

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA  
PARAÍBA  
CAMPUS JOÃO PESSOA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Antonio Batista dos Santos Néto  
Arthur Nóbrega Interaminense

**MÉTODO PARA APROVEITAMENTO DE ESTATOR E  
ROTOR DE MOTORES DE INDUÇÃO PARA CONCEPÇÃO  
DE GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE**

JOÃO PESSOA - PB

2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA  
PARAÍBA  
CAMPUS JOÃO PESSOA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIO BATISTA DOS SANTOS NÉTO  
ARTHUR NÓBREGA INTERAMINENSE

**MÉTODO PARA APROVEITAMENTO DE ESTATOR E  
ROTOR DE MOTORES DE INDUÇÃO PARA CONCEPÇÃO  
DE GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE**

Trabalho de conclusão de curso  
submetido à coordenação de Engenharia  
Elétrica do Instituto Federal da Paraíba  
como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do título de engenheiro  
eletricista.

Orientador: Prof. Dr. José Artur Alves  
Dias

JOÃO PESSOA - PB

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

S237m Santos Néto, Antonio Batista dos.

Método para aproveitamento de estator e rotor de motores de indução para concepção de gerador síncrono de imã permanente / Antonio Batista dos Santos Neto, Arthur Nóbrega Interaminense. – 2025.

65 f. : il.

TCC (Graduação – Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Controle e Processos Industriais / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

Orientação : Prof. Dr. José Arthur Alves Dias.

1. Gerador. 2. MSIP. 3. Conversão eletromecânica. 4. Máquina síncrona de imã. I. Interaminense, Arthur Nóbrega. II. Título.

CDU 621.313.1(043)

Antonio Batista dos Santos Néto  
Arthur Nóbrega Interaminense

MÉTODO PARA APROVEITAMENTO DE ESTATOR E ROTOR DE MOTORES DE  
INDUÇÃO PARA CONCEPÇÃO DE GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE

Trabalho de conclusão de curso submetido à coordenação de engenharia elétrica do instituto federal da paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de engenheiro eletricitista.

Data de Aprovação: 20 / 02 / 2025

Aprovado por:

 Documento assinado digitalmente  
**JOSE ARTUR ALVES DIAS**  
Data: 26/03/2025 10:52:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. José Artur Alves Dias (Orientador)  
Instituto Federal da Paraíba

 Documento assinado digitalmente  
**ALVARO DE MEDEIROS MACIEL**  
Data: 26/03/2025 20:12:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Álvaro de Medeiros Maciel (avaliador)  
Instituto Federal da Paraíba

 Documento assinado digitalmente  
**FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA**  
Data: 27/03/2025 14:24:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Franklin Martins Pereira Pamplona (avaliador)  
Instituto Federal da Paraíba

João Pessoa - PB  
2025

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por me dar forças para chegar na reta final da graduação e permitir que meu trabalho de conclusão de curso fosse finalizado com êxito. Agradeço também aos meus pais, Bartolomeu de Sousa Interaminense Junior e Alinne Kelly Nóbrega Interaminense, por todo apoio e suporte durante esses anos, sem eles nada disso seria possível. De mesmo modo, lembrar da inspiração que tive nos professores Álvaro, Artur, Alan e Franklin, profissionais ímpares aos quais tenho como inspiração de conhecimento e dedicação.

### **Por Arthur Interaminense**

Olho estático para a tela do meu computador no meu quarto num dia chuvoso de janeiro e penso se conseguirei agradecer a todos que proporcionaram esse momento. Ao som das gotas que caem de pingo em pingo da minha janela, penso primeiro nos meus pais, dona Josefa Carla Venancio de Oliveira Santos, mulher forte e esperta de Bananeiras, da roça como ela sempre diz pra mim e ao meu pai, senhor Romualdo Batista dos Santos, homem educado de Sapé, artista das artes e leitor de literatura, ambos professores que me ensinaram a importância do saber e da ciência que esses profissionais possuem mais do que as salas de aulas mostram. Após, lembro-me da minha amada avó, dona Ambrozina, benzedeira que apartava as doenças alheias, que por muitos anos me acompanhou e me educou e moldou pela sua fé e que hoje percebo que fora minha primeira amiga, que Deus a tenha na Sua imensa misericórdia. Aproveito esse momento oportuno e agradeço a Nossa Senhora, que por meio da sua imagem acima de mim estende o seu véu de sabedoria e me guia nos momentos de estudo. Aos colegas da faculdade, muitos passaram pela minha vida acadêmica, vários nomes emergem na minha mente, todos são responsáveis pela formação do aluno e rapaz que a alguns anos atrás chegou em João Pessoa sozinho e sem amigos, lembro da nossas primeiras conversas, primeiramente agradeço a dupla sentada praticamente no final da biblioteca onde eu tive coragem de tirar uma dúvida sobre a aula, muito obrigado por me tirarem aquela dúvida, Victor e especialmente Sara, minha melhor amiga. Também agradeço ao menino que chegou atrasado para a aula e sentou do meu lado, ajudando-me quando eu estava perdido ao montar um circuito na placa de prototipagem, obrigado Eduardo. À menina que tentou me vender um adesivo de anime durante a aula, a qual neguei, e que hoje me proporcionou uma

experiência profissional incrível e, além disso, que me proporcionou sua amizade, obrigado Raylle. Agradeço ao meu grupo de amigos mais próximos da turma de Engenharia Elétrica de 2019.1 que desde o início encaram junto a mim as tristezas, estresses e conquistas deste caminho árduo trilhado nestes últimos anos, para Ramalho, Veloso e Ildja, meus sinceros agradecimentos. Por fim, agradeço a Arthur, colega que me acompanha com a feitura deste presente trabalho que finaliza mais uma etapa da minha vida e aos professores que me acompanharam nesta última curva no meu percurso acadêmico, especialmente ao professor José Artur Alves que dirigiu toda a realização deste projeto e ao professor Álvaro Maciel, que me inspira e me guia para me tornar um bom profissional, justo e de valores.

**Por Antonio Batista**

## RESUMO

O proposto trabalho tem como objetivo o estudo e o desenvolvimento de um gerador construído como uma máquina síncrona de ímã permanente (MSIP). A partir de uma força mecânica, será possível movimentar o acionador primário, e conseqüentemente, o rotor da máquina, onde estarão dispostos os ímãs. Assim, uma vez que o rotor está envolvido pelas bobinas do estator, esse movimento induz uma tensão nas bobinas, através da lei de Faraday: quando há variação de fluxo de campo magnético em algum circuito condutor, como em uma bobina, uma força eletromotriz induzida (tensão elétrica) surge nesse condutor. Além disso, parâmetros obtidos e escolhidos são expostos ao longo do trabalho, como o impacto da quantidade de polos na máquina, a área da seção dos condutores, as dimensões físicas do rotor e do estator, a corrente de proteção para evitar a desmagnetização dos ímãs e etc. Além da descrição dos parâmetros também serão apresentados os cálculos matemáticos para obtenção de tais valores, bem como gráficos comparativos entre resultados, simulações realizadas ao longo do projeto e estudo das perdas ao longo do processo de conversão eletromecânica de energia. Ao final, será exposto o protótipo final juntamente com os resultados obtidos. Assim, será possível compará-los com aqueles esperados durante o início do projeto.

Palavras-chave: Gerador, MSIP, conversão eletromecânica.

## ABSTRACT

The proposed work aims to study and develop a wind turbine built with a permanent magnet synchronous machine (MSIP). Using the mechanical force provided by the wind, it will be possible to move the primary driver, and consequently, the machine's rotor, where the magnets will be arranged. Thus, once the rotor is surrounded by the stator coils, this movement induces a voltage in the coils, through Faraday's law: when there is a variation in the magnetic field flow in some conductive circuit, such as in a coil, an electromotive force is induced (electrical voltage) arises in this conductor. Furthermore, parameters obtained and chosen will be exposed throughout the work, such as the impact of the number of poles in the machine, the section area of the conductors, the physical dimensions of the rotor and stator, the protection current to avoid demagnetization of the magnets, etc. In addition to the description of the parameters, mathematical calculations to obtain such values will also be presented, as well as comparative graphs between results, simulations carried out throughout the project and study of losses throughout the electromechanical energy conversion process. At the end, the final prototype will be exposed along with the results obtained. This way, it will be possible to compare them with those expected during the beginning of the project.

Keywords: Wind turbine, MSIP, electromechanical conversion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões médias do ciclo de vida do CO <sub>2</sub> .....	16
Figura 2 -Componentes da Geração Eólica.....	17
Figura 3 - Fasores de regime permanente da MSIP.....	18
Figura 4 - (a) Seção reta do rotor de uma típica máquina CA de ímã permanente superficial (b) Distribuição de fluxo em circuito aberto.....	21
Figura 5 - Densidade real e efetiva no entreferro considerando ímãs de superfície.....	24
Figura 6 - THD de Bgm até o 13º harmônico.....	25
Figura 7 - Forma aproximada das linhas de fluxo entrando em uma armadura ranhurada.....	26
Figura 8 - Seções transversais de um motor de ímãs permanentes de dois pólos com ímãs de superfície.....	28
Figura 9 - Bobina concentrada de passo completo, incluindo os efeitos da abertura de ranhura. 31	
Figura 10 - Circuito equivalente para MSIP.....	40
Figura 11 - Perfil de geração de potência e tensão.....	42
Figura 12 - Perfil de geração de potência e corrente.....	42
Figura 13 - Simulação dinâmica.....	43
Figura 14 - Bloco de parametrização.....	44
Figura 15 - Parâmetros eletromagnéticos.....	45
Figura 16 – Comparação da simulação dinâmica e do modelo de regime permanente proposto em [5].....	46
Figura 17 - Partes constituintes do gerador.....	48
Figura 18 - Dimensões da carcaça utilizada.....	50
Figura 19 - Esquemático da distribuição das bobinas.....	50
Figura 20 - Versão final do rotor.....	51
Figura 21 - Visão frontal do gerador com rotor alinhado no estator.....	52
Figura 22 - Geração de tensão e potência.....	55
Figura 23 - Variáveis construtivas do núcleo.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MSIP	Máquina síncrona a ímã permanente
SEP	Sistema elétrico de potência
GSIP	Geradores síncronos de ímã permanente
GIDA	Geradores de indução de dupla alimentação
T	Tesla
B	Densidade de fluxo
$B_{gm}$	Densidade de fluxo no entreferro
P	Número de pólos
$W_e$	Frequência elétrica
$\alpha_m$	Ângulo de distorção
$W_m$	Frequência mecânica
THD	Distorção harmônica total
$D_{is}$	Diâmetro interno núcleo do rotor até a parede interna do estator
$l_e$	Comprimento axial efetivo do estator
$K_{s1}$	Densidade de corrente dentro dos enrolamentos do estator
$K_s$	Corrente RMS por unidade de comprimento da circunferência do estator
$K_1$	Fator de enrolamento
$N_s$	Número de espiras série por fase
F	Força magnética
FMM	Força magnetomotriz
g	Comprimento do entreferro
$I_s$	Corrente de fase RMS
$C_e$	Conjugado elétrico
$P_m$	Potência mecânica
$\omega_m$	Velocidade angular
$k_{\chi h}$	Fator de abertura de ranhura

$h$	Ordem da componente harmônica
$\chi$	Largura de abertura da ranhura
$k_{ph}$	Fator de passo
$q$	Número de bobinas por grupo
$k_{dh}$	Fator de distribuição harmônica
$\gamma$	Ângulo elétrico entre duas ranhuras consecutivas
$k_{sh}$	Fator de distorção harmônica
$\alpha_s$	Ângulo de distorção
$k_h$	Fator de enrolamento
$I_{s(máx)}$	Corrente máxima de desmagnetização
$R_{cu}$	Resistência do cobre
$P_{máx}$	Potência máxima
RPM	Rotações por minuto
$A_g$	Área do grupo/bobina
$V_{FASE}$	Tensão de fase
$V_{LINHA}$	Tensão de linha
$V_{máx}$	Tensão máxima
$V_{QT}$	Valor de queda de tensão
$P_{CU}$	Potência dissipada no cobre
$t_s$	Passo dos dentes, igual a 8,9 mm;
$t_r$	Largura do dente base, igual a 7,0 mm;
$t_t$	Largura do dente da face, igual a 5,0 mm;

$d_s$	Tamanho do dente, igual a 13,5 mm;
$d_{cs}$	Largura da coroa, igual a 19,0 mm;
$b_s$	Largura da ranhura base, igual a 7,0 mm;
$b_0$	Largura da ranhura base, igual a $b_s$ ;
$P_D$	Potência nos dentes
$V_D$	Volume dos dentes
$P_D$	Perdas na coroa
$P_{VC}$	Perdas por volume
$P_T$	Perdas totais do sistema
R	Rendimento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Contexto histórico.....	14
1.2 Máquinas síncronas de ímã permanente na geração de energia eólica de baixa e médio potência.....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO.....</b>	<b>19</b>
2.1 Estator.....	19
2.2 Rotor.....	20
2.3 Densidade de fluxo.....	21
<b>3. MÉTODO PARA CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA DE IMÃ PERMANENTE A PARTIR DE ESTADORES DE MÁQUINA DE INDUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
3.1 Densidade de fluxo de entreferro.....	23
3.2 Definição do THD da densidade de fluxo espacial.....	25
3.3 Comprimento efetivo do entreferro e o coeficiente de carter.....	26
3.4 Força magnética.....	27
3.5 Determinação de $K_{s1}$ e $K_s$ .....	28
3.7 Conjugado elétrico.....	29
3.8 Tensão de cisalhamento magnético.....	29
3.9 Fatores, coeficientes e componentes harmônicos.....	30
3.9.1 Fator aberturas das ranhuras ( $k_h$ ).....	30
Efeitos das Aberturas de Ranhura.....	30
3.9.2 Fator de passo ( $k_{ph}$ ).....	32
3.9.3 Fator de distribuição harmônica ( $k_{dh}$ ).....	32
Efeitos do Fator de Distribuição:.....	33
3.9.4 Fator de distorção harmônica ( $k_{sh}$ ).....	33
3.9.5 Fator de enrolamento ( $k_h$ ).....	34
3.10 Proteção contra desmagnetização dos ímãs.....	34
a) Escolha de Material Adequado.....	34
b) Limitar a Corrente Máxima.....	34
c) Proteção Térmica.....	35
<b>4. DESCRIÇÃO DA PLANILHA E DE APOIO DO PROJETO.....</b>	<b>36</b>
Parâmetros de Entrada:.....	36
Parâmetros de Saída:.....	38
<b>5. MODELO REGIME PERMANENTE.....</b>	<b>40</b>
5.1 Circuito equivalente.....	40
5.2 Simulações MATLAB.....	41
5.3 Simulação dinâmica do gerador síncrono de ímã permanente.....	43
<b>6. PROJETO GERADOR 300W A PARTIR DE UM ESTATOR DE MOTOR DE INDUÇÃO DE 1/5CV.....</b>	<b>48</b>

6.1 Dados de entrada.....	48
Exemplos de dados de entrada.....	48
Exemplos de dados de saída.....	49
6.2 Rotor.....	51
6.3 MSS da máquina.....	52
6.4 Expectativas de geração de potência e tensão.....	54
6.5 Estimativas de perdas totais e rendimento.....	55
6.6 Desafios e dificuldades encontradas.....	58
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO A - PLANILHA DE APOIO AO PROJETO.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO B - ROTINAS DO MATLAB.....</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, impulsionada pelo aumento populacional e pelo desenvolvimento industrial, tem promovido um intenso debate sobre as melhores tecnologias para a geração, transmissão e distribuição de eletricidade. Neste cenário, as máquinas síncronas emergem como elementos essenciais, especialmente no contexto da geração de energia de grande escala, como em usinas hidrelétricas, térmicas, nucleares e em sistemas híbridos e com fontes renováveis, e, principalmente, quanto ao despacho energético.

No processo de geração de energia elétrica, as máquinas síncronas possuem características únicas que as diferenciam de outras tecnologias de conversão de energia. Sua capacidade de operar em sincronia com a rede elétrica, mantendo a frequência e a tensão dentro de limites controlados, é característica fundamental para garantir a estabilidade e a confiabilidade de um sistema elétrico de potência. Além disso, essas máquinas permitem um controle mais preciso sobre o fluxo de potência ativa e reativa, o que é indispensável em sistemas de grande porte.

Neste trabalho, propõe-se a construção de um protótipo de máquina síncrona à ímã permanente, e sua possível aplicabilidade em sistemas de geração de energia eólica. Em geração eólica de baixa e média potência, sua velocidade é função da velocidade dos ventos, que possui características estocásticas, nesses casos a operação com conversores estáticos é fundamental. Com o avanço da tecnologia de ímãs permanentes às máquinas síncronas ganharam um grande impulso, esse tipo de tecnologia tem ganhado destaque em aplicações renováveis, de conversão eletromecânica, como turbinas eólicas, e também em sistemas industriais e de geração distribuída. O desenvolvimento do protótipo contempla desde a modelagem teórica até a implementação prática, com foco nas seguintes etapas:

- Projeto baseado em carcaças já existentes de motores de indução trifásicos;
- Construção de uma planilha de apoio ao projeto;
- Determinação do modelo de regime permanente;
- Elaboração de um programa em script em Matlab para simulação dos limites da geração;
- Proposta de um gerador de 300W com carcaça de motor de  $\frac{1}{2}$  CV.

## 1.1 Contexto histórico

As máquinas síncronas são fundamentais na conversão de energia mecânica em elétrica, desempenhando um papel crucial na geração de energia elétrica em larga escala. Sua principal aplicação é como geradores em usinas hidrelétricas, térmicas e nucleares, onde convertem a energia mecânica proveniente de turbinas em energia elétrica. Além disso, as máquinas síncronas possuem a capacidade de controlar o fator de potência, podendo operar com fator de potência indutivo, capacitivo ou unitário, mediante ajustes na corrente de campo. Essa flexibilidade permite uma melhor gestão da potência reativa no sistema elétrico, contribuindo para a regulação da tensão e melhoria da eficiência energética.

Com o avanço das tecnologias, as máquinas síncronas equipadas com ímãs permanentes têm ganhado destaque, especialmente em aplicações que requerem respostas rápidas e operação em velocidade variável. Essas máquinas oferecem maior eficiência e menor necessidade de manutenção em comparação com as máquinas tradicionais, tornando-se uma opção atraente para diversas aplicações industriais e de geração distribuída, como em pequenas centrais hidrelétricas e em aplicações industriais.

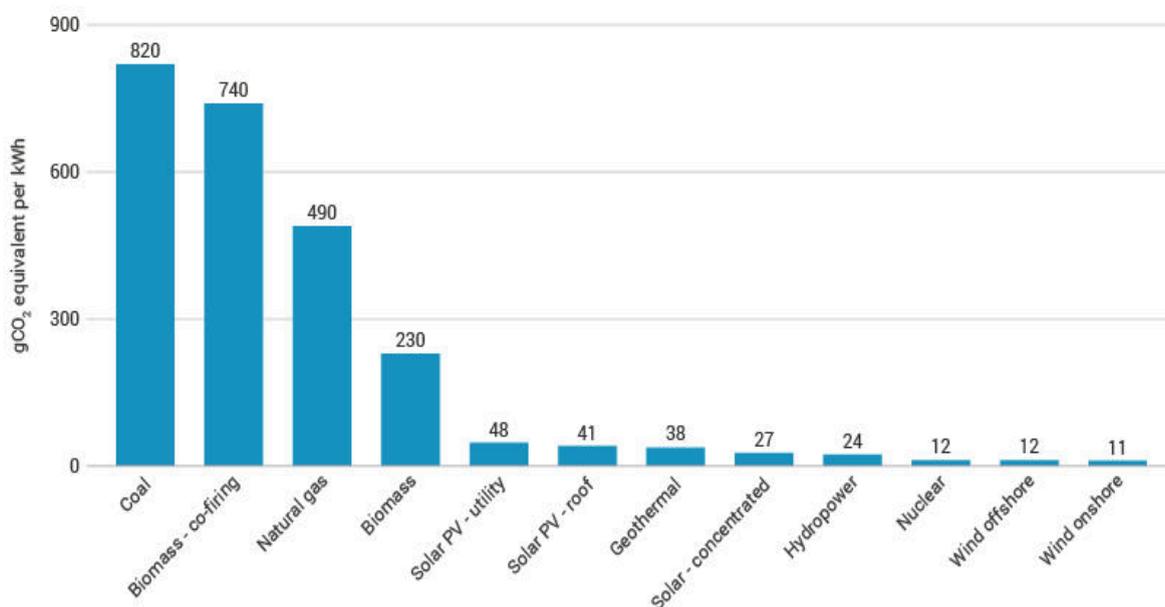
As máquinas síncronas a ímã permanente têm sido cada vez mais empregadas na indústria brasileira e em soluções de mobilidade elétrica. Indústrias que demandam motores de alta eficiência para equipamentos de precisão, como fabricação de produtos eletrônicos e automação industrial, têm adotado essa tecnologia devido ao seu desempenho superior. Mais recentemente, sua aplicação expandiu-se para incluir sistemas híbridos e tecnologias renováveis, como turbinas eólicas e sistemas fotovoltaicos combinados com armazenamento de energia.

No Brasil, onde a intermitência de fontes renováveis como eólica e solar pode ser um desafio, as máquinas síncronas à ímã permanente desempenham um papel importante no suporte à estabilidade do sistema. Elas ajudam a regular a frequência e a tensão, contribuindo para a confiabilidade da rede elétrica. Além disso, sua eficiência energética auxilia na redução de perdas no sistema de geração e transmissão.

O verdadeiro avanço na tecnologia de energia eólica ocorreu durante as crises do petróleo na década de 1970, que incentivaram o desenvolvimento de fontes de energia alternativas. Desde então, a tecnologia das turbinas eólicas evoluiu significativamente,

tornando-se mais eficiente e econômica. Atualmente, a energia eólica é uma das principais fontes de energia renovável.

Os parques eólicos, tanto onshore (em terra) quanto offshore (no mar), estão proliferando ao redor do mundo, contribuindo substancialmente para a matriz energética global e ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (figura 1). Anualmente, as emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) resultantes da queima de combustíveis fósseis alcançam aproximadamente 34 bilhões de toneladas. Desse total, cerca de 45% são provenientes do carvão, 35% do petróleo e 20% do gás natural. Segundo a *US NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES* (1979), no relatório *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*, “O principal fator limitante na produção de energia a partir de combustíveis fósseis nas próximas décadas pode ser os efeitos climáticos da liberação de dióxido de carbono”[1]. Nos dias atuais, o CO<sub>2</sub> impacta o meio ambiente e repercute como uma questão urgente e desempenha um papel crucial na definição das estratégias para a geração de eletricidade. Assim, a geração de energia elétrica a partir da energia eólica é um processo sofisticado que transforma a força natural do vento em eletricidade utilizável. Com uma história que se estende por milênios, a energia eólica evoluiu de simples dispositivos mecânicos para se tornar uma peça central na busca por um futuro energético sustentável. Hoje, ela representa uma solução crucial para os desafios ambientais e energéticos que enfrentamos, destacando-se como uma das fontes de energia mais promissoras e em rápido crescimento no mundo [2].

Figura 1 - Emissões médias do ciclo de vida do CO<sub>2</sub>

Fonte - IPCC

Uma justificativa importante para a relevância deste trabalho é que, além de promover uma baixa emissão de poluentes, a geração eólica também contribui para a reutilização de materiais, como carcaças provenientes de lixo eletrônico, evitando seu descarte inadequado no meio ambiente.

## 1.2 Máquinas síncronas de ímã permanente na geração de energia eólica de baixa e médio potência

A geração de energia elétrica a partir da energia eólica é um processo que envolve a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica utilizável. Este processo é realizado através de aerogeradores que são compostos por alguns componentes principais, Figura 2:

- Vento: O vento é o movimento do ar na atmosfera causado por diferenças de pressão geradas pelo aquecimento desigual da superfície terrestre pelo Sol. Esse fenômeno é a força motriz da energia eólica, uma fonte renovável essencial para a transição energética sustentável.

- Pás da Turbina: As pás, geralmente três, são projetadas para aproveitar a energia cinética do vento. Quando o vento ‘sopra’, ele gera uma força que faz com que as pás girem.
- Rotor: As pás estão conectadas a um rotor. Quando as pás giram, o rotor também gira.
- Eixo: O movimento do rotor é transferido através de um eixo que está ligado a um gerador.
- Gerador: O gerador converte a energia mecânica do eixo em energia elétrica através do movimento de um ímã ao redor de uma bobina de fio condutor.
- Conversor Estático: A eletricidade gerada é então enviada para um conversores estáticos que condicionam as variações de tensão e frequência vindas do comportamento estocástico dos ventos.
- Rede Elétrica: Finalmente, a energia elétrica é transmitida através da rede para residências, empresas e outros consumidores.

Figura 2 -Componentes da Geração Eólica



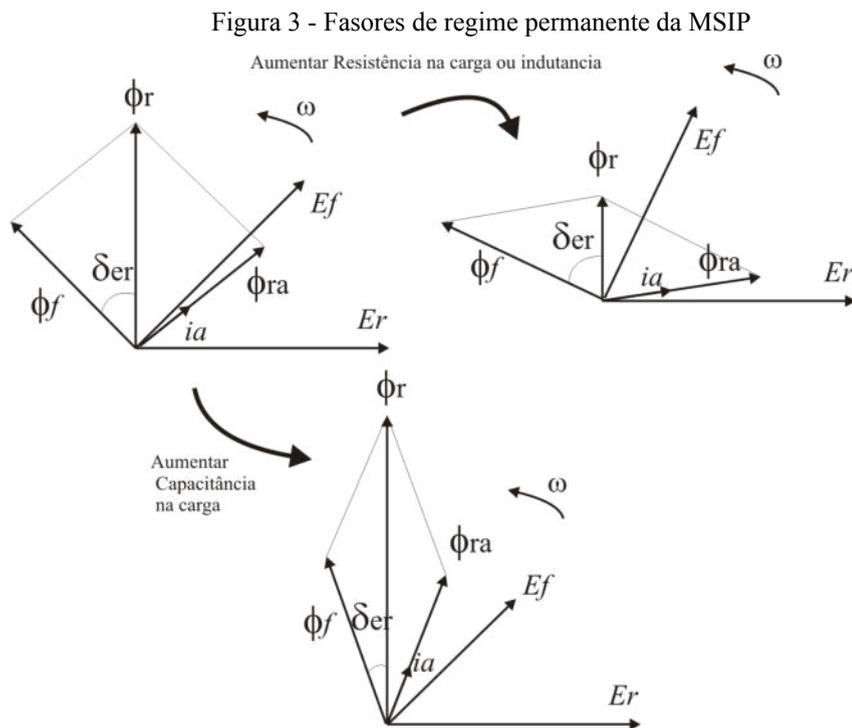
Fonte - [3]

Atualmente, no Sistema Elétrico de Potência (SEP), a geração de energia eólica usa turbinas com máquinas síncronas de ímã permanente em seu projeto. Em oposição às demais máquinas síncronas convencionais, os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs

permanentes, desse jeito modificando a estrutura do rotor. As máquinas síncronas com ímãs permanentes, além de serem polifásicas, apresentam uma nova abordagem para os engenheiros projetistas, já que a substituição dos enrolamentos por ímãs permanentes traz novas considerações e desafios. Além do custo elevado e a dificuldade mais complexa na construção, a temperatura a qual os ímãs serão submetidos será considerado, pois, por exemplo, no neodímio-ferro-boro (NdFeB), material amplamente utilizado neste setor, o fluxo magnético gerado pelo mesmo diminui, assim proporcionando redução na tensão gerada e produção do conjugado.

O fluxo resultante da máquina é controlado exclusivamente pela carga, Figura 3, quando a carga é resistiva ou indutiva, o fluxo resultante diminui, reduzindo a tensão terminal. Por outro lado, se a carga for capacitiva, o fluxo aumenta, elevando a tensão terminal, essa característica representa uma desvantagem em relação à máquina síncrona de rotor enrolado e coletor, que permite um controle mais preciso sobre o campo da máquina.

Para contornar essa limitação, os conversores estáticos desempenham um papel fundamental, garantindo a compatibilização entre a máquina e o sistema elétrico. Além disso, a reação da armadura exerce uma função essencial ao evitar que o rotor acelere excessivamente. Para esse controle, utilizam-se resistências de amortecimento, *damping*, que atuam na frenagem da máquina em condições de baixa carga, prevenindo que o rotor atinja velocidades perigosas para a estrutura mecânica.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO

Após introduzir o conceito da conversão eletromecânica na energia eólica e apresentar os diversos tipos de máquinas rotativas presentes nos aerogeradores, será apresentada a fundamentação teórica dos princípios que regem a máquina e o por que da escolha das dimensões das estruturas físicas e alguns parâmetros, como corrente, densidade de fluxo e etc.

### 2.1 Estator

O núcleo do estator é formado por laminados de aço silício, que são empilhados e isolados uns dos outros para reduzir as perdas por correntes parasitas. Os enrolamentos são dispostos de maneira a gerar um campo magnético rotativo quando uma corrente alternada trifásica é aplicada. O uso de laminados reduz a área em que essas correntes podem circular, diminuindo as perdas e aumentando a eficiência do gerador.

Os enrolamentos trifásicos do estator são feitos de fios de cobre, isolados entre si e dispostos em ranhuras ao longo do núcleo do estator. Esses enrolamentos são organizados de forma a criar um campo magnético girante quando uma corrente alternada trifásica é aplicada. Este campo magnético girante, que só aparece quando existe carga elétrica nos terminais, é essencial para a operação da MSIP, pois interage com o campo magnético dos ímãs permanentes no rotor para gerar eletricidade. Desse modo, a principal função do estator é gerar um campo magnético girante que interage com o campo magnético dos ímãs permanentes no rotor. Quando o rotor gira devido a atuação do acionador primário, os ímãs permanentes criam um campo magnético que corta os enrolamentos do estator, induzindo uma tensão elétrica neles. Esta tensão é então convertida em corrente elétrica, que pode ser utilizada para alimentar a rede ou sistemas isolados.

Uma das principais vantagens do estator em máquinas síncronas de ímã permanente é a alta eficiência na conversão de energia. A ausência de escovas e anéis coletores reduz significativamente as perdas por fricção e melhora a confiabilidade e a durabilidade do sistema. Além disso, a construção robusta do estator permite operar em condições ambientais adversas, como em parques eólicos offshore, onde a manutenção pode ser difícil e cara.

O design do estator é crucial para o desempenho geral da máquina. Fatores como o número de ranhuras, o tipo de enrolamento, a qualidade do material do núcleo e o método de

resfriamento afetam a eficiência, a confiabilidade e a vida útil do gerador. O estator deve ser projetado para minimizar as perdas elétricas e térmicas, garantindo ao mesmo tempo a robustez mecânica necessária para suportar as forças magnéticas e vibracionais durante a operação. Além disso, devido às altas correntes elétricas que passam pelos enrolamentos, o estator pode aquecer significativamente. Um sistema de resfriamento eficiente é essencial para manter a temperatura dentro de limites seguros e prevenir danos aos enrolamentos e ao núcleo. Sistemas de resfriamento a ar e a líquido são comumente usados, dependendo do tamanho e da aplicação da máquina. [5]

## 2.2 Rotor

O rotor de uma MSIP é composto por ímãs permanentes que são fixados em uma estrutura sólida e rotativa. Esses ímãs são normalmente feitos de materiais de terras raras, como neodímio, devido à sua alta força magnética e estabilidade. A disposição dos ímãs no rotor é cuidadosamente projetada para criar um campo magnético uniforme e eficiente. Assim, quando o rotor gira devido a uma força, os ímãs permanentes criam um campo magnético estático. Este campo magnético corta os enrolamentos do estator, induzindo uma corrente elétrica nos mesmos através do princípio da indução eletromagnética. A rotação do rotor é essencial para manter o fluxo de corrente elétrica e, conseqüentemente, a geração de energia.

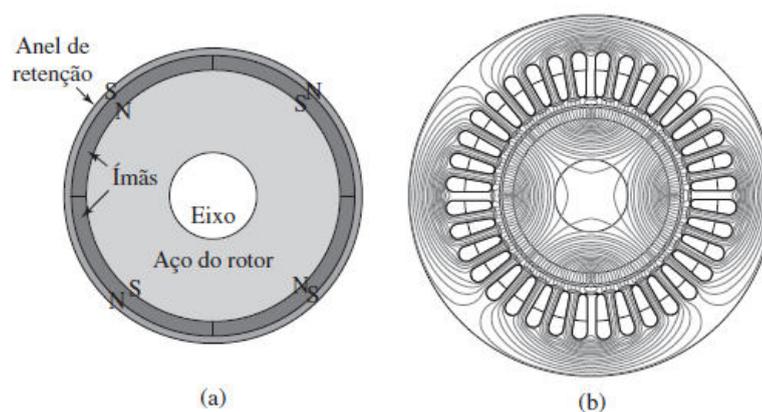
O rotor em máquinas síncronas de ímã permanente oferece várias vantagens:

- Alta Eficiência: Os ímãs permanentes proporcionam um campo magnético constante e forte, resultando em uma eficiência de conversão de energia mais elevada em comparação com outros tipos de geradores.
- Baixa Manutenção: A ausência de componentes móveis, como escovas e anéis coletores, reduz a necessidade de manutenção, aumentando a confiabilidade e a vida útil do gerador.
- Design Compacto: Os ímãs permanentes permitem um design mais compacto e leve do rotor, o que é vantajoso em aplicações onde o espaço e o peso são limitados.

O design do rotor é crítico para garantir o desempenho ideal do gerador. A distribuição e a orientação dos ímãs permanentes devem ser cuidadosamente projetadas para maximizar o fluxo magnético e minimizar as perdas. Além disso, a resistência mecânica do rotor deve ser levada em consideração para garantir sua durabilidade e integridade estrutural.

Uma ilustração da disposição dos ímãs permanentes no rotor e da distribuição do fluxo magnético são mostradas na Figura 4.

Figura 4 - (a) Seção reta do rotor de uma típica máquina CA de ímã permanente superficial (b) Distribuição de fluxo em circuito aberto.



Fonte - [4]

## 2.3 Densidade de fluxo

A densidade de fluxo magnético, também conhecida como indução magnética, é uma medida fundamental em geradores de ímã permanente. Nas MSIPs, a densidade de fluxo magnético representa a intensidade do campo magnético gerado pelos ímãs permanentes ao longo do circuito magnético do gerador. Essa densidade é crucial para determinar a eficiência e a eficácia do gerador na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Nos geradores, ímãs feitos de materiais como neodímio ferro-boro (NdFeB) ou samário-cobalto (SmCo) são posicionados em torno do rotor. Quando o rotor gira, o campo magnético induz uma força eletromotriz (fem) nas bobinas, de acordo com a lei de Faraday da indução eletromagnética. Em um gerador de ímã permanente, a densidade de fluxo magnético é maximizada pela escolha de ímãs com alta remanência magnética e pela otimização do design do circuito magnético para minimizar as perdas e maximizar a concentração do fluxo nas áreas onde as bobinas estão localizadas.

A densidade de fluxo magnético é influenciada por vários fatores, incluindo a qualidade e o tipo dos ímãs, a geometria do gerador, a distância entre os ímãs e as bobinas, e a presença de materiais ferromagnéticos que podem concentrar ou dispersar o campo

magnético. Ímãs de alta qualidade, como os de neodímio, são frequentemente utilizados devido à sua alta densidade de fluxo magnético residual, o que permite a geração de campos magnéticos fortes e consistentes. No contexto de operação, a densidade de fluxo magnético deve ser cuidadosamente controlada para evitar a saturação do material no circuito magnético, o que pode levar a uma redução na eficiência do gerador. Além disso, variações na densidade de fluxo magnético podem afetar a tensão e a corrente geradas, impactando diretamente o desempenho elétrico do gerador. Portanto, a densidade de fluxo magnético é um parâmetro crítico no design e na operação das MSIPs. A otimização desse parâmetro permite maximizar a eficiência energética e garantir a produção estável e eficiente de eletricidade em diversas aplicações, desde pequenos dispositivos portáteis até grandes sistemas de geração de energia renovável.

### 3. MÉTODO PARA CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA DE IMÃ PERMANENTE A PARTIR DE ESTADORES DE MÁQUINA DE INDUÇÃO

Esta seção apresentará os parâmetros e equações utilizadas para o funcionamento da máquina, no entanto, os valores finais encontrados serão posteriormente apresentados em outra seção.

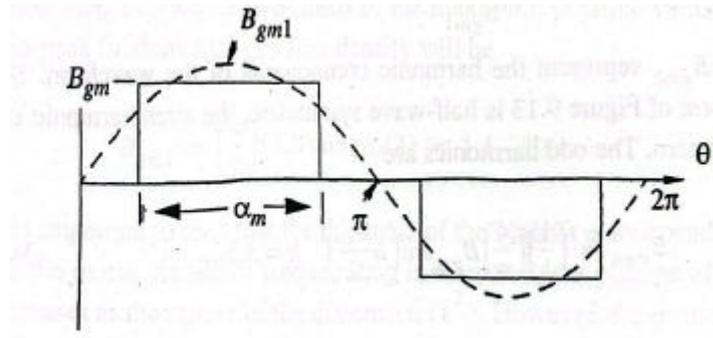
#### 3.1 Densidade de fluxo de entreferro

Para o funcionamento pleno e eficaz da MSIP, o fator da densidade de fluxo no entreferro ( $B_{gm}$ ) é essencial para que os ímãs utilizados na construção da máquina tenham um desempenho magnético adequado. Vale destacar que, inicialmente, será feita uma estimativa da densidade de fluxo, tendo em vista que o comprimento efetivo do entreferro é maior que o entreferro real,  $g_m$ , devido ao ranhuramento do estator e aos efeitos da saturação no núcleo do estator.

A densidade de fluxo no entreferro da máquina é limitada pela saturação magnética nos dentes do estator. Sendo para máquinas de indução, esse valor é maximizado quando cerca de metade da periferia do estator é utilizada para os dentes e a outra metade para as ranhuras. O valor para  $B_{gm}$  é de 0,85 a 0,95 T, ou cerca de 75% a 85% da  $B_r$  para ímãs  $g_m$  de Nd-Fe-B. [5]

Ao longo do movimento do rotor, é gerado uma variação de fluxo no entreferro, logo ele segue a tendência da Figura 5, o qual tende ao formato de uma senóide, para ímãs permanentes sobrepostos:

Figura 5 - Densidade real e efetiva no entreferro considerando ímãs de superfície



Fonte - [6]

A componente espacial fundamental ou efetiva ( $B_{gm1}$ ) da densidade de fluxo magnético no entreferro pode então ser determinada como:

$$B_{gm1} = \frac{4}{\pi} \cdot B_{gm} \cdot \text{Sen} \left( \frac{\alpha_m}{2} \right) \quad (\text{T}) \quad (1)$$

Onde:

- $B_{gm1}$  = componente espacial fundamental ou efetiva da densidade de fluxo magnético no entreferro;
- $B_{gm}$  = densidade de fluxo no entreferro;
- $\alpha_m$  = Ângulo de distorção;
- T = densidade de fluxo magnético, Tesla.

$$\text{Sendo, } \alpha_m = \frac{Pw_m}{D_{is}} \quad (\text{rad}) \quad (2)$$

A equação 2 representa o ângulo de distorção  $\alpha_m$  que se relaciona com o deslocamento do ímã ao redor do estator, sendo:

- $w_m$  = frequência mecânica;
- $D_{is}$  = diâmetro interno do ímã.

Valores típicos de  $\alpha_m$  são 110° a 160°. O valor de 120° é o mais frequente utilizado e será utilizado no projeto, pois tende a reduzir harmônicos de conjugado elétrico. [6]

### 3.2 Definição do THD da densidade de fluxo espacial

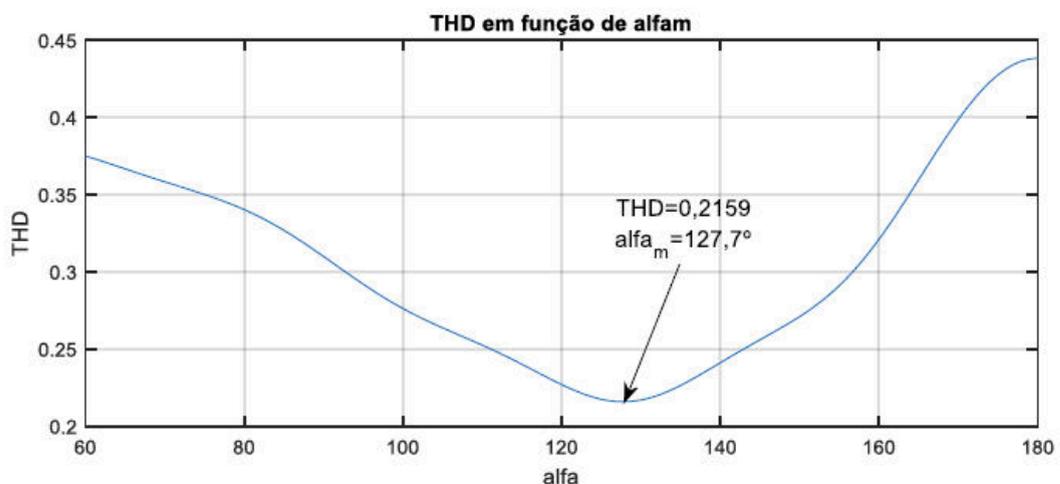
A distorção harmônica total (THD) é uma medida da quantidade de ocorrência em um sinal devido à presença de componentes prejudiciais além da frequência fundamental. É expressa como a relação entre a soma das potências dos harmônicos e a potência do componente fundamental. Valores mais baixos de THD indicam um sinal mais próximo da forma de onda ideal, sendo importante em sistemas elétricos.

THD da densidade de fluxo no entreferro em função de  $\alpha_m$  :

$$THD(\alpha_m) = \sqrt{\left[\frac{1}{3}\text{sen}\left(3\frac{\alpha_m}{2}\right)\right]^2 + \left[\frac{1}{5}\text{sen}\left(5\frac{\alpha_m}{2}\right)\right]^2 + \left[\frac{1}{7}\text{sen}\left(7\frac{\alpha_m}{2}\right)\right]^2 \dots}$$

(3)

Figura 6 - THD de  $B_{gm}$  até o 13º harmônico.



Fonte - MATLAB/ Autoria própria

### 3.3 Comprimento efetivo do entreferro e o coeficiente de carter

O coeficiente de Carter é um fator de correção utilizado para ajustar o cálculo do entreferro efetivo, considerando as irregularidades causadas pelas ranhuras no estator e/ou rotor. Essas ranhuras fazem com que as linhas de fluxo magnético se concentrem nas áreas dos dentes, reduzindo a uniformidade do campo magnético no entreferro. Desse modo, o comprimento efetivo do entreferro é dado pelas seguintes expressões:

$$g_e = k_c \cdot g \quad (11)$$

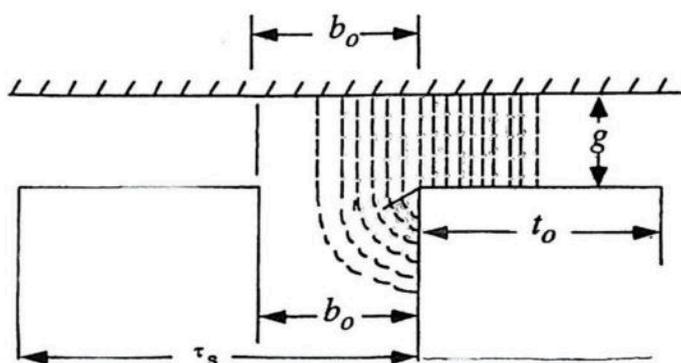
Onde:

$g_e$  = Comprimento efetivo do entreferro;

$k_c$  = Coeficiente de Carter.

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - b_0 + \frac{4g}{\pi} \cdot \left[ \frac{b_0}{2g} \right]} \quad (12)$$

Figura 7 - Forma aproximada das linhas de fluxo entrando em uma armadura ranhurada



Fonte - [6]

### 3.4 Força magnética

A Figura 8 mostra seções de um motor de ímã permanente de dois pólos, destacando seus principais parâmetros dimensionais. Assume-se que o estator está equipado com um enrolamento trifásico, cujas espiras de cada fase são distribuídas de forma aproximadamente sinusoidal ao redor da periferia. Como a máquina não possui um mecanismo de partida a partir de uma fonte de frequência fixa, considera-se que ela opera com alimentação de um inversor. No caso geral de uma máquina com P pólos, o enrolamento do estator é projetado para fornecer um conjunto de correntes senoidais equilibradas, resultando em uma distribuição de Força Magnetomotriz (MMF) por polo ao redor da periferia do estator da forma:

$$F = \frac{\pi}{2} \cdot D_{is} \cdot l_e \cdot B_{gm1} \cdot K_{s1} \cdot Sen(\beta) \quad (4)$$

Onde:

$D_{is}$  = Diâmetro interno (núcleo do rotor até a parede interna do estator);

$l_e$  = Comprimento axial efetivo do estator;

$K_{s1}$  = Densidade de corrente;

$\beta$  = Ângulo expresso em graus elétricos (se assume que o ímã gira de forma síncrona com a força magnetomotriz do estator, mas está espacialmente deslocado em relação à FMM).

Tem-se para  $l_e$ :

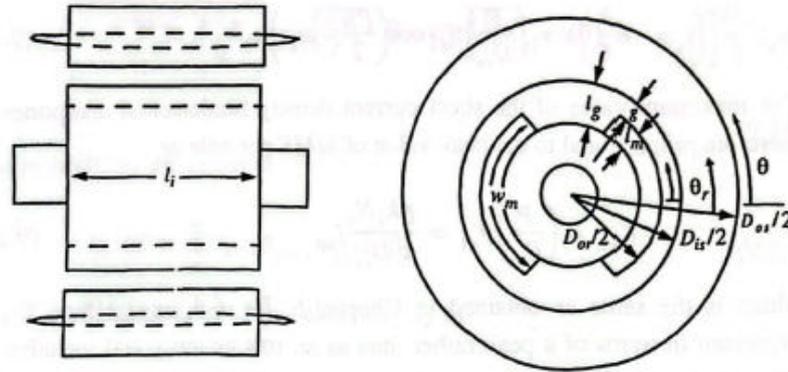
$$l_e = l_i + 2g \quad (5)$$

Onde:

$l_i$  = Comprimento axial do estator;

$g$  = Comprimento do entreferro.

Figura 8 - Seções transversais de um motor de ímãs permanentes de dois pólos com ímãs de superfície



Fonte - [6]

### 3.5 Determinação de $K_{s1}$ e $K_s$

Tanto  $K_s$  quanto  $K_{s1}$  são grandezas relativas à intensidade de campo magnético da máquina. Sua unidade de medida é Aespiras/m.  $K_{s1}$  é determinada em termos de corrente de pico.  $K_s$  é determinada em termos de corrente RMS. [6]

Assim, tem-se:

$$K_{s1} = \frac{6 \cdot K_1 \cdot N_s}{\pi \cdot D_{is}} \cdot I_m \quad (6)$$

Onde:

$K_1$  = Fator de enrolamento;

$N_s$  = Número de espiras série por fase;

$I_m$  = Corrente de pico.

$$K_s = \frac{6 \cdot N_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot D_{is}} \cdot I_s \quad (7)$$

Onde:

$I_s$  = Corrente de fase RMS.

### 3.7 Conjugado elétrico

O conjugado elétrico atua como um freio para a turbina, sendo influenciado pela corrente de carga. Se ocorrer a desconexão das baterias de carregamento ou da rede elétrica, a corrente é interrompida, permitindo que a turbina atinja velocidades perigosas, o que pode comprometer sua integridade física. Conexões repentinas também podem gerar transitórios mecânicos que representam riscos para a turbina. A velocidade das turbinas pode ser controlada e limitada por meio da variação do ângulo de ataque das pás de uma turbina eólica, por exemplo, aplicação de freios mecânicos ou utilização de cargas de desvio (dump load). Essa carga gera corrente e torque elétrico, ajudando a controlar a velocidade das turbinas.

O conjugado elétrico se obtém das seguintes formas:

- Em termo da potência mecânica:

$$C_e = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (\text{W}) \quad (8)$$

Onde:

$C_e$  = Conjugado elétrico;

$P_m$  = Potência mecânica;

$\omega_m$  = Velocidade angular.

- Em termo da força magnética:

$$C_e = \frac{D_{is} \cdot F}{2} \quad (\text{W}) \quad (9)$$

### 3.8 Tensão de cisalhamento magnético

A tensão de cisalhamento magnético, ou magnet shear stress (MSS), é uma força tangencial por unidade de área gerada pela interação do campo magnético com as correntes elétricas em um material condutor ou em um meio magnético. A MSS é um parâmetro que leva em consideração a reação da armadura, na construção do conjugado elétrico, mas

também o tamanho da máquina. É um parâmetro fundamental de projeto. Um MSS alto implica em mais conjugado mecânico para seu deslocamento rotórico. Assim, é uma importante figura de mérito para os fabricantes.

. No contexto de máquinas elétricas, a tensão de cisalhamento magnético desempenha um papel crucial na geração de torque. Ela é responsável pela transferência de energia entre o rotor e o estator por meio do entreferro, sendo a base do funcionamento de motores e geradores.

O MSS é encontrado através da força média (F) por unidade de área (A) da superfície do entreferro, da seguinte forma:

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{B_{gm1} \cdot K_{s1}}{2} \quad (\text{N/m}^2) \quad (10)$$

, para valores acima de 25 kN/m<sup>2</sup> é necessário um projeto de resfriamento mais elaborado e uma série de problemas na montagem da MSIP onde o principal é a dificuldade de alinhar o rotor dentro do estator. [6]

### 3.9 Fatores, coeficientes e componentes harmônicos

Os componentes harmônicos da FMM resultante podem ser calculados por meio de Séries de Fourier. No entanto, com a interpretação adequada, os coeficientes harmônicos podem ser obtidos diretamente através de algumas equações específicas [6].

#### 3.9.1 Fator aberturas das ranhuras ( $k_{\chi h}$ )

O fator de abertura de ranhura é uma característica que descreve o efeito das aberturas das ranhuras no estator ou rotor sobre a distribuição da força magnetomotriz e a densidade de fluxo magnético. Quando as ranhuras de um núcleo magnético não são totalmente fechadas (ou seja, possuem aberturas visíveis), isso afeta a forma como o campo magnético se distribui na máquina elétrica.

#### Efeitos das Aberturas de Ranhura

I) Filtragem Harmônica da FMM:

A abertura das ranhuras atua como um filtro para a FMM, alterando sua forma de onda ao longo da superfície interna do estator. Isso suaviza as mudanças bruscas na FMM e introduz variações adicionais, afetando a eficiência e o desempenho da máquina.

## II) Distorção da Densidade de Fluxo Magnético:

A abertura altera a distribuição do fluxo magnético no entreferro, gerando irregularidades no campo magnético, que podem causar vibrações ou ruídos adicionais.

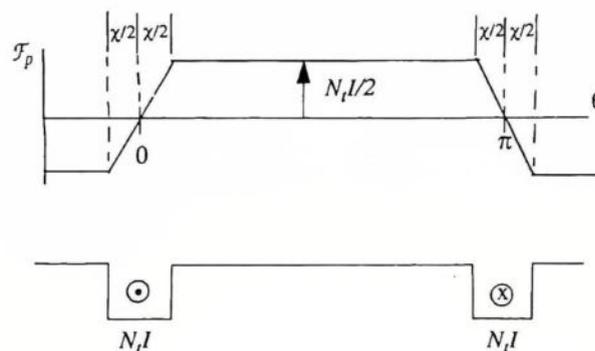
O fator de abertura de ranhura,  $k_{\chi h}$ , é uma medida que leva em consideração a proporção da abertura da ranhura em relação à largura total do passo do polo. É apresentado como:

$$k_{\chi h} = \frac{\text{sen}\left(\frac{h\chi}{2}\right)}{\left(\frac{h\chi}{2}\right)} \quad (11)$$

Onde:

$h$  = Ordem da componente harmônica.

Figura 9 - Bobina concentrada de passo completo, incluindo os efeitos da abertura de ranhura.



Fonte - [6]

Genericamente, o fator pode ser entendido como sendo:

Largura da abertura da ranhura / passo do polo

Onde:

Largura da Abertura da Ranhura: A distância física da abertura na ranhura do núcleo;

Passo do Polo: A distância correspondente a um polo magnético.

### 3.9.2 Fator de passo ( $k_{ph}$ )

O fator de passo, também conhecido como fator de redução de harmônicos, é um parâmetro usado para descrever a redução da força magnetomotriz (FMM) e da tensão induzida em uma bobina devido ao encurtamento do passo da bobina em relação ao passo completo. Em sistemas elétricos, o passo completo refere-se à configuração em que as bobinas de um enrolamento abrangem um ângulo correspondente a 180 graus elétricos. Quando o passo é encurtado, o fator de passo  $k_{ph}$  é calculado pela equação:

$$k_{ph} = \cos \frac{h\gamma}{2} \quad (12)$$

Sendo:

$$\gamma = 180 / q \text{ (para concêntrico } 180^\circ\text{);}$$

$$\gamma = 120 / q \text{ (para concêntrico } 120^\circ\text{);}$$

$$\gamma = 60 / q \text{ (para concêntrico } 60^\circ\text{);}$$

$$q = \text{Número de bobinas por grupo.}$$

O fator de passo da máquina reduz os harmônicos indesejados presentes na onda de FMM ou na tensão induzida, tornando o desempenho do motor ou do gerador mais eficiente e melhorando a qualidade da onda de saída.

### 3.9.3 Fator de distribuição harmônica ( $k_{dh}$ )

O fator de distribuição harmônica, também chamado de fator de espalhamento ou fator de enrolamento, é uma medida que quantifica o impacto da distribuição dos condutores de uma bobina em várias ranhuras no atenuamento ou amplificação dos harmônicos de ordem específica na força magnetomotriz (FMM) ou na tensão induzida. O fator de distribuição  $k_d$  para um harmônico de ordem  $h$  é dado por:

$$k_{dh} = \frac{\text{sen}\left(\frac{hq\gamma}{2}\right)}{q \text{sen}\left(\frac{h\gamma}{2}\right)} \quad (13)$$

Onde:

$h$  = Ordem do harmônico (1 para fundamental, 3, 5, etc. para harmônicos superiores);

$q$  = Número de ranhuras por polo por fase;

$\gamma$  = Ângulo elétrico entre duas ranhuras consecutivas (em radianos).

### Efeitos do Fator de Distribuição:

**Redução de Harmônicos Superiores:** O fator de distribuição reduz a magnitude dos harmônicos indesejados no campo magnético ou na tensão induzida, contribuindo para melhorar a eficiência e o desempenho da máquina elétrica.

**Amplitude Máxima no Fundamental:** O fator de distribuição é máximo para o harmônico fundamental ( $h=1$ ) e diminui para harmônicos de ordens superiores.

### 3.9.4 Fator de distorção harmônica ( $k_{sh}$ )

É um parâmetro utilizado para avaliar o impacto das harmônicas presentes em sinais elétricos ou de potência, especialmente em sistemas de corrente alternada. Ele mede a distorção de uma forma de onda em relação à sua componente fundamental (senoidal ideal). O cálculo do fator de distorção harmônica pode variar dependendo da aplicação, mas muitas vezes está relacionado ao THD. O  $k_{sh}$  tem um impacto significativo no desempenho, eficiência e vida útil das máquinas elétricas, como motores, transformadores e geradores. Isso ocorre porque as harmônicas introduzem correntes e tensões adicionais que afetam diretamente as condições de operação dessas máquinas.

É definido por:

$$k_{sh} = \frac{\text{sen}\left(\frac{h\alpha_s}{2}\right)}{\frac{h\alpha_s}{2}} \quad (14)$$

Onde:

$\alpha_s$  = ângulo de distorção.

### 3.9.5 Fator de enrolamento ( $k_h$ )

Consiste basicamente em olhar a influência de todos os outros fatores mencionados de maneira unificada. É expresso como:

$$k_h = k_{dh} k_{xh} k_{sh} \quad (13)$$

### 3.10 Proteção contra desmagnetização dos ímãs

A desmagnetização ocorre quando o campo magnético aplicado ao ímã excede sua coercividade (resistência a ser desmagnetizado), levando à perda parcial ou total da magnetização. Isso pode ser causado por:

1. Correntes elevadas (sobrecorrente): Em máquinas elétricas, altas correntes armadura/estator podem gerar um campo magnético contrário que enfraquece o campo do ímã.
2. Altas temperaturas: A maioria dos ímãs permanentes perde força magnética em temperaturas elevadas. Além disso, uma temperatura crítica pode levar à desmagnetização irreversível.
3. Sobrecarga elétrica ou mecânica: Condições extremas, como curtos-circuitos ou bloqueio do rotor, podem expor os ímãs a tensões magnéticas fora de seus limites operacionais.

Como proteger os ímãs contra a desmagnetização?

a) Escolha de Material Adequado

- **Ímãs de alta coercividade:** Ímãs como NdFeB (Neodímio-ferro-boro) ou SmCo (Samário-cobalto) possuem alta resistência à desmagnetização.
- **Ímãs com tratamento térmico:** Ímãs tratados para operar em temperaturas elevadas.

b) Limitar a Corrente Máxima

- Controle da corrente de armadura: Implementar controle vetorial ou controle de corrente para limitar as correntes transitórias e evitar picos de corrente durante partida ou frenagem regenerativa.

c) Proteção Térmica

- Dissipação de calor: Garantir um bom sistema de resfriamento, com ventilação forçada ou arrefecimento líquido, dependendo do projeto.

$I_s$  máxima para não desmagnetização:

$$I_{s(máx)} \leq \frac{P^* \pi (B_r l_m - B_d^* l_g)}{6 \mu_0 K_1 N_s} \quad (A) \quad (16)$$

#### 4. DESCRIÇÃO DA PLANILHA E DE APOIO DO PROJETO

Para a organização e análise dos dados utilizados neste trabalho, foi desenvolvida uma planilha eletrônica no software Excel. O objetivo principal dessa planilha é registrar, processar e facilitar os cálculos e extrair informações coletadas ao longo da pesquisa. A estrutura da planilha foi planejada para garantir a organização e permitir uma visualização clara dos dados mais relevantes.

A planilha é composta por diversos setores, cada um representando um específico conjunto de informações acerca de um aspecto da máquina. Entre os principais campos registrados, destacam-se características e dimensões físicas da máquina, cálculos de tensão, potência, perdas, entre outros. Cada segmento da planilha corresponde a um aspecto construtivo importante da máquina, garantindo, assim, que os dados sejam armazenados de forma ágil e organizada. Além disso, a planilha gera gráficos de tensão e potência a partir dos dados registrados, permitindo uma representação visual dos resultados e tornando a análise mais intuitiva.

Devido à extensão da planilha e à quantidade de informações contidas nela, nem todos os dados podem ser apresentados integralmente no corpo deste trabalho. A planilha apresenta as colunas principais e um conjunto representativo de dados, para uma visualização completa da planilha, recomenda-se consultar o Anexo A, onde o documento pode ser acessado em sua totalidade e ilustrando a estrutura utilizada, Figura 8.

Os principais parâmetros que compõem o projeto da MSIP incluem variáveis geométricas, elétricas e magnéticas que afetam a operação da máquina. Entre elas, destacam-se:

##### **Parâmetros de Entrada:**

Os principais parâmetros que compõem o projeto da MSIP incluem variáveis geométricas, elétricas e magnéticas que afetam a operação da máquina. Entre elas, destacam-se:

1. Constante de inclinação de ranhura aberta ( $\chi$ ): Com o valor de 5,05, influencia a distribuição do fluxo magnético e a permeabilidade do circuito magnético do estator.
2. Bobinas por grupo (q): Definido como 1, esse fator está diretamente ligado à topologia do enrolamento da máquina.

3. Ângulo de centralização ( $\gamma_q$ , em graus): Com um valor de 70, este parâmetro define a disposição das bobinas em relação ao campo magnético.
4. Ângulo de distorção ( $\alpha_s$ , em graus): Fixado em 20, indica possíveis desalinhamentos ou distorções do campo magnético na máquina.
5. Diâmetro interno do estator ( $D_{is}$ , mm): O valor de 120 mm define as dimensões do núcleo do estator.
6. Número de espiras por fase polo ( $N_s$ ): Com o valor de 136, determina a quantidade de voltas do enrolamento por fase.
7. Corrente de pico da fase ( $I_m$ , A): Definida por 8 A.
8. Entreferro ímã-estator ( $g$ , mm): Com valor de 2 mm.
9. Distância rotor-estator ( $l_g$ , mm): Com valor de 2,5 mm.
10. Comprimento do rotor ( $l_i$ , mm): Fixado em 45 mm.
11. Número de polos ( $p$ ): O valor de 8 polos.
12. Densidade de corrente do estator ( $A/mm^2$ ): O parâmetro de 7  $A/mm^2$  auxilia no dimensionamento térmico do estator.
13. Área da seção da ranhura ( $mm^2$ ): O valor de 74,25  $mm^2$ .
14. Largura do ímã ( $W_m$ , mm): Com o valor de 40 mm.
15. Largura de ranhura da face ( $b_0$ , mm): Com 4,45 mm.
16. Passo dos dentes ( $t_s$ , mm): Distância entre os dentes com 8,9 mm.
17. Entreferro ( $g$ , mm): Entreferro da máquina com 2 mm.
18. Área do grupo por polo ( $mm^2$ ): 942  $mm^2$ .
19. Área de secção máxima do condutor de 16 AWG ( $mm^2$ ): 1.583  $mm^2$ .
20. Densidade de desmagnetização do ímã ( $Br$ , T): 0,2 T.
21. Densidade residual do ímã ( $Br$ , T): 1,4 T.
22. Espessura do ímã ( $l_m$ , mm): 1 mm.
23. Comprimento da bobina média do grupo (mm): 287 mm.
24. Resistência elétrica ( $\Omega/m$ ): Resistência de 0,0176  $\Omega/m$  do condutor de 16 AWG.
25. Peso específico do condutor (kg/km): Peso de 11,8 kg/km do condutor de 16 AWG.
26. Constante  $k_c$  da liga do estator: Com o valor de 0,11 tabelada.
27. Largura do dente face ( $t_f$ , mm): 5 mm.
28. Tamanho do dente ( $d_s$ , mm): 13,5 mm.
29. Largura do dente base ( $t_b$ , mm): 7 mm.

30. Largura da ranhura face ( $b_o$ , mm): 3 mm.
31. Largura da ranhura Base ( $b_s$ , mm): 7 mm.
32. Largura da coroa ( $d_{cs}$ , mm): 19 mm.
33. Número de ranhuras do núcleo ( $N_r$ ): 32 ranhuras no projeto.
34. Velocidade (RPM): velocidade de 600 RPM de suponhamos para o início dos testes.

### Parâmetros de Saída:

1. Densidade de fluxo magnético no entreferro ( $B_{gm}$ , T): Para a situação do estudo, possui um valor de 1 T.
2. Ângulo de distorção ( $\alpha_m$ ): 2,67 rad.
3. Ângulo de distorção em graus: 152,793 graus.
4. Constante de enrolamento ( $k_{x1}$ ): Com valor de 0,999667.
5. Constante de enrolamento ( $k_{p1}$ ): Com valor de 0,819162.
6. Constante de enrolamento ( $k_{d1}$ ): Com valor de 1.
7. Constante de enrolamento ( $k_{s1}$ ): Com valor de 0,994931.
8. Constante de enrolamento ( $k_1$ ): Com valor de 0,814746.
9. Comprimento elétrico sobre o rotor ( $l_e$ , mm): 49 mm.
10. Força elétrica sobre o rotor ( $F_{max}$ , N): 161,26 N.
11. Conjugado elétrico ( $c_e$ , Nm): 9,68 Nm.
12. Coeficiente de Carter simplificado ( $k_c$ ): 1,267.
13. Coeficiente de Carter preciso ( $k_c$ ): 1,179.
14. Fator de enchimento (%): Preenchimento de 72,49% do condutor entre as ranhuras do estator.
15. Corrente máxima de proteção contra a desmagnetização ( $I_{smáx}$ , A): 27,07 A.
16. Comprimento total nas 3 fases (m): Foi usado 117,09 m do condutor de cobre nas bobinas do estator.
17. Resistência total ( $\Omega$ ): Com todo o comprimento usado, a resistência tem o valor de 2,06  $\Omega$ .
18. Queda de tensão por fase na resistência (V): 6,07 V.
19. Queda de tensão por fase percentual (%): 26,47%.
20. Peso do condutor total (kg): Foi usado ao todo 1,38 kg do condutor.
21. Perdas no cobre (W): Foi calculado uma perda de 160,8 W devido as perdas no condutor.

22. Perdas no cobre percentual (%): Foi calculado uma perda de 26,45% devido as perdas no condutor.
23. Frequência elétrica ( $\omega_e$ , rad/s): 251,32 rad/s.
24. Densidade de Fluxo na face dos dentes ( $B_{tsm}$ , T): Valor tabelado de 1,6 T.
25. Perdas por volume do dentes ( $W/m^3$ ): Perda de 38169,01  $W/m^3$ .
26. Volume dos dentes ( $m^3$ ): Os dentes individualmente possuem o volume de 0,00011664  $m^3$ .
27. Perdas totais dos dentes (W): 4,45 W.
28. Densidade de fluxo na face da coroa ( $B_{cm}$ , T): 0,3350 T.
29. Perdas por volume na coroa ( $W/m^3$ ): Perda de 744,92  $W/m^3$ .
30. Perdas por volume ( $m^3$ ): A coroa possui um volume de 0,0004458  $m^3$ .
31. Perdas totais da coroa (W): 0,3321 W.
32. Perdas totais (W): O sistema possui uma perda total somada de 165,58 W.
33. Rendimento (%): O sistema possui um rendimento esperado de 72,76%.
34. Constante de RMS (ks): 12244,78.
35. Indutância ( $L_m$ , H): 0,002165 H.
36. Indutância base ( $L_{base}$ , H): Com o valor de 0,02519 H.
37. Indutância por unidade (pu): 0,1084.
38. Resistência ( $R_s$ ,  $\Omega$ ): 0,6868  $\Omega$ .
39. Resistência base ( $R_b$ ,  $\Omega$ ): 6,33  $\Omega$ .
40. Resistência por unidade (pu): 0,0859.
41. Corrente de pico ( $I_r$ , A): O sistema suporta uma corrente de 93,07 A.
42. Fonte de tensão equivalente ( $E_i$ , V): 50,66 V.
43. Reatância de magnetização ( $X_m$ ,  $\Omega$ ): 0,54  $\Omega$ .
44. Estimativa de dispersão de fluxo ( $X_e$ ,  $\Omega$ ): 1,27  $\Omega$ .

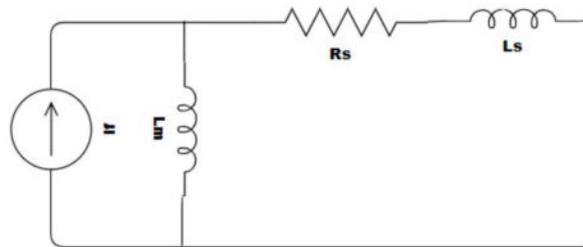
A planilha desempenhou um papel essencial na organização dos dados e na obtenção de resultados confiáveis para esta pesquisa. Sua utilização possibilitou maior precisão na análise das informações e contribuiu significativamente para a fundamentação das conclusões deste estudo.

## 5. MODELO REGIME PERMANENTE

### 5.1 Circuito equivalente

O circuito equivalente consiste em ilustrar a máquina pelo modelo de Norton através de uma fonte de corrente, como mostra a Figura 10:

Figura 10 - Circuito equivalente para MSIP



Fonte - Autoria própria

Nesta condição de operação síncrona, todas as grandezas de armadura da máquina (corrente e fluxo concatenado) irão variar no tempo de forma senoidal na frequência da máquina. Através do que é apresentado em [6], é possível encontrar os parâmetros do circuito equivalente da seguinte forma:

$$R_s = \text{Comprimento}(Km) \cdot C\left(\frac{\text{Ohm}}{Km}\right) \quad (\text{Ohm}) \quad (17)$$

$$L_m = \frac{24\mu_0}{2\pi} \left(\frac{k_1 N_s}{P}\right)^2 \frac{D_{is} l_g}{l_e} \quad (\text{H}) \quad (18)$$

$$I_f = \frac{\pi P B_{gm1} l_g}{6k_1 N_s \mu_0} \quad (\text{A}) \quad (19)$$

$$L_{base} = \frac{6\sqrt{2}k_1 N_s^2 B_{gm1} l_e}{\pi P k_s (\text{rms})} \quad (\text{H}) \quad (20)$$

$$Z_{base} = L_{base} \omega_e \quad (\text{Ohm}) \quad (21)$$

Onde,  $R_s$  diz respeito a resistência série do circuito, sendo o fator C fornecido pelo fabricante multiplicado pelo comprimento total, em quilômetros, do fio utilizado.  $L_m$  é a indutância de magnetização e  $I_f$  é a corrente de pico da fonte de corrente. Para valores de  $L_m$  assume-se uma margem de 0,1 pu a 0,5 pu e para valores de  $L_s$  assume-se uma margem de 0,1 pu a 0,2 pu. Alguns outros pontos que estão implícitos no circuito equivalente da Figura 10, como tensão gerada, queda de tensão e potência, estão detalhados no item 6.5 deste trabalho.

## 5.2 Simulações MATLAB

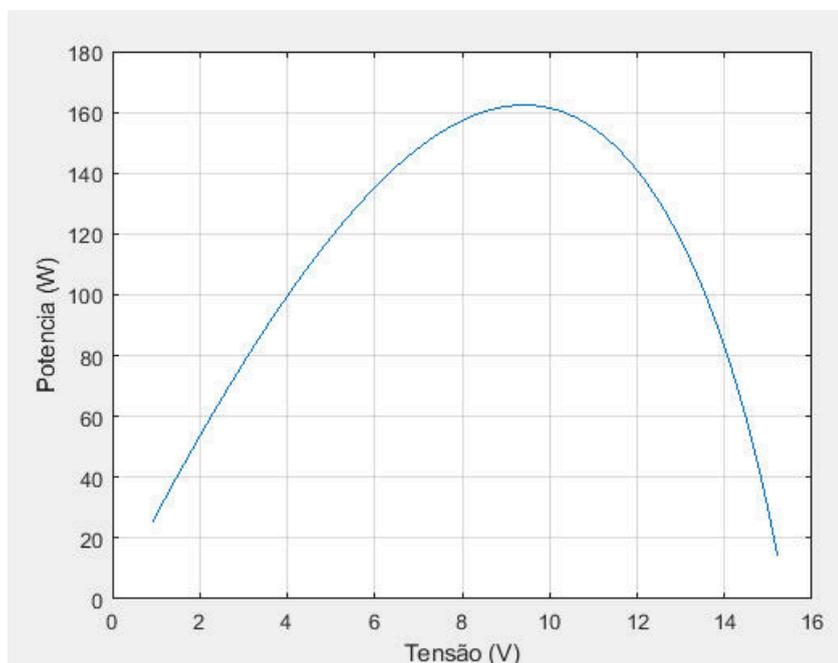
A análise da potência elétrica disponível nos terminais de uma máquina síncrona a ímã permanente (MSIP) é fundamental para compreender seu desempenho e otimizar sua operação em diferentes condições de carga. O presente estudo utiliza um modelo matemático implementado em MATLAB, Anexo B, para avaliar a relação entre potência, tensão e corrente da carga conectada à máquina, permitindo uma melhor interpretação de seu comportamento elétrico. O código desenvolvido tem como base o circuito equivalente da MSIP e considera os efeitos da resistência do estator, das reatâncias de dispersão e de magnetização, além da impedância da carga conectada ao sistema.

Inicialmente, são definidos os parâmetros elétricos do sistema, incluindo a corrente fundamental do estator, a resistência do enrolamento e as reatâncias associadas à máquina e à carga. Em seguida, estabelece-se uma faixa de variação para a resistência da carga, que varia de 0,1  $\Omega$  a 50  $\Omega$ , com um total de 1000 pontos discretizados para assegurar uma análise detalhada. A partir desses parâmetros, o código realiza um processo iterativo para calcular diversas grandezas elétricas associadas à operação da máquina.

A corrente da carga é determinada com base no circuito equivalente, considerando a contribuição da reatância de magnetização e da impedância total do sistema. Com a corrente conhecida, calcula-se a tensão nos terminais da carga e sua defasagem angular em relação à corrente. A potência ativa trifásica é então obtida a partir do produto da tensão, da corrente e do cosseno do ângulo de fase entre ambas. Os valores obtidos ao longo das iterações são armazenados em vetores e posteriormente utilizados para gerar dois gráficos que representam o comportamento da máquina sob diferentes condições de carga. O primeiro gráfico, Figura

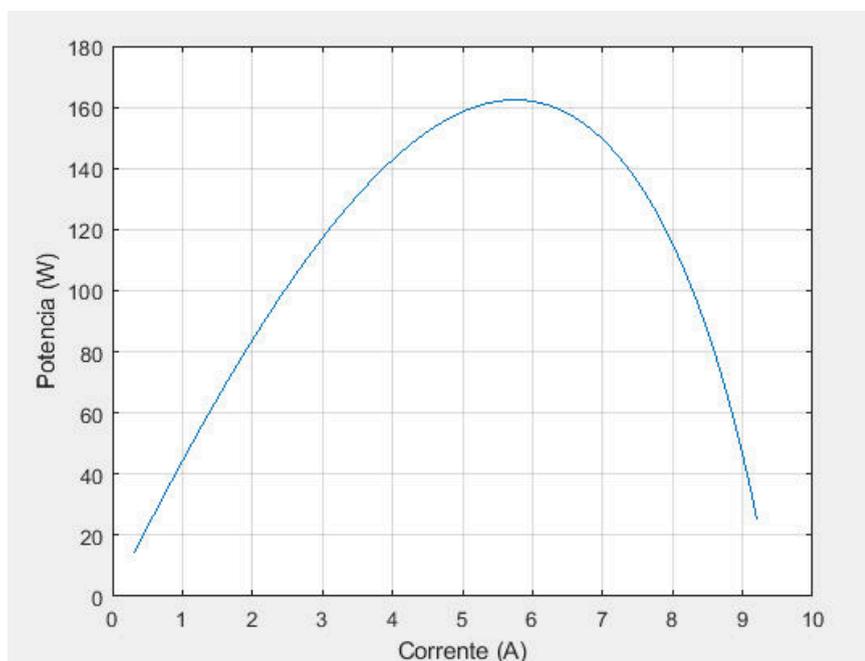
11, exibe a relação entre a potência e a tensão nos terminais da carga, enquanto o segundo, Figura 12, ilustra a dependência da potência em relação à corrente de carga.

Figura 11 - Perfil de geração de potência e tensão



Fonte - Matlab/ Autoria própria

Figura 12 - Perfil de geração de potência e corrente



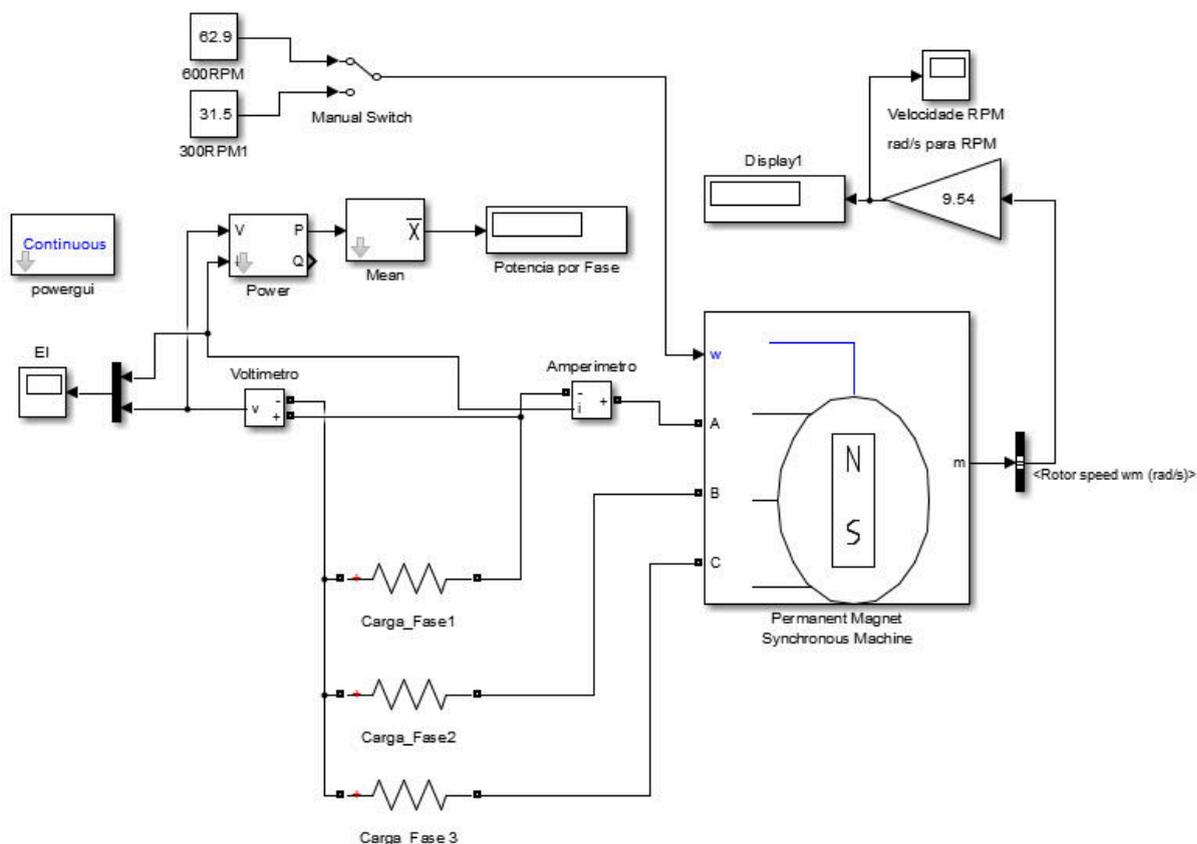
Fonte - Matlab/ Autoria própria

Esses gráficos permitem visualizar como a potência fornecida pela máquina varia em função da impedância da carga conectada, facilitando a identificação de condições ótimas de operação. Por meio dessa abordagem computacional, torna-se possível avaliar de forma mais precisa o desempenho da MSIP e compreender como as características da carga influenciam a potência disponível nos seus terminais.

### 5.3 Simulação dinâmica do gerador síncrono de ímã permanente

Após a simulação do gerador em regime permanente com os parâmetros estipulados pela referência básica do trabalho, foi realizada uma simulação dinâmica com o modelo dinâmico do gerador de ímã permanente do Matlab Simulink, Figura 13, utilizando para isso os parâmetros gerados pelo projeto do gerador.

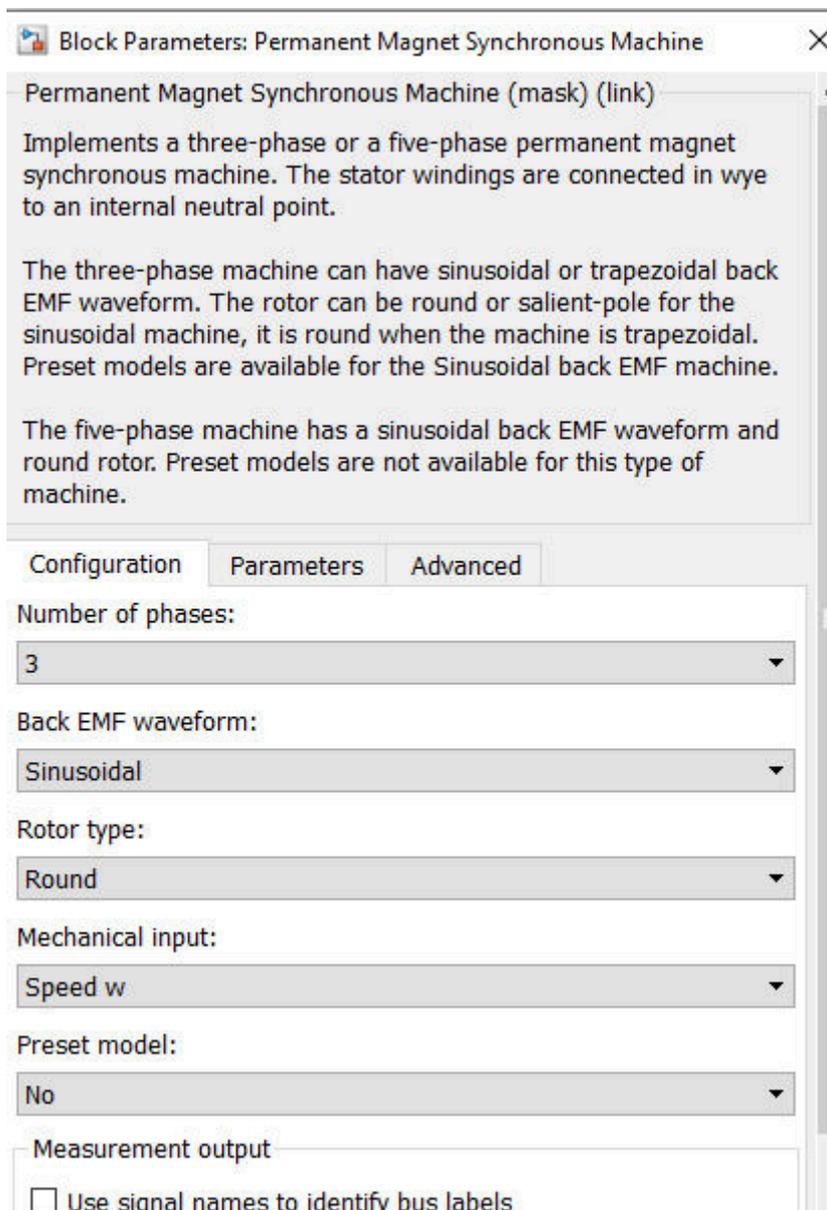
Figura 13 - Simulação dinâmica



Fonte - Autoria própria/ Matlab

A parametrização do gerador é fundamental e segue os parâmetros estipulados no projeto pela referência básica, de acordo com a Figura 14.

Figura 14 - Bloco de parametrização



Fonte - Autoria própria/ Matlab

De cima para baixo a configuração é:

- Modelo trifásico;
- Como o fluxo de entreferro possui um componente fundamental acentuada senoidal admite-se que a EMF seja senoidal;
- Como os ímãs são sobrepostos no rotor, o mesmo não possui características de polo saliente;

- A simulação é baseada numa velocidade de operação (entrada em velocidade). A entrada em conjugado iria criar uma problema a mais relativo a necessidade do conhecimento do atrito dumping do gerador, atrito mecânico;
- Por último, o modelo é criado a partir dos parâmetros do projeto, ou seja, não se utilizou um modelo pré estabelecido pelo Matlab.

Os parâmetros eletromagnéticos são configurados na aba de parâmetros, como mostrados na Figura 15.

Figura 15 - Parâmetros eletromagnéticos

The image shows a software dialog box with three tabs: 'Configuration', 'Parameters', and 'Advanced'. The 'Parameters' tab is active. It contains several input fields and a dropdown menu. The 'Stator phase resistance Rs (ohm)' field contains '0.5521'. The 'Armature inductance (H)' field contains '0.86e-3'. The 'Machine constant' section has a dropdown menu set to 'Flux linkage established by magnets (V.s)' and a 'Flux linkage' field containing '0.063'. The 'Pole pairs p ( )' field contains '4'. The 'Initial conditions [ wm(rad/s) thetam(deg) ia,ib(A) ]' field contains '[0,0, 0,0]'. At the bottom, there are buttons for 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply'.

Fonte - Autoria própria/ Matlab

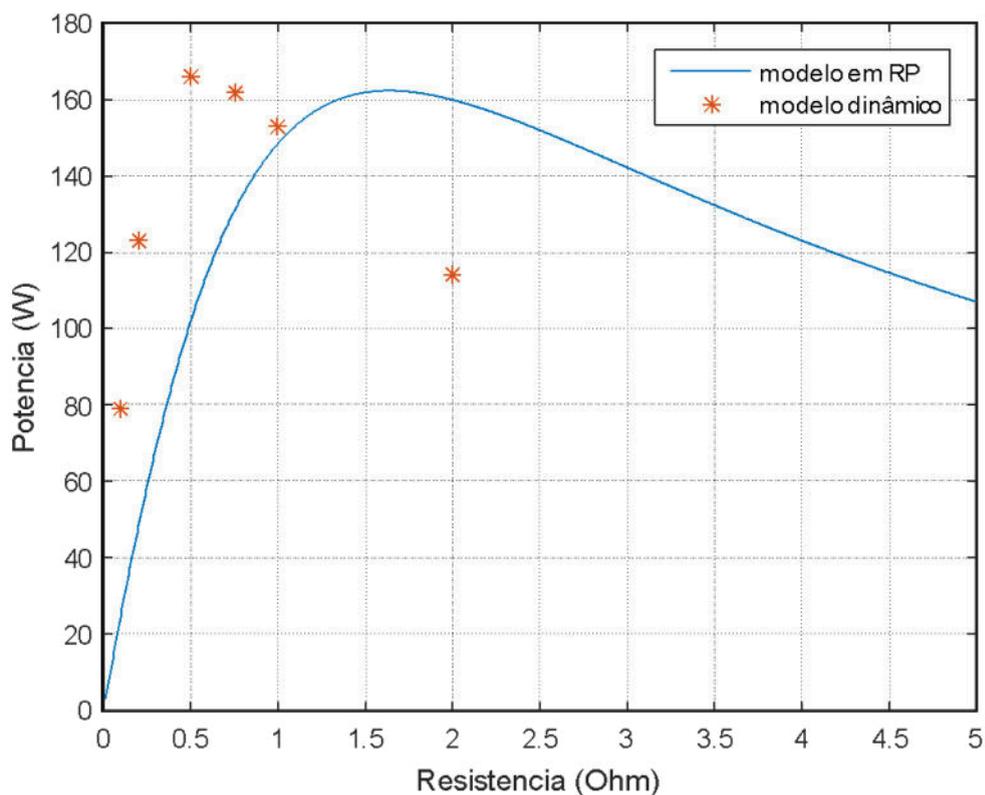
- A resistência por fase do enrolamento do estator é determinada, como já foi mencionado, sabendo o condutor utilizado (AWG) sua resistência por metro e o comprimento total da fase. No projeto foi utilizado o fio 16 AWG. Os valores utilizados apontam para 0,5521 Ohms;
- A indutância de armadura, que modela a dispersão e a reação da armadura, foi estipulada pelo valor médio de referência bibliográfica [5], ou seja, reatância de 0,15 pu. O que aponta também para valor de reatância 0,1 pu a 0,2 pu para máquinas síncronas de pequeno porte [4]. Segundo essa referência, para máquinas de grande

porte, a reatância está por volta de 1pu. Em suma, foi utilizado uma reatância de 0,15 pu;

- Já o fluxo de entreferro proveniente das sapatas polares é calculado pela estimativa de densidade de fluxo dos ímãs e a largura da sapata polar (20mm x 40mm), que são os quatro ímãs utilizados por sapata polar. A densidade de fluxo estipulada pela referência para ímãs de NdFeB, para N51;
- Número de polos: 8 polos ou 4 pares de pólos;
- As condições iniciais não interessam muito, posto que os valores de regime permanente são o que interessa para comparação com a simulação script.

A comparação das duas simulações é mostrada na Figura 16:

Figura 16 – Comparação da simulação dinâmica e do modelo de regime permanente proposto em [5]



Fonte - Autoria própria/ Matlab

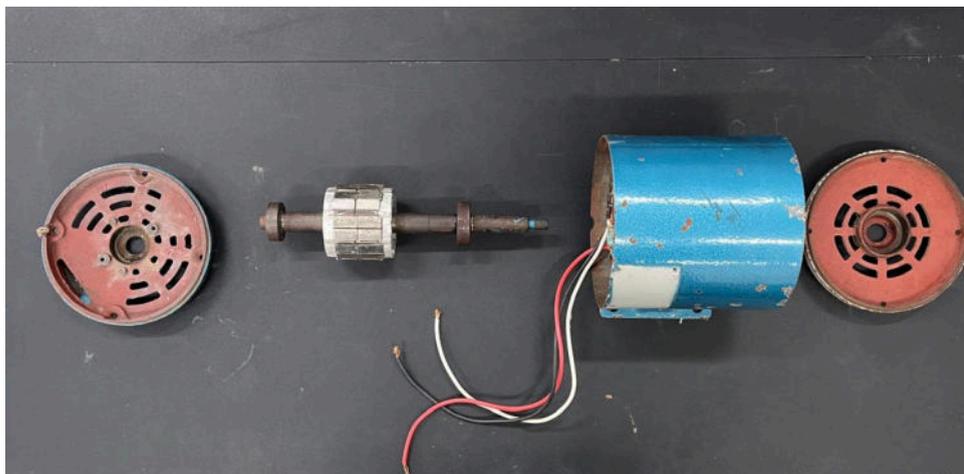
A diferença onde ocorrem os máximos não está na impedância de estator, já que os valores de resistência de estator e impedância síncrona são de 0,1 a 0,2 pu. No entanto, o modelo proposto em [5] utiliza a modelagem da fonte de corrente a partir da FMM de entreferro. Já o modelo dinâmico utiliza o fluxo por fase nas sapatas polares. Os dois métodos

surtiram ligeira diferença, na posição onde ocorre o máxima potência gerada, que não foi estudado de forma mais profunda. Porém, os dois modelos de geradores construídos a partir de rotores cilíndricos, podem ser utilizados tanto para ser utilizados nas duas simulações quanto atestando o máximo de potência gerada. O modelo dinâmico pode ser usado para testar configurações utilizando o gerador e conversores estáticos, faltas, transitórios entre outros.

## 6. PROJETO GERADOR 300W A PARTIR DE UM ESTATOR DE MOTOR DE INDUÇÃO DE 1/5CV

Para o início do processo de montagem de um protótipo de um gerador com ímãs permanentes, o objetivo principal é conceber a estrutura física para um dispositivo compacto e funcional capaz de gerar eletricidade de maneira sustentável, aproveitando-se de alguma energia renovável. Após as estimativas e cálculos teóricos, fez-se necessário a divisão da manufatura nas partes constituintes do gerador, como o estator que constitui-se pela carcaça e a disposição dos enrolamentos, também pelo rotor formado pelo eixo e os ímãs permanentes dispostos, Figura 17.

Figura 17 - Partes constituintes do gerador



Fonte - Autoria própria

### 6.1 Dados de entrada

Uma carcaça de um motor de  $\frac{1}{2}$  CV foi utilizada para testar o método. Os dados de entrada e saída utilizados, que já foram citados anteriormente na seção 4, nelas foram colocados as dimensões físicas da estrutura utilizada, como :

#### Exemplos de dados de entrada

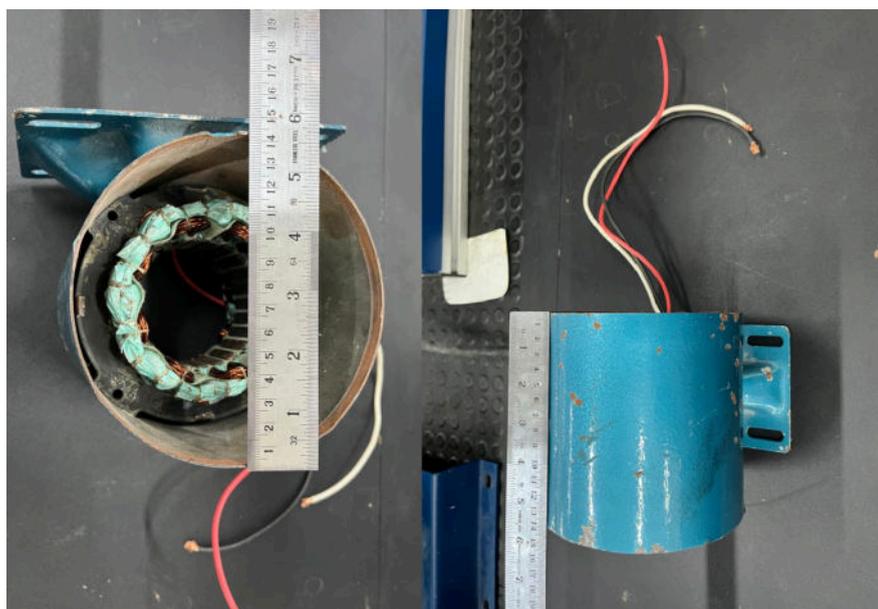
1. Entreferro ímã-estator (g, mm): Com valor de 2 mm.

2. Distância rotor-estator ( $l_g$ , mm): Com valor de 2,5 mm.
3. Comprimento do rotor ( $l_i$ , mm): Fixado em 45 mm.
4. Número de polos ( $p$ ): O valor de 8 polos.
5. Largura do ímã ( $W_m$ , mm): Com o valor de 40 mm.
6. Largura de ranhura da face ( $b_0$ , mm): Com 4,45 mm.
7. Passo dos dentes ( $t_s$ , mm): Distância entre os dentes com 8,9 mm.
8. Entreferro ( $g$ , mm): Entreferro da máquina com 2 mm.
9. Área do grupo por polo ( $\text{mm}^2$ ): 942  $\text{mm}^2$ .
10. Área de secção máxima do condutor de 16 AWG ( $\text{mm}^2$ ): 1.583  $\text{mm}^2$ .

### **Exemplos de dados de saída**

1. Densidade de Fluxo na face dos dentes ( $B_{\text{tsm}}$ , T): Valor tabelado de 1,6 T.
2. Perdas por volume do dentes ( $\text{W}/\text{m}^3$ ): Perda de 38169,01  $\text{W}/\text{m}^3$ .
3. Volume dos dentes ( $\text{m}^3$ ): Os dentes individualmente possuem o volume de 0,00011664  $\text{m}^3$ .
4. Perdas totais dos dentes (W): 4,45 W.
5. Densidade de fluxo na face da coroa ( $B_{\text{cm}}$ , T): 0,3350 T.
6. Perdas por volume na coroa ( $\text{W}/\text{m}^3$ ): Perda de 744,92  $\text{W}/\text{m}^3$ .
7. Perdas por volume ( $\text{m}^3$ ): A coroa possui um volume de 0,0004458  $\text{m}^3$ .
8. Perdas totais da coroa (W): 0,3321 W.
9. Perdas totais (W): O sistema possui uma perda total somada de 165,58 W.

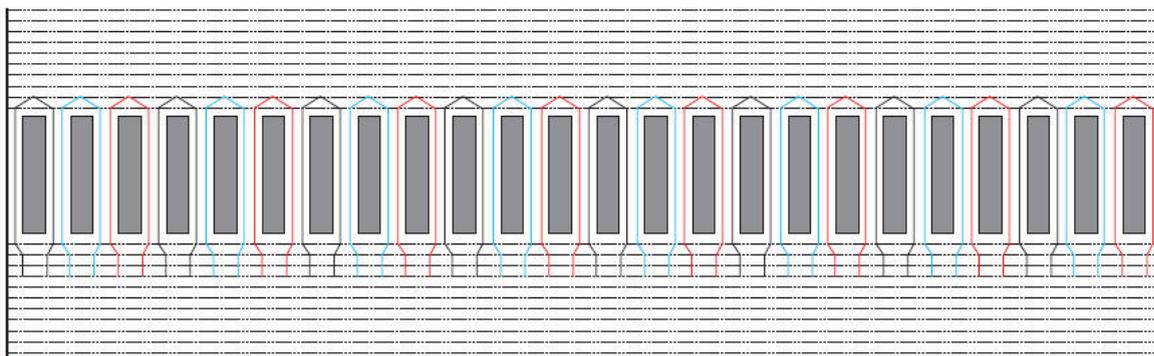
Figura 18 - Dimensões da carcaça utilizada



Fonte - Autoria própria

Na realização do processo de enrolamento dos fios de cobre nas bobinas trifásicas, foi determinado através dos cálculos que a disposição mais eficiente da máquina seria em um arranjo de oito polos no modelo de passo em série com as características descritas abaixo. Dessa maneira, após o encaixe do núcleo das bobinas na carcaça a etapa de montagem do estator se concluíva e a confecção do rotor iniciava, Figura 19.

Figura 19 - Esquemático da distribuição das bobinas



Fonte - Autoria própria

Características dos enrolamentos:

- Número de polos: 8;

- Número de ranhuras do estator: 24;
- Tipo de passo de grupo: Concêntrico ou progressivo;
- Passo das bobinas: 2;
- Número de bobinas por grupo: 1;
- Camada de bobina por ranhura: Dupla.

## 6.2 Rotor

A fabricação do rotor para o projeto do gerador MSIP é um processo técnico e complexo, que envolveu a integração de diversos materiais e técnicas de fabricação com o objetivo de produzir um componente que seja eficiente na conversão de energia mecânica em energia elétrica. O processo de fabricação desse componente envolve diversas etapas que, no processo de estudo, variam conforme as especificações físicas das peças disponíveis.

Para as dimensões já definidas anteriormente para o estator, foi determinado um eixo de comprimento compatível. No aspecto para um melhor encaixe do rotor no estator, o eixo foi desbastado para que houvesse o livre movimento quando as peças se unirem, assim aumentando a distância do entreferro entre as partes constituintes. No final do processo o eixo ficou 25 cm de comprimento, Figura 20.

Figura 20 - Versão final do rotor



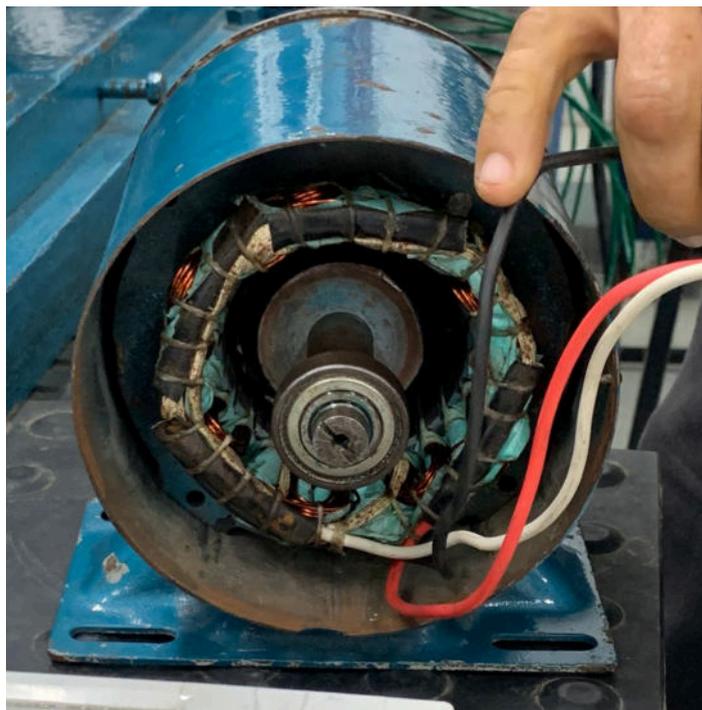
Fonte - Autoria própria

Na etapa de implementação dos ímãs, foram escolhidos ímãs de neodímio N52 de 20 mm de comprimento, 10 mm de largura e 2 mm de altura (20x10x2mm). Para constituir os

oito polos necessários para conciliar com a estrutura do estator, foram acomodados oito ímãs de neodímio com cola de cianoacrilato de forma simétrica ao longo da circunferência do eixo.

No final do processo, obteve-se um rotor de polos salientes nos quais os oito polos eram construídos por apenas um ímã de neodímio N52. Ao encaixar o rotor finalizado no estator, Figura 21, a distância final do entreferro ficou aproximadamente de 15 mm.

Figura 21 - Visão frontal do gerador com rotor alinhado no estator



Fonte - Autoria própria

### 6.3 MSS da máquina

O Magnetic Shear Stress (MSS) em um gerador elétrico está relacionado às forças magnéticas que atuam entre as partes móveis (rotor) e fixas (estator) devido à variação do campo magnético. Essas forças afetam o desempenho do gerador e podem influenciar sua eficiência, estabilidade e desgaste mecânico. Dada a fórmula 17, foram realizadas os cálculos anteriores de variáveis importantes para a determinação:

$$\alpha = \frac{P \cdot l}{D_{is}} \quad (17)$$

Onde:

$P$  = Número de polos;

$l$  = Largura do ímã (mm);

$D_{is}$  = Diâmetro interno do ímã (mm);

$$\alpha = \frac{8 \cdot 40}{120} = 2,67 \text{ rad}$$

$$B_{gm1} = \frac{4 \cdot B_{gm} \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi} \quad (18)$$

Onde:

$\alpha$  = Ângulo de distorção (rad);

$B_{gm}$  = Densidade de fluxo magnética padrão (T);

$$B_{gm1} = \frac{4 \cdot 1 \cdot \text{sen}\left(\frac{2,67}{2}\right)}{\pi} = 1,238 \text{ T}$$

$$K_{s1} = \frac{6 \cdot K_1 \cdot N_s}{\pi \cdot D_{is}} \cdot I_m \quad (19)$$

Onde:

$K_1$  = Multiplicação das constantes de fluxo;

$N_s$  = Número de espiras por fase;

$D_{is}$  = Diâmetro interno do ímã (mm);

$I_m$  = Corrente de pico da fase;

$$K_{s1} = \frac{6 \cdot 0,815 \cdot 136}{\pi \cdot 120} \cdot 8 = 14108,61$$

Após a realização do cálculo das variáveis, determina-se finalmente a expectativa de influência do MSS da máquina projetada:

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{B_{gm1} \cdot K_{s1}}{2} \quad (20)$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{1,238 \cdot 14108,61}{2} = 8,73 \text{ kN/m}^2$$

Com o valor de MSS de 8,73 kN/m<sup>2</sup> nota-se que, pela estimativa dos cálculos, a influência dessa força magnética no sistema não representará uma influência significativa na geração final de energia, logo a máquina não necessita de um sistema de resfriamento acoplado nela.

#### 6.4 Expectativas de geração de potência e tensão

A geração de potência e tensão podem ser calculados através de uma relação entre o número de rotações por minuto (RPM) que se espere a máquina realize e as dimensões físicas da máquina projetada e o sua densidade de fluxo magnética esperada ( $B_{gm1}$ ). Dessa forma, colocando a equação 21 sobre a potência, em watts, e a equação 22 sobre a tensão, em volts, gerados em uma tabela com variações da velocidade do rotor numa relação, tem-se as expectativas de geração de uma máquina síncrona de imã permanente.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{\pi^2 \cdot B_{gm1} \cdot l_e \cdot D_{is}^2 \cdot 0,001^2 \cdot K_{s1} \cdot RPM}{120} \quad (21)$$

$$V_{m\acute{a}x} = 4,44 \cdot k_1 \cdot B_{gm1} \cdot \left(\frac{N_s}{P}\right) \cdot \left(\frac{RPM \cdot P}{120}\right) \cdot A_g \cdot 0,001^2 \cdot P$$

Onde:

$B_{gm1}$  = Componente espacial fundamental ou efetiva da densidade de fluxo magnético no entreferro;

$l_e$  = Comprimento elétrico da bobina (mm);

$N_s$  = Número de espiras por fase;

$D_{is}$  = Diâmetro interno do ímã (mm);

$K_{s1}$  = Densidade de corrente que circula dentro dos enrolamentos do estator;

$P$  = Número de polos;

$A_g$  = Área do grupo/bobina (mm<sup>2</sup>);

Figura 22 - Geração de tensão e potência

VELOCIDADE (RPM)	P <sub>MÁX</sub> (w)	V <sub>FASE</sub> (v)	V <sub>LINHA</sub> (v)
10	10,1	0,38	0,66
50	50,7	1,91	3,31
100	101,3	3,82	6,62
200	202,6	7,65	13,25
300	304,0	11,47	19,87
400	405,3	15,29	26,49
500	506,6	19,12	33,11
600	607,9	22,94	39,74

Fonte - Autoria própria

## 6.5 Estimativas de perdas totais e rendimento

As máquinas elétricas, sejam elas geradores ou motores, estão sujeitas a perdas de potência e tensão que impactam sua eficiência e desempenho. Essas perdas podem ser classificadas em diferentes categorias de acordo com sua origem e efeito na operação do equipamento.

Para determinar o impacto da queda de tensão da máquina, pode-se calcular a através da resistência total e corrente máxima previamente calculada. Como o valor dado pelo fabricante da resistência ( $R_{CU}$ ) de um fio de cobre esmaltado de 16 AWG é de 0,0176  $\Omega/m$ , o valor da queda de tensão ( $V_{QT}$ ) pode ser estimado na equação 23. Com uma queda de 6,06 V previstos, cerca de um queda percentual 26,45% da tensão máxima esperada.

$$V_{QT} = \frac{R_{CU} \cdot I_{CU} \cdot I_{RMS}}{3} \quad (23)$$

$$V_{QT} = \frac{0,0176 \cdot 117 \cdot 8,83}{3} = 6,06 \text{ V}$$

As perdas de potência em máquinas elétricas representam a energia que não é convertida em trabalho útil, impactando diretamente a eficiência do equipamento. Essas perdas podem ser classificadas em diferentes categorias, conforme sua origem e os efeitos

sobre a operação. As perdas totais da potência gerada pela máquina podem ser calculadas pelo produto das perdas do cobre ( $P_{CU}$ ), nos dentes ( $P_d$ ) e na coroa ( $P_c$ ).

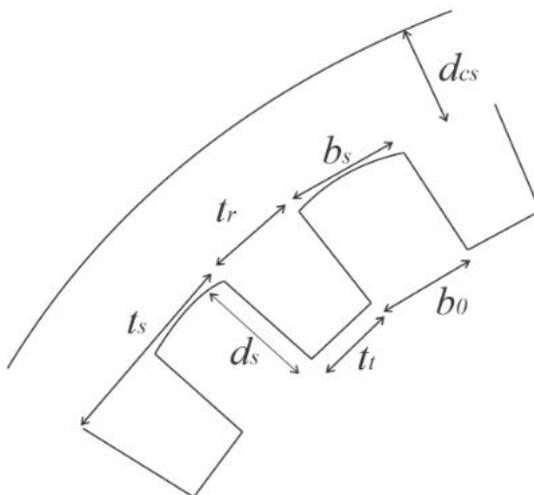
Para a realização dos cálculos, a potência dissipada do cobre ( $P_{CU}$ ) representa uma relação entre a corrente máxima ( $I_{RMS}$ ) durante todo o comprimento das bobinas e sua resistência associada. Portanto, as perdas de potência no cobre podem ser calculadas com:

$$P_{CU} = R_{CU} \cdot l_{CU} \cdot I_{RMS}^2 \quad (24)$$

$$P_{CU} = 8,83^2 \cdot 0,0176 \cdot 117 = 160,8 \text{ W}$$

Em relação a potência dissipada nos dentes e coroa, a magnitude da sua influência no sistema em desenvolvimento depende das dimensões da coroa e ranhuras (dentes do núcleo). A Figura 23 mostra as variáveis das dimensões físicas do núcleo.

Figura 23 - Variáveis construtivas do núcleo



Fonte - [6]

Onde:

$t_s$  = Passo dos dentes, igual a 8,9 mm;

$t_r$  = Largura do dente base, igual a 7,0 mm;

$t_t$  = Largura do dente da face, igual a 5,0 mm;

$d_s$  = Tamanho do dente, igual a 13,5 mm;

$d_{cs}$  = Largura da coroa, igual a 19,0 mm;

$b_s$  = Largura da ranhura base, igual a 7,0 mm;

$b_0$  = Largura da ranhura base, igual a  $b_s$ ;

Para determinar a perda dissipada da potência nos dentes ( $P_D$ ), precisa-se calcular pelas perdas por volume ( $P_{VD}$ ) e volume dos dentes ( $V_D$ ):

$$P_{VD} = \frac{4 \cdot K_C \cdot D_{IS} \cdot (B_{TSM} \cdot W_e)^2}{\pi \cdot P \cdot t_s} \quad (25)$$

$$P_{VD} = \frac{4 \cdot 0,11 \cdot 120 \cdot (1,6 \cdot 251,32)^2}{\pi \cdot 8,9} = 38169,01 \text{ W/m}^3$$

$$V_D = \frac{(t_r + t_t) \cdot D_S \cdot N_R \cdot l_I \cdot 0,001^3}{\pi \cdot P \cdot t_s} \quad (26)$$

$$V_D = \frac{(7+5) \cdot 13,5 \cdot 32 \cdot 45 \cdot 0,001^3}{2} = 0,00011664 \text{ m}^3$$

$$P_D = P_{VD} \cdot V_D \quad (27)$$

$$P_D = 38169,01 \cdot 0,00011664 = 4,45 \text{ W}$$

Para determinar a perda dissipada da potência na coroa ( $P_C$ ), calcula-se anteriormente pelas perdas por volume ( $P_{VC}$ ) e volume dos dentes ( $V_C$ ):

$$P_{VC} = \frac{8 \cdot K_C \cdot (B_{CM} \cdot W_e)^2}{\pi \cdot \alpha_m} \quad (28)$$

$$P_{VC} = \frac{8 \cdot 0,11 \cdot (0,33 \cdot 251,32)^2}{\pi \cdot 2,67} = 744,92 \text{ W/m}^3$$

$$V_C = \pi \cdot (D_{IS} + 2d_s + d_{CS}) \cdot d_{CS} \cdot l_I \cdot 0,001^3 \quad (29)$$

$$V_C = \pi \cdot (120 + 2 \cdot 13,5 + 19) \cdot 19 \cdot 45 \cdot 0,001^3 = 0,00044 \text{ m}^3$$

$$P_C = P_{VC} \cdot V_C \quad (30)$$

$$P_C = 744,92 \cdot 0,00044 = 0,33 \text{ W}$$

Com os valores de todas as dissipações de potência relacionados ao cobre ( $P_{CU}$ ), dentes ( $P_D$ ) e a coroa ( $P_C$ ), pode-se determinar as perdas totais do sistema ( $P_T$ ):

$$P_T = P_{CU} + P_D + P_C \quad (31)$$

$$P_T = 160,8 + 4,45 + 0,33 = 165,58 \text{ W}$$

Por fim, com o valor de potência dissipada pode-se determinar o rendimento esperado da máquina projetada.

$$R(\%) = \frac{(P_{MÁX} - P_T) \cdot 100}{P_{MÁX}} \quad (32)$$

$$R(\%) = \frac{(607,9 - 165,58) \cdot 100}{607,9} = 72,76\%$$

Após os cálculos, uma primeira dedução para o valor de rendimento de 72,76% do gerador projetado, pode-se dizer que a máquina possui uma expectativa de ter uma eficiência razoável.

## 6.6 Desafios e dificuldades encontradas

Durante o processo da construção do protótipo foi notado algumas dificuldades em diferentes etapas do processo. Tais dificuldades foram descobertas ao decorrer das necessidades específicas de fabricação do gerador proposto, pois o projeto de uma MSIP é multidisciplinar e demanda conhecimentos de outras áreas da engenharia que não estavam plenamente incluídas na etapa de planejamento.

Na primeira etapa, foi percebida uma dificuldade na confecção do protótipo ao que tange a feitura das bobinas e o encaixe no seu enrolamento no estator da máquina. Como ferramentas e métodos adequados não estavam dispostos para o uso durante o processo, nesse ponto do projeto a contratação de terceiros foi imprescindível para a sua consolidação.

Já na etapa de confecção do rotor, a decisão de desbastar sem o planejamento multidisciplinar com as devidas técnicas da área de Engenharia Mecânica provou ser um dificultador que, já no início, implicou num rotor com uma disposição uniforme de ímãs que, desse modo, com um entreferro de 1 mm não seria possível alinhar o rotor devido ao alto

MSS encontrado. Ao aumentar mais o entreferro, uma saída para situação anterior, a densidade de fluxo efetiva das bobinas diminuiu pelo aumento da relutância magnética do circuito.

Por fim, realizar um projeto dentro do Instituto Federal sem recursos é uma tarefa repleta de desafios, enfatizando que além da falta de recursos, o projeto foi custeado 100% pelos orientadores. Desse modo, a falta de financiamento impacta diretamente a aquisição de materiais, o acesso a laboratórios equipados e até mesmo a participação em eventos acadêmicos e científicos. Mesmo diante desses obstáculos, a resiliência da comunidade acadêmica se destaca. Muitos projetos continuam sendo desenvolvidos graças à dedicação e ao esforço coletivo de professores, alunos e servidores, que, apesar das adversidades, buscam manter a excelência do ensino e da pesquisa.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o estudo, planejamento e desenvolvimento de um método capaz de reutilizar carcaças de estatores de motores de indução presentes nos laboratórios do IFPB para a construção de um gerador síncrono a ímã permanente. O teor do trabalho remete à importância sócio-ambiental ao reutilizar o lixo eletrônico para o desenvolvimento e viabilidade de tecnologias de geração de energia, assim, além de promover a reciclagem, especialmente plausíveis para fins de energia eólica proporciona a redução nas emissões de gases poluentes na atmosfera. Para isso, foram apresentados os conceitos fundamentais relacionados às máquinas elétricas, com ênfase na estrutura e funcionamento dos estatores e rotores, bem como na influência da densidade de fluxo magnético na eficiência do gerador.

Durante o desenvolvimento do projeto, foram realizadas análises matemáticas e simulações computacionais no MATLAB para prever o comportamento da máquina em regime permanente. Além disso, foi elaborada uma planilha de apoio que permitiu a análise dos parâmetros de entrada e saída do sistema, contribuindo para a compreensão dos aspectos técnicos envolvidos no projeto.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que, apesar da fundamentação teórica sólida, a máquina desenvolvida não apresentou funcionamento satisfatório. A tentativa inicial de utilizar um entreferro de 1 mm mostrou-se inviável devido à dificuldade de alinhamento preciso entre rotor e estator, levando à necessidade de um aumento para 15 mm. No entanto, os testes demonstraram que, apesar dessa adaptação, não houve a geração de tensão nem a formação do campo girante.

Dessa forma, o projeto permitiu um aprendizado significativo sobre os desafios práticos na construção de máquinas elétricas, evidenciando a importância do rigor na execução de cada etapa do processo. Além disso, serviu como base para aprimoramentos futuros, possibilitando a correção dos erros identificados e o desenvolvimento de novas abordagens para sua viabilização. Fatores como limitações na fabricação faz necessário a participação de uma equipe multidisciplinar composta por eletrotécnicos e técnicos em mecânica. Portanto, os desafios enfrentados abriram possibilidades para aprimoramentos, sugerindo caminhos para ajustes e otimizações em projetos futuros.

Dessa forma, os resultados obtidos, ainda que não tenham sido os esperados, contribuem para o entendimento das dificuldades práticas na construção de máquinas síncronas a ímã permanente e servem de base para estudos e melhorias posteriores na área.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] US NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1979.
- [2] II Seminário de engenharia de energia na agricultura. Revista brasileira de energias renováveis, 2019. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/328077813.pdf>> . Acesso em: 22 de maio de 2024.
- [3] DE TUDO, E.-V. P. D.; COMPLETO, V. M. P. Energia-Você por dentro de tudo. Disponível em: <<https://energiavcpordentrotudo.blogspot.com/2010/11/energia-eolica.html>> . Acesso em: 24 mar. 2025.
- [4] FITZGERALD E KINGSLEY. Máquinas elétricas. 7º edição, ed. Nova Iorque. McGraw-hill Inc, 1990.
- [5] TEIXEIRA, FERNANDO. Metodologia para projeto, construção e ensaios em máquinas síncronas de ímãs permanentes - MSIP. Tese (mestrado em engenharia elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, 2006.
- [6] LIPO, T.A. Introdução ao design de máquinas CA. Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de Wisconsin. Wisconsin, 2004.

# ANEXO A - PLANILHA DE APOIO AO PROJETO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	<b>PROJETO DE MAQUINA SINCRONA DE IMA PERMANENTE</b>																						
4	Constante de inclinação de ranhura aberta $\chi$ (Graus)					5,05																	
5	Bobinas por grupo $q$					1																	
6	Ângulo de centralização $\gamma$ (Graus)					70	(60,120,180)		$\gamma = \text{ângulo de centralização}$ (pag 69)														
7	Ângulo de distorção $\alpha$ (Graus)					20																	
8	Diâmetro interno Dis (mm)					120																	
9	Número de espiras por fase polo Ns					136	120		17														
10	Corrente de pico da fase Im					8																	
11	Entreferro ima-estator g (mm)					2																	
12	Distância rotor-estator lg (mm)					2,5																	
13	Comprimento do rotor li (mm)					45																	
14	Número de polos-p					8																	
15	Densidade de corrente de estator (A/mm <sup>2</sup> )					7																	
16	Área da seção da ranhura (mm <sup>2</sup> )					74,25																	
18	<b>Estimativa de B<sub>gm1</sub> com NdFeB N40 (rotor com imã sobreposto)</b>																						
20	Largura do imã - Wm (mm)					40																	
21	B <sub>gm</sub> (T)					1	de 75 a 85% de Br para NdFeB																
23	Alfa m =					2,667	rad																
24	Alfa m =					152,793	graus																
25	B <sub>gm1</sub> =					1,238	T																
26	THD de B (%)					29,158																	
28	<b>CÁLCULO DA CONSTANTE DE ENROLAMENTO K1</b>																						
29	kx1 =					0,999676																	
30	kp1 =					0,819162																	
31	kd1 =					1																	
32	ks1 =					0,994931																	
34	k1 =					0,814746																	
36	<b>MAGNETIC SHEAR STRESS-MSS</b>																						
38	Ks1 =					14108,61																	
39	MSS =					8,730029	(kN/m <sup>2</sup> )																
41	<b>Força elétrica sobre o rotor</b>																						
42	le =					49	mm																
44	Fmax =					161,26	N																
46	<b>Conjugado elétrico- Ce</b>																						
48	Ce =					9,68	Nm																

Largura da ranhura face D0 (mm)	4,45
Passo dos dentes TS (mm)	8,9
Entreferro g (mm)	2
k <sub>c</sub> (simplificado)	1,267
k <sub>c</sub> (preciso)	1,179
g <sub>e</sub> simplificado (mm)	2,534
g <sub>e</sub> preciso (mm)	2,358

Área do grupo/polo (mm <sup>2</sup> ):	942
--	-----

Velocidade (RPM)	Pmax(W)	Vtase(RMS V/nha)	RMS
10	10,1	0,38	0,66
50	50,7	1,91	3,31
100	101,3	3,82	6,62
200	202,6	7,65	13,25
300	304,0	11,47	19,87
400	405,3	15,29	26,49
500	506,6	19,12	33,11
600	607,9	22,94	39,74

Corrente por fase RMS (A):	8,833046
Seção de condução (mm <sup>2</sup> ):	1,261863

82	<b>Fator de Enchimento das Ranhuras</b>	
84	Área Seção Máxima do Condutor (mm <sup>2</sup> ):	1,583
85	Fator de enchimento(%):	72,49
86	16 AWG Camada dupla (observar)	
87	<b>Corrente Máxima (proteção contra desmagnetização por RA)</b>	
88	Densidade de desmagnetização do imã Bd (T):	0,2
89	Densidade Residual do imã Br (T):	1,4
90	Espessura do imã lm (mm):	1
91	Imax(A):	27,07
92	<b>Condutor Comercial</b>	
93	Comprimento da bobina média do grupo (mm):	287
94	Resistência elétrica (Ohm/m):	0,0176
95	Peso específico do condutor (kg/km)	11,8
96	Comprimento total nas 3 fases (m):	117,096
97	Resistência total (Ohm):	2,06
98	Queda de tensão por fase na resistência (V):	6,07
99	Queda de tensão por fase percentual (%):	26,45
100	Peso do condutor total (kg):	1,38
101	16AWG	

Bitola (AWG)	Seção Condutora (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro Max. (mm)	Área Met. (mm <sup>2</sup> )	Peso (Kg/Km)	Resistência Elétrica (ohm/m) 100 °C
35	0,015	0,18	0,025	0,139	1,4422
34	0,020	0,20	0,031	0,183	1,1437
33	0,025	0,22	0,038	0,230	0,9070
32	0,031	0,25	0,049	0,290	0,7192
31	0,039	0,27	0,057	0,368	0,5704
30	0,049	0,30	0,071	0,463	0,4523
29	0,062	0,33	0,085	0,580	0,3587
28	0,078	0,37	0,107	0,731	0,2845
27	0,099	0,41	0,132	0,923	0,2256
26	0,126	0,46	0,166	1,170	0,1789
25	0,159	0,52	0,212	1,470	0,1419
24	0,196	0,57	0,255	1,850	0,1125
23	0,246	0,63	0,312	2,330	0,0892
22	0,312	0,71	0,396	2,930	0,0708
21	0,396	0,79	0,490	3,700	0,0561
20	0,503	0,89	0,622	4,650	0,0445
19	0,636	0,99	0,769	5,870	0,0353
18	0,785	1,09	0,933	7,410	0,0280
17	1,094	1,28	1,286	9,320	0,0222
16	1,368	1,42	1,583	11,80	0,0176
15	1,539	1,51	1,790	14,90	0,0140
14	2,011	1,71	2,295	18,70	0,0111

## 111 Perdas na Máquina a Plena Carga

112	Perdas no condutor	
113	Perdas no Cobre (W):	160,80
114	Perdas no Cobre (%):	26,45

### 116 Perdas Corrente Parasita nos Dentes do Núcleo

117	Constante $k_c$ da liga do estator:	0,11	pag. 539
118	Largura do dente face $t_t$ (mm):	5	
119	Tamanho do dente $d_s$ (mm):	13,5	
120	Largura do dente base $t_r$ (mm):	7	
121	Largura da Ranhura face $b_0$ (mm):	3	
122	Largura da Ranhura Base $b_s$ (mm):	7	
123	Largura da Coroa $d_{cs}$ (mm):	19	
124	Numero de Ranhuras do nucleo $N_r$	32	

126	Frequencia elétrica $\omega_e$ (rad/s):	251,32
-----	---	--------

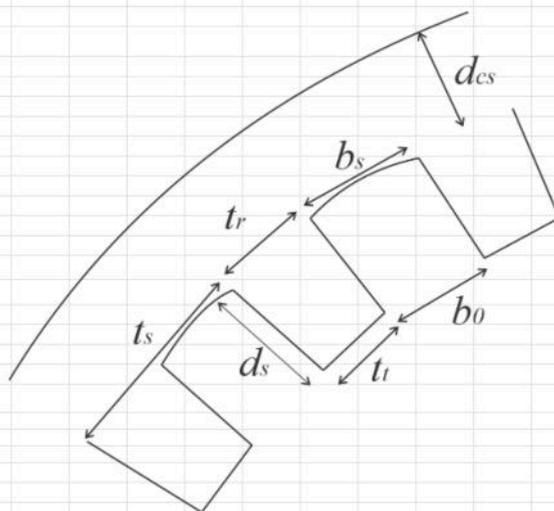
128	Densidade de Fluxo na face dos dentes $B_{tsm}$ (T)	1,6	pag. 541
129	Perdas por volume (W/m <sup>3</sup> ):	38169,0132	
130	Volume dos dentes (m <sup>3</sup> ):	0,00011664	
131	Perdas Totais dentes (W):	4,45203370	

### 133 Perdas Corrente Parasita na Coroa do Núcleo

136	Densidade de Fluxo na Face da Coroa $B_{cm}$ (T):	0,3350729;
137	Perdas por volume (W/m <sup>3</sup> ):	744,920008
138	Volume da Coroa (m <sup>3</sup> ):	0,00044587;
139	Perdas Totais coroa (W):	0,33213978;

### 141 Perdas Totais

142	Perdas Totais (W):	165,58
143	Rendimento Parte Eletrica (%):	72,7629272



## 146 Parâmetros de Regime Permanente / fase

### 148 Calculo de Lm

151	$K_s$ (RMS):	12244,7804;
152	$L_m$ (H):	0,00216581;
153	$L_{base}$ (H):	0,02519659
154	$L_m$ (pu):	0,08595664; pag. 544 de 0,1 a 0,5pu

### 157 Calculo de R<sub>s</sub>

159	Velocidade (RPM)	600
160	$R_s$ (Ohm):	0,6869632
161	$R_{base}$ (Ohm):	6,33240723
162	$R_s$ (pu):	0,10848373

### 164 Fonte de Corrente

165	(corrente de pico)	
166	$I_f$ (A):	93,07

### 168 Fonte de Tensão equivalente

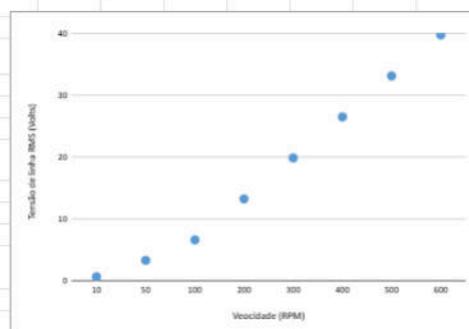
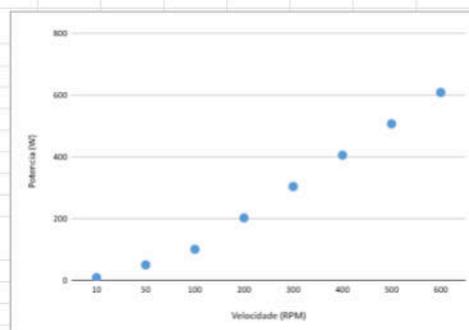
170	$E_i$ (volts):	50,66
-----	----------------	-------

### 172 Reatancia de magnetização X<sub>m</sub>

174	$X_m$ (Ohm):	0,54
-----	--------------	------

### 176 Estimativa de L<sub>e</sub> dispersão de fluxo

178	Estimativa de $x_e$ (Ohm):	1,27 0,15 a 0,3 pu pag. 238
-----	----------------------------	-----------------------------

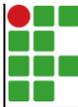


## ANEXO B - ROTINAS DO MATLAB

```

1  %Potencia disponivel no terminal da MSIP
2  % Carga r+xloadj
3  %
4  %clear all;
5  %Dados de entrada Fio 17AWG
6  iff=241.84/sqrt(2);
7  xm=0.09;
8  rs=0.5521;
9  xe=1.45;
10 %Reatancia capacitiva
11 xc=0*j;
12 %definição da escala
13 xmin=0.1; %limite inferior
14 xmax=50; %limite superior
15 pontos=1000; % numero de pontos no intervalo
16 %%%%%%%%%%%
17 h=(xmax-xmin)/pontos;
18 x=xmin-h;
19 for k=1:pontos+1
20     x=x+h;
21     rload(k)=x;
22     iload=iff*(xm*j)/((x+xc)+rs+xe*j+xm*j);
23     vload=(x+xc)*iload;
24     vangulo=angle(vload);
25     iloadang=angle(iload);
26     vload11(k)=abs(vload);
27     pload(k)=3*abs(vload)*abs(iload)*cos(vangulo-iloadang);
28     iload2(k)=abs(iload);
29
30
31
32 end;
33 figure(1);
34 plot(vload11,pload);grid;
35 xlabel('Tensão (V)');
36 ylabel('Potencia (W)');
37 figure(2);
38 plot(iload2,pload);grid;
39 xlabel('Corrente (A)');
40 ylabel('Potencia (W)');

```

	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### TCC Finalizado

<b>Assunto:</b>	TCC Finalizado
<b>Assinado por:</b>	Antonio Néto
<b>Tipo do Documento:</b>	Anexo
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Antonio Batista dos Santos Néto, ALUNO (20191610046) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 28/03/2025 22:42:28.

Este documento foi armazenado no SUAP em 28/03/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1439870

Código de Autenticação: 3f9b98cf3d

