbw>>. Acesso em: 10 out. 2017.

LEITE, Nelson; DELGADO, Marco; HAGE, Fabio. Os desafios do armazenamento de energia no setor elétrico. **FGV Energia: Boletim de Conjuntura do Setor Energético**, p.09-12, jan. 2017. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y9y4kja2>>. Acesso em: 07 out. 2017.

KOLZER, José Fabio. **Projeto Ótimo Multidisciplinar de Geradores Síncronos com Ímãs Permanentes de Ferrite para Microgeração Eólica**. Tese de doutorado em engenharia elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2017.

MACINTYRE, A. J.. **Maquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983. 649p.

NICOLAU, Nuno Miguel Vilela. **Excitação sem escovas de geradores síncronos: estudo de modelos e otimização do controlo**. 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Técnico Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y9b8dbdx>>. Acesso em: 09 set. 2018.

NOVACON. **Tabela de fios AWG**. Brasil. 2019. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y3xy75m3>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

OLIVEIRA, João Gabriel Souza Martins de. **Materiais Usados na Construção de Motores Elétricos**. Porto Alegre. 2009. 70 p.

PINHEIRO, Hélio. **Apostila de Máquinas CC**. Natal, 2007. 21 p. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y2es9pqy>>. Acesso em: 21 set. 2018.

REIS, Joana Magda Vaz da Silva. **Comportamento dos Geradores Eólicos Síncronos com Conversores Diante de Curto-Circuitos no Sistema**. 2013. 152 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SCHREIBER, Gerhard P. **Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Edgard Blücher Ltda, 1978.

SEN, Paresh Chandra. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. 3. ed. Estados Unidos da América: Wiley, 2013. 618 p.

TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva**, 2007. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y4ffapzz>>. Acesso em: 25 jun. 2018.

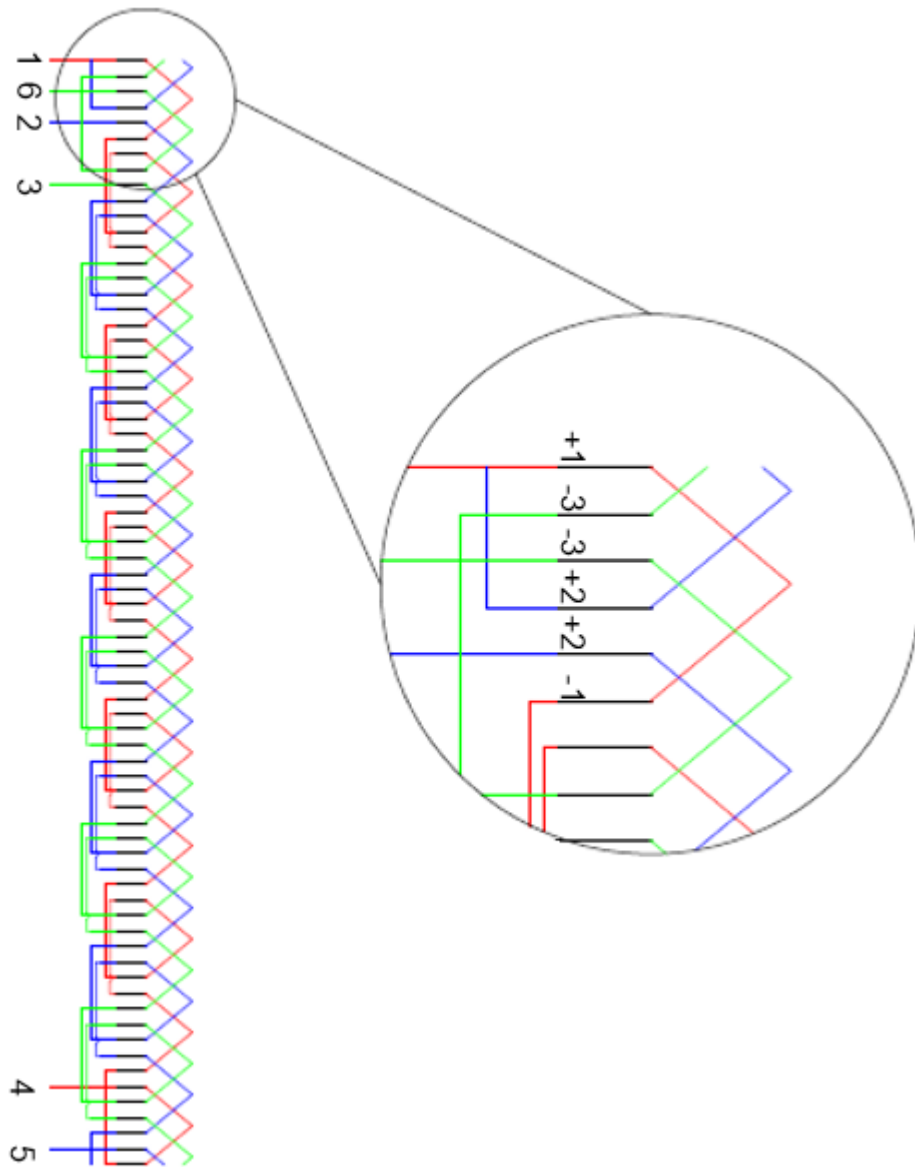
U.S. Energy Information Administration. “**International Energy Outlook 2014**”, 2014. Ed. Washington.

WRIGHT, James T C; CARVALHO, Daniel Estima de; SPERS, Renata Giovinazzo. Tecnologias disruptivas de geração distribuída e seus impactos futuros sobre empresas de energia. **Inmr - Innovation & Management Review**, São Paulo, v. 6, n. 1, p.108-125, 18 maio 2009. Disponível em: <<https://tinyurl.com/yylsqexf>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

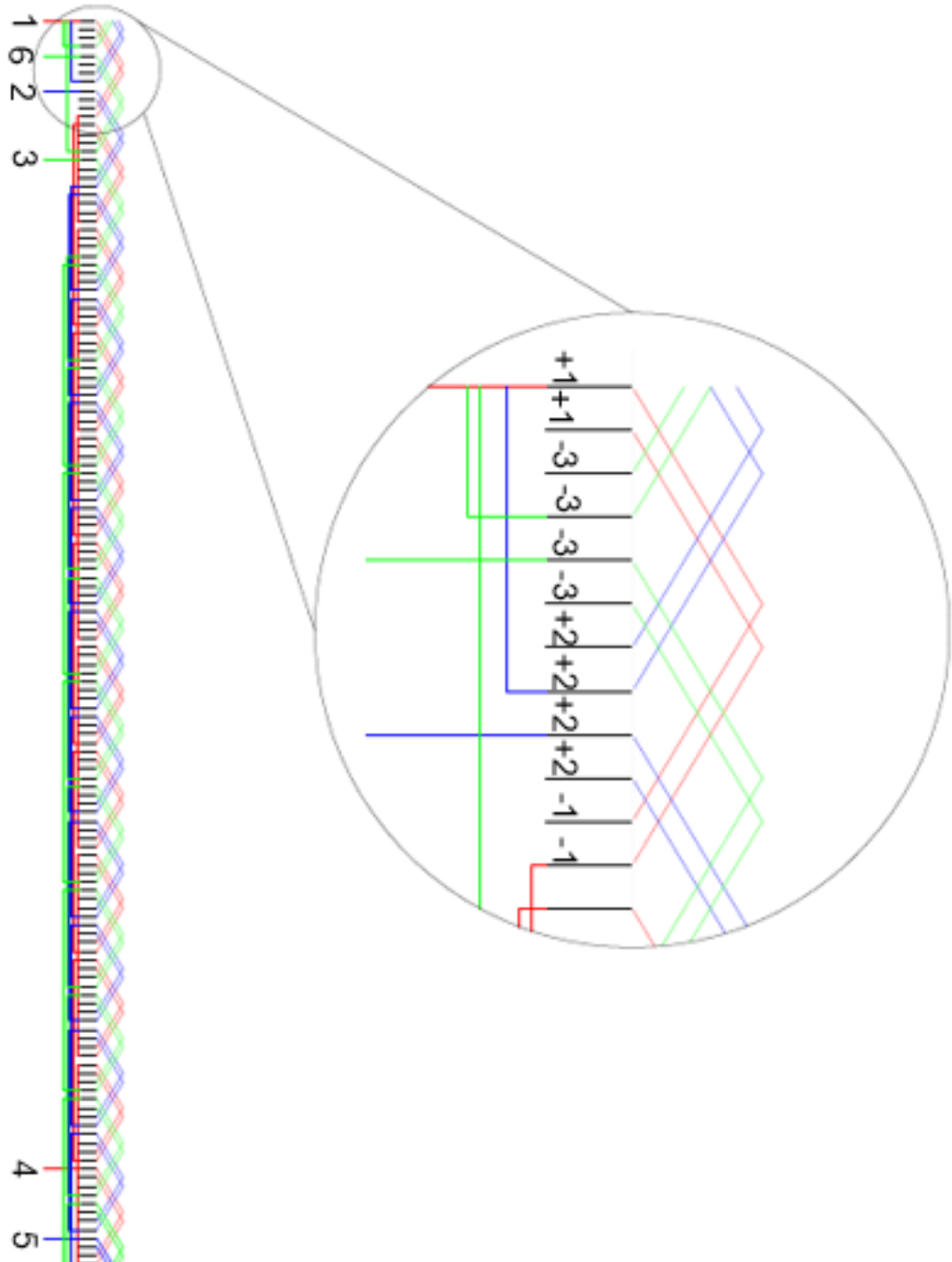
WEG. **Motores Síncronos**. 2003.

WEG. **Características e especificações de geradores**, 2017. 84 p. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y68vtalw>> Acesso em: 25 set. 2018.

ZAFALON, Joelmir. **Grau de proteção (IP)**. Brasil. 2019. <<https://tinyurl.com/y5gsdccj>> Acesso em: 02 mar. 2019.

APÊNDICE A – ESQUEMA DE BOBINAGEM PARA 72 RANHURAS E 12 POLOS

APÊNDICE B – ESQUEMA DE BOBINAGEM PARA 144 RANHURAS E 12 POLOS



ANEXO A – TABELA DE CABOS NOVAÇON



Tabela de fios AWG

Esta tabela informa as características das diversas bitolas A.W.G.

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	Kg por Km	Resistência (ohms/Km)	Capacidade (A)
0000	11,86	107,2			0,158	319
000	10,40	85,3			0,197	240
00	9,226	67,43			0,252	190
0	8,252	53,48			0,317	150
1	7,348	42,41		375	1,40	120
2	6,544	33,63		295	1,50	96
3	5,827	26,67		237	1,63	78
4	5,189	21,15		188	0,80	60
5	4,621	16,77		149	1,01	48
6	4,115	13,30		118	1,27	38
7	3,665	10,55		94	1,70	30
8	3,264	8,36		74	2,03	24
9	2,906	6,63		58,9	2,56	19
10	2,588	5,26		46,8	3,23	15
11	2,305	4,17		32,1	4,07	12
12	2,053	3,31		29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63		23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	66,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23
29	0,2859	0,064	32,4	0,57	265,6	0,18
30	0,2546	0,051	35,6	0,45	333,3	0,15
31	0,2268	0,040	39,8	0,36	425,0	0,11
32	0,2019	0,032	44,5	0,28	531,2	0,09
33	0,1798	0,0254	56,0	0,23	669,3	0,072