

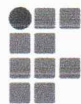
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS CAMPUS ITUMBIARA
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RANGEL COSTA CAVALCANTE

**O ESTUDO DE PEQUENOS GERADORES EÓLICOS COMO FONTE
COMPLEMENTAR DE ENERGIA ELÉTRICA**

ITUMBIARA/GO

2024



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Rangel Costa Cavalcante

Matrícula: 20141040070061

Título do Trabalho: O estudo de pequenos geradores eólicos como fonte complementar de energia elétrica

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ () O documento está sujeito a registro de patente.
☐ () O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ () Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 01/12/2024.
Local Data

Rangel Costa Cavalcante

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

RANGEL COSTA CAVALCANTE

**O ESTUDO DE PEQUENOS GERADORES EÓLICOS COMO FONTE
COMPLEMENTAR DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Itumbiara como parte dos requisitos parcial para obtenção do título de Bacharelado, sob a orientação do professor Victor Regis Bernadeli.

ITUMBIARA/GO

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C377 Cavalcante, Rangel Costa
O estudo de pequenos geradores eólicos como fonte complementar de energia elétrica. / Rangel Costa Cavalcante. -- Itumbiara, 2024.
115 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Victor Regis Bernadeli.

1. Energia eólica. 2. Energia alternativa. 3. Motores elétricos. I. Título. II. Cavalcante, Rangel Costa IV. Bernadeli, Victor Regis. V. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.46



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Rangel Costa Cavalcante

O ESTUDO DE PEQUENOS GERADORES EÓLICOS COMO FONTE COMPLEMENTAR DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 21 de Novembro de 2024, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. MSc. Carlos Antunes Queiroz Júnior - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO

2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Carlos Antunes de Queiroz Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/11/2024 14:00:48.
- **Marcos Antonio Arantes de Freitas**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/11/2024 13:38:27.
- **Victor Regis Bernardeli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/11/2024 10:26:52.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/11/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 589643

Código de Autenticação: a838ada814



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Avenida Furnas, nº 55, None, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

DEDICATÓRIA

Com muito orgulho, dedico este trabalho à minha mãe, Elenice Raquel e a meu padrasto Adão da Silva, responsáveis pela formação de meu caráter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Victor Regis Bernadeli, meu orientador que gerou a oportunidade para que eu adquirisse conhecimentos.

Em geral, agradeço a todos os professores com quem tive a oportunidade de aprender e aos servidores do Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara.

A todos os meus colegas de engenharia, em especialmente Leonardo Gonçalves, Yuri Campos, Wellington Malaquias e Gabriel Oliveira, por constantemente dividir ideias e opiniões.

À adorável amiga Maria Rita Batista pelo constante incentivo e pelas palavras de apoio durante todo este tempo.

E, finalmente à minha família, Marcos Cavalcante, Adão da Silva, Edilvane, Dionesvan e Elenice Raquel, que são minha motivação para nunca parar de tentar.

RESUMO

O ano de 2021 foi ocasionado por dois pontos relevantes na comunidade em geral no Brasil, o primeiro a continuação da pandemia COVID-19 e o segundo a crise hídrica ocasionada pela falta de chuvas e reservatórios baixo para produção de energia elétrica. Devido a falta de chuva o crescimento em investimento na produção de energia elétrica vem aumentando como fonte complementar de energia. No que concerne a energia solar a região do sudeste de Goiás observou-se um crescimento muito grande em instalação de painel solares, entretanto a energia eólica o setor acumula recorde de geração de energia no Nordeste. Como impacto no avanço para mitigação de solução de instalação de geradores eólicos de pequeno porte, tem-se o estudo do gerador para realizar o processo de conversão eletromecânica de energia. O presente trabalho objetiva o estudo e implementação do Gerador de Indução Trifásico Gaiola para aproveitamento de Energia Eólica. Os testes experimentais com o Gerador de Indução Trifásico Gaiola serão realizados em ambiente laboratorial. A potência de entrada será a turbina eólica que é emulada por um motor de indução trifásico conectado ao inversor de frequência. Para emular o consumidor local será adicionado aos terminais de Gerador banco de resistores com possibilidade de conectar carga resistiva e indutiva para testar a viabilidade do sistema de geração. Com os resultados esperados do projeto tem-se, levantamentos dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do Gerador obtidos dos ensaios em vazio e rotor bloqueado a construção de um código no MATLAB, que gera gráficos dos resultados destes ensaios. Os resultados experimentais a autoexcitação é alcançada selecionando um banco de capacitor além disto a tensão de saída e a potência de saída dependem do valor e da natureza da carga, podendo até causar a desmagnetização do gerador.

Palavras-chave: Energia Eólica, Fonte Alternativa de Energia, Gerador de Indução Trifásico, Motor de Indução Trifásico

ABSTRACT

The year 2021 was caused by two relevant points in the community in general in Brazil, the first the continuation of the COVID-19 pandemic and the second the water crisis caused by the lack of rain and low reservoirs for the production of electricity. Due to the lack of rain, the growth in investment in the production of electricity has been increasing as a complementary source of energy. With regard to solar energy, the southeastern region of Goiás has seen a very large growth in the installation of solar panels, however wind energy, the sector accumulates a record of energy generation in the Northeast. As an impact on the progress towards mitigation of the installation solution for small wind generators, there is the study of the generator to carry out the electromechanical energy conversion process. The present work aims at the study and implementation of the Three-Phase Cage Induction Generator for harnessing Wind Energy. Experimental tests with the Cage Three-Phase Induction Generator will be carried out in a laboratory environment. The input power will be the wind turbine which is emulated by a three-phase induction motor connected to the frequency inverter. To emulate the local consumer, a bank of resistors will be added to the Generator terminals with the possibility of connecting resistive and inductive loads to test the viability of the generation system. With the expected results of the project, we have surveyed the parameters of the Generator's equivalent electrical circuit obtained from the no-load and blocked-rotor tests and constructed a code in MA-TLAB, which generates graphs of the results of these tests. The experimental results self-excitation is achieved by selecting a capacitor bank, in addition, the output voltage and output power depend on the value and nature of the load, and may even cause demagnetization of the generator.

Keywords: Wind Energy, Alternative Energy Source, Three-Phase Induction Generator, Three-Phase Induction Motor

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - ENERGIA EÓLICA.	17
FIGURA 1.2 - TURBINA EÓLICA.	18
FIGURA 1.3 - PÁS EÓLICA.	19
FIGURA 1.4 - ROTOR EÓLICO.	20
FIGURA 1.5 - FUNDAÇÕES PARA AEROGERADORES.	21
FIGURA 1.6 - PRÉ-MONTAGEM TORRE DE CONCRETO.	22
FIGURA 1.7 - TURBINA EÓLICA HORIZONTAL COM 3 PÁS.	24
FIGURA 1.8 - TURBINA EÓLICA VERTICAL DARRIEUS.	25
FIGURA 1.9 - TURBINA EÓLICA VERTICAL SAVONIUS.	25
FIGURA 1.10 - TURBINA EÓLICA-SOLAR VERTICAL.	26
FIGURA 1.11 - TURBINA EÓLICA VERTICAL GORLOV.	26
FIGURA 1.12 - TURBINA EÓLICA VERTICAL GORLOV.	27
FIGURA 1.13 - TURBINA GORLOV EM HIDROELETRICIDADE.	27
FIGURA 1.14 - TURBINA GORLOV EM HIDROELETRICIDADE.	27
FIGURA 1.15 - TURBINA EÓLICA VERTICAL GIROMILL.	28
FIGURA 1.16 - PARQUE EÓLICO OFFSHORE.	29
FIGURA 1.17 - VELOCIDADE MÉDIA ANUAL PARA ALTURA DE 30METROS.	30
FIGURA 1.18 - VELOCIDADE MÉDIA ANUAL PARA ALTURA DE 100METROS.	31
FIGURA 1.19 - VELOCIDADE MÉDIA ANUAL PARA ALTURA DE 200METROS.	31
FIGURA 1.20 - DIREÇÃO DOS VENTOS.	31
FIGURA 2.1 - COMPONENTES DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA.	34
FIGURA 2.2 - FLUXO DE POTÊNCIA NA MÁQUINA DE INDUÇÃO; (A) NO MODO MOTOR; (B) MODO GERADOR	35
FIGURA 2.3 – DIAGRAMA FASORIAIS; (A)MODO MOTOR; (B) MODO GERADOR	37
FIGURA 2.4 - EFEITO DA SATURAÇÃO	38
FIGURA 2.5 - GI INTERLIGADO A REDE	40
FIGURA 2.6 - PROCESSO DE AUTOEXCITAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO	42
FIGURA 2.7 - GI EXCITADO POR BANCO DE CAPACITORES.....	43
FIGURA 2.8 - COMPORTAMENTO DO CONJUGADO COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS SÍNCRONAS ...	44
FIGURA 2.9 - COMPORTAMENTO DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E DA REATÂNCIA CAPACITIVA COM A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA SÍNCRONA.....	44
FIGURA 2.10 - CURVA CARACTERÍSTICA DO COMPORTAMENTO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DO AUMENTO DE CARGA EM UM GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO	46
FIGURA 2.11 - MÉTODO DO CAPACITOR EM SÉRIE.....	47
FIGURA 2.12 - RESULTADOS DE REGULAÇÃO PARA REGULAÇÃO POR CAPACITOR EM SÉRIE.....	48

FIGURA 2.13 - REGULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE CAPACITORES	48
FIGURA 2.14 - RESULTADOS DA REGULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE CAPACITORES	49
FIGURA 2.15 - REGULAÇÃO POR CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA.....	50
FIGURA 2.16 - ESQUEMÁTICO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO POR CHAVEAMENTO DE TIRISTORES	51
FIGURA 2.17 - SISTEMA DE REGULAÇÃO POR INVERSOR COM VELOCIDADE CONTROLADA	52
FIGURA 3.1 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA POR FASE	57
FIGURA 3.2 - CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE	64
FIGURA 3.3 - IMPEDÂNCIA DE THEVENIN DO CIRCUITO DE ENTRADA	65
FIGURA 3.4 - IMPEDÂNCIA DE THEVENIN DO CIRCUITO DE ENTRADA	66
FIGURA 3.5 - CURVA CARACTERÍSTICA DE TORQUE VERSUS VELOCIDADE DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA GAIOLA DE ESQUILO.....	67
FIGURA 3.6 - CURVA CARACTERÍSTICA DE TORQUE VERSUS VELOCIDADE DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA, MOSTRANDO AS FAIXAS ESTENDIDAS DE OPERAÇÃO (REGIÃO DE FRENAGEM E REGIÃO COMO GERADOR).....	67
FIGURA 3.7 - EFEITO DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA DO ROTOR SOBRE A CARACTERÍSTICA DE TORQUE VERSUS VELOCIDADE DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ROTOR BOBINADO.	69
FIGURA 4.1 - MÁQUINA DE INDUÇÃO USADA NOS EXPERIMENTOS.	71
FIGURA 4.2 - PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO.	71
FIGURA 4.3 - ENSAIO A VAZIO DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA.	72
FIGURA 4.4 - MEDIDAS NO ENSAIO A VAZIO.....	73
FIGURA 4.5 - FASORES NO ENSAIO A VAZIO.	74
FIGURA 4.6 - FORMAS DE ONDA DA TENSÃO NO ENSAIO A VAZIO.	74
FIGURA 4.7 - FORMAS DE ONDA DA CORRENTE NO ENSAIO A VAZIO.....	74
FIGURA 4.8 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O ROTOR BLOQUEADO	76
FIGURA 4.9 - MONTAGEM DO ENSAIO A ROTOR BLOQUEADO.....	77
FIGURA 4.10 - MEDIDAS NO ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO.	78
FIGURA 4.11 - FASORES NO ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO.	78
FIGURA 4.12 - FORMAS DE ONDA DA TENSÃO E DA CORRENTE NO ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO.	78
FIGURA 4.13 - CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DA MÁQUINA DE 3 CV.....	81
FIGURA 4.14 – DIAGRAMA MONTADO NO MATLAB/SIMULINK DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA	82
FIGURA 4.15 – PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.....	82
FIGURA 4.16 - TENSÃO V_A , V_B E V_C COM CARGA RESISTIVA	83
FIGURA 4.17 – TENSÃO V_A , V_B E V_C COM CARGA RESISTIVA.	83
FIGURA 4.18 - CORRENTE I_A , I_B E I_C COM CARGA RESISTIVA	84
FIGURA 4.19 – CORRENTE I_A , I_B E I_C COM CARGA RESISTIVA.....	84
FIGURA 4.20 - TENSÃO V_A , V_B E V_C NO BANCO DE CAPACITORES	85
FIGURA 4.21 – TENSÃO V_A , V_B E V_C NO BANCO DE CAPACITORES.	85
FIGURA 4.22 - CORRENTE I_A , I_B E I_C NO BANCO DE CAPACITORES.	86
FIGURA 4.23- CORRENTE I_A , I_B E I_C NO BANCO DE CAPACITORES.....	86

FIGURA 4.24 - CORRENTE TOTAL I_A , I_B E I_C NO GERADOR.....	87
FIGURA 4.25 - CORRENTE TOTAL I_A , I_B E I_C NO GERADOR.....	87
FIGURA 5.1 - LIGAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA MICROGERAÇÃO EÓLICA.....	90
FIGURA 5.2 - LIGAÇÃO E ACOPLAMENTO DO GERADOR DE 3CV AO MOTOR DE 10CV	91
FIGURA 5.3 – ESCORVAMENTO DA MÁQUINA	93
FIGURA 5.4 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM ESTRELA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA RESISTIVA EM ESTRELA.....	94
FIGURA 5.5 - VETOR DE TENSÃO E CORRENTE PARA O ITEM APRESENTADO 5.4.1.	94
FIGURA 5.6 - POTÊNCIA ENTREGUE A CARGA PARA O ITEM APRESENTADO 5.4.1.....	95
FIGURA 5.7 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM ESTRELA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA RESISTIVA EM DELTA	95
FIGURA 5.8 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA RESISTIVA EM ESTRELA.....	96
FIGURA 5.9 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA RESISTIVA EM DELTA	97
FIGURA 5.10 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM DELTA E CARGA RESISTIVA EM ESTRELA.....	98
FIGURA 5.11 - VETOR DE TENSÃO E CORRENTE PARA O ITEM APRESENTADO 5.4.4.....	98
FIGURA 5.12 - POTÊNCIA ENTREGUE A CARGA PARA O ITEM APRESENTADO 5.4.4.....	99
FIGURA 5.13 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM DELTA E CARGA RESISTIVA EM DELTA	99
FIGURA 5.14 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM ESTRELA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA INDUTIVA EM ESTRELA.....	100
FIGURA 5.15 - VETOR DE TENSÃO E CORRENTE PARA O ITEM APRESENTADO 5.5.1.	101
FIGURA 5.16 - POTÊNCIA ENTREGUE A CARGA PARA O ITEM APRESENTADO 5.5.1.....	101
FIGURA 5.17 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM ESTRELA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA INDUTIVA EM DELTA	102
FIGURA 5.18 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA INDUTIVA EM ESTRELA.....	103
FIGURA 5.19 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM ESTRELA E CARGA INDUTIVA EM DELTA	103
FIGURA 5.20 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM DELTA E CARGA INDUTIVA EM ESTRELA.....	104
FIGURA 5.21 - VETOR DE TENSÃO E CORRENTE PARA O ITEM APRESENTADO 5.5.4.....	105
FIGURA 5.22 - POTÊNCIA ENTREGUE A CARGA PARA O ITEM APRESENTADO 5.5.4.....	105
FIGURA 5.23 - DIAGRAMA FUNCIONAL DOS EXPERIMENTOS ESTUDOS DO GERADOR EM DELTA, CAPACITOR EM DELTA E CARGA INDUTIVA EM DELTA	105

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - RESISTÊNCIA DE CADA FASE	72
TABELA 4.2 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO	73
TABELA 4.3– DADOS DO ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO	78
TABELA 5.1 - SELEÇÃO DO CAPACITOR DE EXCITAÇÃO MÍNIMA.....	92
TABELA 5.2 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	94
TABELA 5.3 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	95
TABELA 5.4 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	96
TABELA 5.5 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	97
TABELA 5.6 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	98
TABELA 5.7 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	99
TABELA 5.8 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	101
TABELA 5.9 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	102
TABELA 5.10 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	103
TABELA 5.11 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	104
TABELA 5.12 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	104
TABELA 5.13 - VALORES DE FREQUÊNCIA, TENSÃO E CORRENTE DE LINHA MEDIDOS DURANTE O ENSAIO	106

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1.1 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA DE 2022 (EM GW).	32
GRÁFICO 1.2- CAPACIDADE INSTALADA (EM MW) DE 2023.	33
GRÁFICO 1.3 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA EM MW DE 2005 A 2024	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abeeólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
Brams	Brasilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CLG	Conversor do lado do Gerador
CLR	Conversor do lado da rede
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
GEE	Gases do efeito estufa
GI	Gerador Isolado
GIGE	Gerador de indução gaiola de esquilo
GIRB	Gerador de indução gaiola de esquilo
GRV	Gerador de relutância variável
GS	Gerador síncrono
GSIP	Gerador síncrono de ímãs permanentes
GWEC	Global Wind Energy Council
IEA	International Energy Agency
Proinfra	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PÁS.....	18
1.1.1	Rotor	19
1.1.2	Nacele.....	20
1.1.3	Torre	21
1.1.4	Caixa de transmissão (gearbox)	23
1.1.5	Biruta.....	23
1.1.6	Anemômetro.....	23
1.1.7	Tipo de geradores eólicos.....	24
1.1.8	Tipos de energia eólica	28
1.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA	29
1.3	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	30
2	GERADOR DE INDUÇÃO	34
2.1	MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO GERADOR.....	35
2.1.1	O efeito da saturação.....	37
2.1.2	Passos para conexão do gerador a rede	39
2.1.3	Compensação da demanda de potência reativa	40
2.2	OPERAÇÃO ISOLADA.....	41
2.2.1	O processo de autoexcitação	41
2.2.2	O problema da regulação de tensão e frequência nos geradores de indução isolados	43
2.3	REGULAÇÃO DE TENSÃO NO GERADOR DE INDUÇÃO	46
2.3.1	Regulação por capacitor em série	46
2.3.2	Regulação por capacitores chaveados	48
2.3.3	Regulação por controle de fluxo de potência ativa	50
2.3.4	Regulação por controle de fluxo de potência reativa	51
2.3.5	Regulação por inversor de frequência	52
3	MODELAGEM DA MÁQUINA.....	53
3.1	MODELAGEM DA MÁQUINA DE INDUÇÃO	53
3.1.1	Conceito de escorregamento do rotor.....	54
3.2	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA.....	56

3.3	PERDAS DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA	58
3.4	POTÊNCIA E TORQUE EM MÁQUINAS ASSÍNCRONAS	58
3.4.1	Perdas de fluxo de potência	59
3.5	POTÊNCIA E TORQUE EM UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA	60
3.6	DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DO CONJUGADO INDUZIDO	63
3.7	TORQUE MÁXIMO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA.....	68
4	ENSAIOS NA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	70
4.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE	70
4.2	MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA	70
4.3	O ENSAIO A VAZIO OU SEM CARGA	71
4.3.1	Valor da resistência R_1 do estator.....	72
4.3.2	Realização do ensaio a vazio e resultados	73
4.4	O ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO	75
4.4.1	Realização do ensaio com rotor bloqueado e resultados.....	77
4.4.2	Circuito equivalente de thévenin.....	80
4.5	SIMULA��ES.....	81
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	89
5.1	ENSAIOS COMO GERADOR AUTOEXCITADO.....	89
5.1.1	Objetivo	89
5.1.2	Material utilizado	89
5.1.3	Acoplamento mecânico	90
5.1.4	Experimentos realizados.....	91
5.2	CAPACITÂNCIA MÍNIMA PARA AUTOEXCITA��O SEM CARGA	91
5.3	ANÁLISE E COMPORTAMENTO DO ESCORVAMENTO	93
5.4	AVALIA��O DO DESEMPENHO PARA CARGA RESISTIVA E CAPACITÂNCIA FIXA E VELOCIDADE VARIÁVEL	93
5.4.1	Gerador em estrela, Capacitor em estrela e Carga resistiva em estrela e delta .	94
5.4.2	Gerador em estrela, Capacitor em delta e Carga resistiva em estrela e delta	96
5.4.3	Gerador em delta, Capacitor em estrela e Carga resistiva em estrela e delta	96
5.4.4	Gerador em delta, Capacitor em delta e Carga resistiva em estrela e delta.....	98
5.5	AVALIA��O DO DESEMPENHO PARA CARGA INDUTIVA E CAPACITÂNCIA FIXA E VELOCIDADE VARIÁVEL	100
5.5.1	Gerador em estrela, Capacitor em estrela e Carga indutiva em estrela e delta	100

5.5.2	Gerador em estrela, Capacitor em delta e Carga indutiva em estrela ou delta	102
5.5.3	Gerador em delta, Capacitor em estrela e Carga indutiva em estrela e delta..	103
5.5.4	Gerador em delta, Capacitor em delta e Carga indutiva em estrela e delta.....	104
6	CONCLUSÃO	107
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

A Energia eólica é gerada pelas forças dos ventos, essa energia contida nos ventos pode ser transformada em energia elétrica. E energia eólica é um tipo de energia renovável é considerada como uma das formas em que se manifesta a energia do sol, pois o vento é o movimento do ar causado pelo aquecimento irregular da atmosfera pela radiação solar.

A energia eólica ocorre a conversão da energia cinética em eletricidade, que é captada pelas turbinas dos aerogeradores (ou turbina eólica). Os aerogeradores possuem hélices que se movimentam com a força dos ventos, energia cinética é convertida em um processo de conversão eletromecânica e em seguida transformada em energia elétrica.

Essa geração de energia conforme apresentado na Figura 1.1 depende do vento, seu rendimento máximo depende de uma determinada velocidade do vento e como na natureza o vento não é contínuo pequenas alterações gera mudanças no desempenho.

Figura 1.1 - Energia eólica.



Fonte: (MEDEIROS,2021)

Portanto a captação dessa energia para a geração de energia elétrica é feita por aerogeradores (turbinas eólicas) responsável por transformar a energia cinética dos ventos em força mecânica e depois em elétrica.

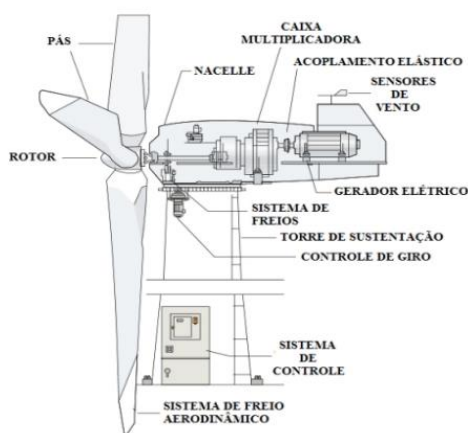
O princípio de funcionamento de um aerogerador tem como parte de sua estrutura as hélices (ou pás) que giram ao contato com a força dos ventos, de forma controlada. Este

movimento faz girar o rotor e o eixo principal, o qual está conectado a uma caixa multiplicadora (gearbox) que aumenta a velocidade de rotação.

Um aerogerador, turbina eólica ou gerador eólico ela transforma a energia cinética dos ventos em energia mecânica e depois em energia elétrica. Existem diferentes tipos de aerogeradores, mas todos possuem a mesma estrutura básica.

Uma turbina eólica é composta por: Pás, Rotor, Nacelle, Torre, Caixa de transmissão, Gerador, Biruta, Anemômetro, conforme a Figura 1.2.

Figura 1.2 - Turbina eólica.



Fonte: (MEDEIROS, 2021)

1.1 PÁS

As pás são responsáveis por captar a energia cinética dos ventos e transferi-la para o rotor, elas são consideradas as peças mais críticas e estão sujeitas a enormes tensões, o material utilizado para fabricar são poliéster ou epóxi misturado com fibra de vidro, aramidas ou fibra de carbono.

Elas devem ser equilibradas a fim de minimizar qualquer tipo de vibração, por este motivo os aerogeradores possuem três pás que se movem ao redor de um eixo horizontal, pois assim do ponto de vista técnico quanto menos pás mais equilíbrio. Além disso a torre deve suportar toda a força.

Os aerogeradores estão orientados sempre no mesmo sentido e seguindo o vento, isso é possível com a utilização de cata-vento que estão em cima da nacelle que se encarrega de indicar

ao controle se o rotor está situado corretamente em direção ao vento, para aproveitar sua energia potencial.

As pás eólicas são grandes, pesadas e extremamente difíceis de transportar, por isso a logística por trás do transporte leva meses para ser planejada, em virtude da complexibilidade que o serviço exige, que envolve veículos, equipamentos e profissionais especializados.

Conforme apresentado na Figura 1.3 transporte exige um estudo de viabilidade abrangente em relação às rotas devido as grandes distâncias a serem percorridos dentro de um país, como o Brasil com seus vários tipos de estradas, nem sempre em condições favoráveis, remoção de obstáculos, obtenção de licenças entre outras providências.

Figura 1.3 - Pás eólica.



Fonte: (DUARTE, 2020)

1.1.1 Rotor

A Figura 1.4 mostra o rotor que é o componente da turbina eólica que gira com a passagem dos ventos, e pode ser horizontal ou vertical. Tecnicamente é a parte frontal da turbina na qual são conectadas as pás e pode pesar mais de 33 toneladas. Seu tamanho pode ter de 20 a 170 metros de diâmetro. Quanto maior for o rotor e as pás de um aerogerador, mais energia ele será capaz de produzir.

Figura 1.4 - Rotor eólico.



Fonte: (ENELGREENPOWER, 2023)

Um de seus principais componentes é o sistema hidráulico que permite o movimento das pás em distintas posições para otimizar a força do vento ou parar a turbina por completo.

1.1.2 Nacele

É o componente com maior peso do sistema, podendo chegar a mais de 100 toneladas em alguns casos, está acoplado ao rotor da turbina eólica.

- Dentro dela estão inseridos vários componentes como:
- Controladores e inversores
- Plataforma de serviços
- Sistema de aquecimento de ar
- Gerador
- Motores de posicionamento da nacele
- Luva de acoplamento
- Sistema de freios
- Plataforma da nacele
- Caixa multiplicadora
- Sistema hidráulico

- Sistema de trava do rotor
- Aquecimento de óleo
- Eixo principal

A nacele da turbina eólica estão os componentes responsáveis pelo funcionamento da estrutura, sendo a principal área que passa por reparos devido ao desgaste de alguns itens, como eixo, aquecedor de óleo, trava do rotor, vazamento de óleo lubrificante, além de sofrer desgaste da estrutura por conta de atrito ou corrosão.

Este desgaste ao longo prazo causa perda do ajuste dos componentes deixando de operar corretamente.

1.1.3 Torre

É a estrutura que sustenta o rotor e a nacele do aerogerador. As torres podem ultrapassar facilmente os 200 metros de altura.

A Figura 1.5 mostra as fundações de aerogeradores que podem ser diretas ou indiretas, do tipo maciço ou semiocais, servem de ancoragem da propensão da torre, quando torre em concreto.

Figura 1.5 - Fundações para aerogeradores.



Fonte: (DUARTE, 2020)

Em relação ao tipo de torre existem dois tipos, as metálicas e as de concreto.

As torres metálicas são produzidas em indústrias normalmente de tubos e são levadas por partes até o local, e montadas lá.

Já as torres de concreto são construídas próximos aos parques eólicos, sendo pré-fabricadas e concluídas no local, conforme a Figura 1.6.

Figura 1.6 - Pré-montagem torre de concreto.



Fonte: (MZ, 2022).

Quando comparados os dois tipos de torres as torres metálicas possuem vulnerabilidades que as construídas com concreto, pois o vento é forte as torres metálicas têm pouca inércia da seção estrutural, ou seja, elas encolhem e comprometem a potência dos aerogeradores, impedindo que eles girem na velocidade máxima.

As vantagens das torres com elementos pré-fabricados.

- Menor tempo de execução pois a torre de concreto permite que seja montada em uma fábrica itinerante no canteiro de obras, eliminando o transporte por longas distâncias.
- Possibilita projetar torres mais altas.
- Baixa manutenção na comparação com as metálicas, que necessitam de reaperto constante.
- Permite uso de concreto de alto desempenho.
- Ausência de oxidação.
- Melhor comportamento dinâmico.
- Baixo risco de fadiga do material.

- Maior resistência ao fogo.
- Menor custo, já que o aço registrou aumento.
- Permite janelas maiores para a montagem das aduelas, enquanto as estruturas metálicas exigem que a operação seja paralisada quando o vento supera 20 km/h.

1.1.4 Caixa de transmissão (gearbox)

A caixa de transmissão ou caixa multiplicadora é responsável por multiplicar a rotação do eixo primário de entrada e transferi-la ao eixo secundário ligado ao gerador.

O rotor e o eixo primário rotacionam em baixas velocidades, entre 15 e 60 rpm, porém com elevado torque, enquanto o eixo secundário rotaciona entre 1000 e 3000 rpm com baixo torque.

1.1.5 Biruta

É um sensor responsável por medir a direção dos ventos, assim ele envia informações ao sistema de controle, possibilitando que a nacelle gire através de um motor e direcione o rotor para a direção do vento. A direção do vento precisa permanecer perpendicular à torre para que haja maior aproveitamento.

1.1.6 Anemômetro

É um equipamento que mede a intensidade e velocidade do vento, para isso, ele é posicionado na nacelle.

Com seus dados é possível gerar gráficos de curva de potência e realizar estudos de produção do parque.

Existem diferentes tipos de anemômetros, como o de copos, moinho de vento, termoe-létrico e ultrassônicos.

1.1.7 Tipo de geradores eólicos

Existem dois tipos básicos de rotores eólicos: os de eixo vertical e de eixo horizontal. Embora tenham a mesma finalidade os rotores diferem em relação ao seu custo relativo de produção, eficiência.

O gerador eólico com rotor de eixo horizontal é mais eficiente que o vertical, porém com custo mais elevado. Os aerogeradores com eixo horizontal são os mais utilizados no mundo e apresentam modelos de 2 ou 3 pás.

Os rotores de 3 pás e mais utilizados em larga escala devido a sua maior eficiência e estabilidade, conforme a Figura 1.7.

Figura 1.7 - Turbina eólica horizontal com 3 pás.



Fonte: (WINDBOX, 2024)

Os rotores de eixo vertical são indicados para instalações menores e próximos ao solo, e tem como vantagem o fato de não precisar de mecanismos de controle para alterações de direções dos ventos.

A Figura 1.8 o gerador eólico tipo Darrieus, normalmente de duas ou três pás em formato de arco, produz grande oscilações de torque e estresse cíclico na torre, para controlar essas oscilações é necessário o uso de três ou mais pás para estabilizar. Além disso, como o torque

de partida e muito baixo, geralmente exige alguma fonte de alimentação externa ou um rotor Savonius.

Figura 1.8 - Turbina eólica vertical Darrieus.



Fonte: (WINDBOX, 2024)

A Figura 1.9 mostra o gerador eólico tipo Savonius possui o formato de conchas e é muito utilizado em anemômetros e sistemas de ventilação. Sua construção é relativamente fácil, operam a baixas velocidades de vento, mas tem baixa velocidade de rotação o que faz com que não sejam adequadas para geração de altas quantidades de energia elétrica.

Figura 1.9 - Turbina eólica vertical Savonius.



Fonte: (ARCHIEXPO, 2023)

A turbina eólica solar é utilizada um rotor Savonius coberto por células fotovoltaicas capaz de transformar a energia solar em energia elétrica, conforme mostra a Figura 1.10.

Desse modo, sol e vento podem produzir eletricidade simultaneamente.

Figura 1.10 - Turbina eólica-solar vertical.



Fonte: (MAXWELL, 2023)

As Figura 1.11 e Figura 1.12 mostram a turbina do tipo Gorlov foi desenvolvido para solucionar os problemas do rotor Darrieus elas são feitas de materiais compósitos que precisam ser leves, duráveis e rígidos como fibra de carbono. Pode ser instalada em telhados e topo de prédios.

Suas principais vantagens são:

- Torque mais suave, menos vibração e ruído que a Darrieus.
- Gira sempre na mesma direção.
- Stress nas lâminas é reduzido.
- Tem aproximadamente 35% de eficiência.

Devido ao formato helicoidal, não precisa de motor para dar a partida.

Figura 1.11 - Turbina eólica vertical Gorlov.



Fonte: (STROCKI, 2019)

Figura 1.12 - Turbina eólica vertical Gorlov.



Fonte: (STROCKI, 2019)

A Figura 1.13 mostra a turbina Gorlov em hidroeletricidade pode ser usada para gerar energia em rios sem a necessidade de uma represa.

Figura 1.13 - Turbina Gorlov em hidroeletricidade.



Fonte: (STROCKI, 2019)

Seus impactos ambientais são menores e pode ser usado em marés e correntes oceânicas, conforme mostra a Figura 1.14.

Figura 1.14 - Turbina Gorlov em hidroeletricidade.



Fonte: (STROCKI, 2019)

A turbina eólica tipo Giromill é um subtipo da turbina Darrieus, porém com lâminas retas verticais à torre, como mostra a Figura 1.15.

A principal vantagem é que seu torque permanece quase constante o longo de um amplo intervalo, e alto torque de partida e maior eficiência em operações com ventos turbulentos, porém ela tem baixo rendimento.

Apesar de apresentar baixo rendimento.

Figura 1.15 - Turbina eólica vertical Giromill.



Fonte: (PORTILLO, 2021)

1.1.8 Tipos de energia eólica

A energia eólica possui dois tipos de acordo com o local onde as turbinas são instaladas, costeira (onshore) ou marítima (offshore).

Os parques eólicos onshore são localizados em terra normalmente perto da costa. Porém devido ao seu ruído precisam ser instaladas em locais afastados dos centros populacionais.

Os parques onshore possui vantagens em relação ao offshore como:

- Custo de instalação e operação mais baratos.
- Redução de custos e perdas na transmissão.

Os parques offshore tem instalações de torres em alto mar e podem ser fixados diretamente no leito marinho ou sobre um casco flutuante ancorado no fundo, que pode ser de metal ou concreto, conforme a Figura 1.16.

Para profundidades inferiores 50 metros as instalações fixas são economicamente mais viáveis e devem ser afastadas da costa, das rotas de tráfego marinho, das instalações estratégicas navais e dos espaços de interesse ecológico.

As vantagens que a energia eólica offshore tem:

- Inesgotável e não poluente.
- O recurso eólico existente no mar é superior em relação ao existente em terra.
- O impacto visual e sonoro é menor.
- A facilidade do transporte marítimo.

Figura 1.16 - Parque eólico offshore.



Fonte: (MACHADO, 2022).

1.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a segunda fonte de energia renovável mais utilizada no mundo e apresentam pontos positivos e negativos. Confira as principais vantagens.

- É inesgotável;
- Não emite gases poluentes e nem gera resíduos;
- Diminui a emissão de gases do efeito estufa (GEE);

Assim como outras fontes de energia as turbinas eólicas e seus projetos também apresentam impactos, os principais são:

- Impactos as aves que se chocam com as turbinas;
- Interferência com a rota migratória de alguns pássaros;
- Supressão vegetal para a construção das grandes torres e redes de distribuição;

- Modificação da paisagem natural com as grandes torres;
- Emissão de ruído pelas turbinas.

1.3 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro publicado em 2001 teve muita relevância pois serviu para o desenvolvimento do setor eólico no Brasil, com isso o mercado teve um grande crescimento com a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – Proinfra. Com os estudos e trabalho conjunto da Cepel (*Centro de Pesquisas de Energia Elétrica*) e o CPTEC (*Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*) para estimar o potencial eólico em todo Brasil com modelos numéricos e supercomputadores utilizados para previsões do tempo.

Como o território Brasileiro possui uma vasta rede climatológica, disponibilizado pelo Inpe, o modelo de mesoescala Brams (*Brasilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) é utilizado para estimar a velocidade e direção do vento em todo o país, para alturas mínima de 30 metros e no máximo 200metros.

Estas especificações da velocidade do vento em determinada altura servem para coincidir com as alturas dos aerogeradores disponíveis no Brasil.

As informações e os resultados obtidos pelo modelo Brams para o ano de 2013, os mapas temáticos apresentados são Velocidade média anual para altura de 30, 100 e 200metros, conforme a

Figura 1.17, Figura 1.18, Figura 1.19, além da direção do vento, conforme a Figura 1.20.

Figura 1.17 - Velocidade média anual para altura de 30metros.



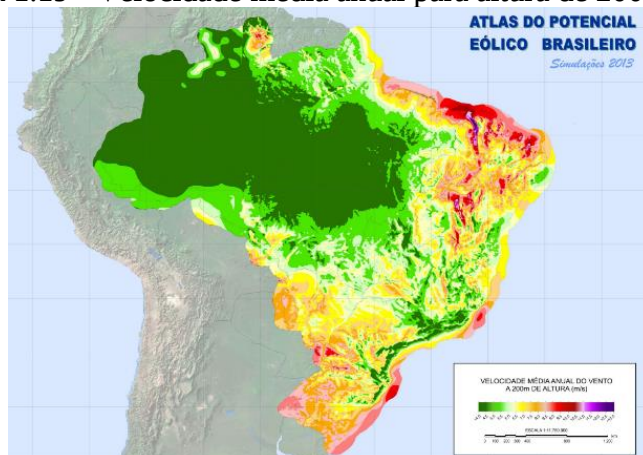
Fonte: (CEPEL, 2017).

Figura 1.18 - Velocidade média anual para altura de 100metros.



Fonte: (CEPEL, 2017).

Figura 1.19 - Velocidade média anual para altura de 200metros.



Fonte: (CEPEL, 2017).

Figura 1.20 - Direção dos Ventos.



Fonte: (CEPEL, 2017).

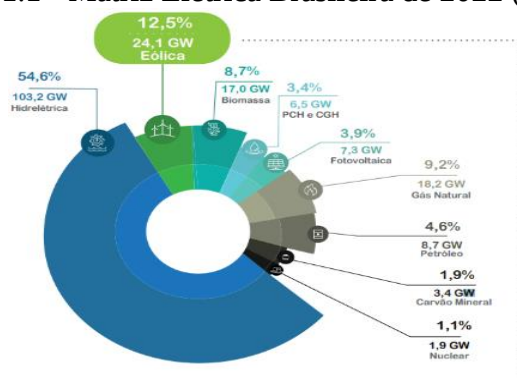
Para analisar o potencial eólico de uma determinada região é importante levar em consideração a topografia e rugosidade do solo, pois tem influência na distribuição de ocorrência e principalmente a velocidade e direção para estimar um possível potencial.

Para análise de potencial eólico para instalação de usinas eólicas é necessário realizar estudos e levantamentos de pelo menos 3anos dessa região com equipamentos tais como: instrumentos calibrados, birutas, anemômetros, barômetros, termômetros, psicrômetro, etc.

Como podemos observar nas Figura 1.17, Figura 1.18, Figura 1.19 a altura também influencia na velocidade do vento, quanto mais alto maior a velocidade, mais produtiva é a máquina e consequentemente menor o custo.

O Brasil tem grande potencial de energia da força dos ventos, principalmente nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste do país, atualmente a energia eólica já responde a 12,5% da matriz elétrica brasileira, ficando atrás somente das hidrelétricas, conforme a Gráfico 1.1

Gráfico 1.1 - Matriz Elétrica Brasileira de 2022 (em GW).

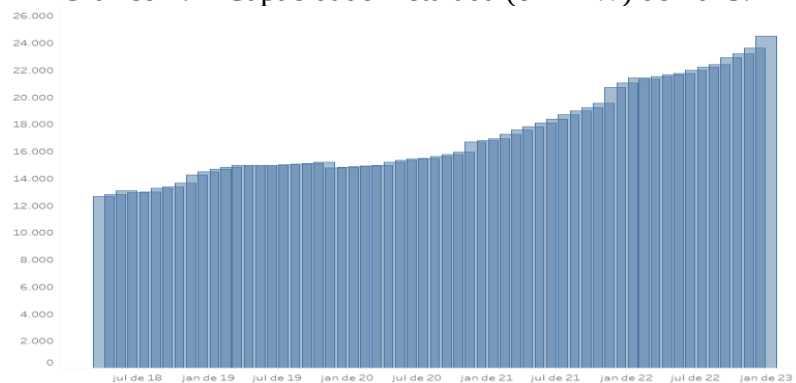


Fonte: (ABEEOLICA, 2023)

O Estados do Nordeste são responsáveis por 72,8% por todo energia eólica gerada no Brasil em 2023. A Bahia hoje é a maior produtora e se destaca com novos projetos e ampliação de parque eólicos no estado nos últimos anos.

Segundo a associação brasileira de energia eólica a Abeeólica, o Brasil já investiu de mais de US\$ 42,3 bilhões nos últimos 11 anos para desenvolvimento de energia eólica, com cerca de 869 parques instalado em 12 estados do Brasil. Os estados brasileiros que mais geraram nos últimos 12meses foram a Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí e o Ceará. Somados esses estados representam aproximadamente 84% da energia total gerada por essa fonte citado.

Gráfico 1.2- Capacidade Instalada (em MW) de 2023.



Fonte: (ONS, 2023)

Hoje segundo o Ranking Mundial do Global Wind Energy Council (GWEC) o Brasil ocupa o sexto lugar com maior capacidade acumulada com 24,1 GW de capacidade instalada em 2023, conforme mostra o Gráfico 1.2

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a expectativa é eu até 2024 o Brasil tenha pelo menos 30 GW de capacidade eólica instalada, considerando apenas os leilões já realizados e os contratos assinados, como mostra o Gráfico 1.3.

Gráfico 1.3 - Evolução da Capacidade Instalada em MW de 2005 a 2024



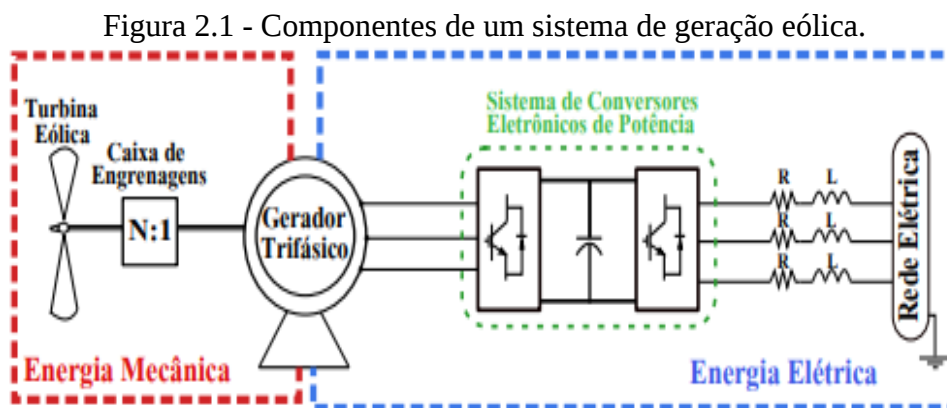
Fonte: (AIRSWIFT, 2023)

Com isso, a energia eólica se tornou a energia renovável que apresentou um dos maiores crescimentos dentre todas as demais, e é a segunda fonte renovável mais utilizada no mundo. E de grande importância tratar o modelo aerodinâmico da turbina eólica para o dimensionamento do sistema de geração eólica, pelo fato de se poder calcular o torque e a potência mecânica que estão sendo aplicados sobre o eixo do gerador. Outro elemento essencial é a escolha do gerador elétrico que tem que levar em conta a potência e o custo. Neste trabalho optou-se por utilizar o gerador de indução gaiola de esquilo, que será apresentado suas vantagens, estudo da máquina e ensaios como gerador autoexcitado.

2 GERADOR DE INDUÇÃO

O gerador elétrico utilizado nos sistemas de geração eólica tem por função converter a energia cinética proveniente da força de massas de ar em movimento em eletricidade, que pode ser enviada a uma rede elétrica.

Os principais componentes de um sistema de geração eólica que opera em velocidade variável são mostrados na Figura 2.1, que são a turbina eólica, caixa de engrenagens ou caixa multiplicadora, gerador elétrico e conjunto de conversores eletrônicos de potência, que são divididos em conversor do lado da rede (CLR) e conversor do lado do gerador (CLG), e a rede elétrica quando a ela conectado (CHEN Z, 2009), (MARTINS, 2017).



Fonte: (SANTOS, 2018, p.18).

A escolha do tipo de gerador depende da aplicação a ser utilizada, outros fatores são a potência da máquina e o custo. Os principais tipos de geradores elétricos utilizados no mercado de geração eólica são: gerador de indução gaiola de esquilo (GIGE), gerador de indução rotor bobinado (GIRB), gerador síncrono (GS), gerador síncrono de ímãs permanentes (GSIP) e o gerador de relutância variável (GRV), (MARTINS, 2017, p.2).

Para este trabalho utilizasse o tipo GIGE devido as suas vantagens, que são: robusto, baixo custo, manutenção simples e não necessita de escovas como as máquinas de indução com rotor bobinado ou síncronas.

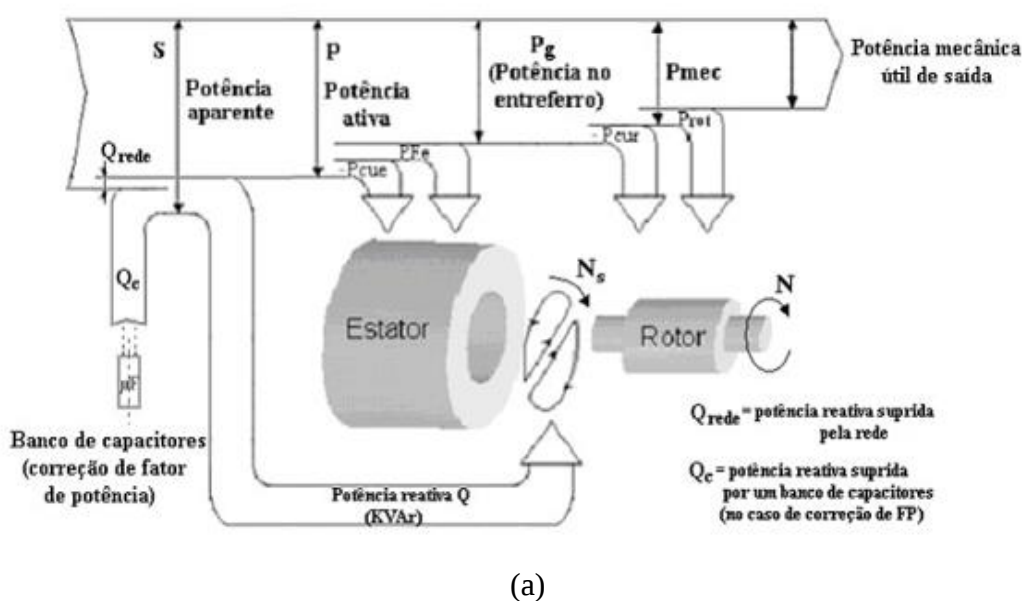
2.1 MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO GERADOR

É crucial comparar o fluxo de potência ao analisar o funcionamento de uma máquina de indução em modo gerador, tanto acima quanto abaixo da velocidade síncrona. O equilíbrio das componentes de potência auxilia na avaliação da conversão de energia eletromecânica. As potências convertidas em perdas são qualitativamente iguais, independentemente do modo de operação. Portanto, as perdas são atribuídas da seguinte maneira:

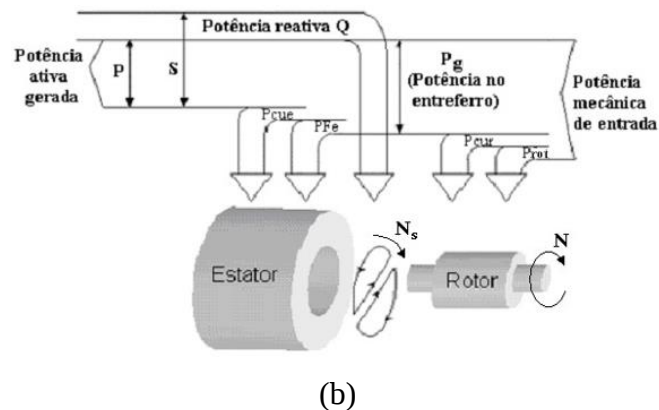
A Figura 2.2 traz um esquema que resume o fluxo em ambos os modos.

- Perdas mecânicas (rotacionais) P_{rot} - Incluem todas as perdas rotacionais tais como atrito em rolamentos e perdas devido à ventilação forçada ou resfriamento (NASCIMENTO, 2010, p.46).
- Perdas no núcleo P_{Fe} - Perdas por histerese, correntes de Foucault e anomalias devido a variações de densidade de fluxo magnético. As perdas no ferro do rotor são desprezadas, pois as variações de densidade de fluxo no rotor são pequenas (afreqüência da tensão induzida no rotor é baixa) (NASCIMENTO, 2010, p.46).
- Perdas no cobre (efeito Joule) P_{cuc} e P_{cur} - Estas perdas são devido às resistências ôhmicas do estator e rotor, respectivamente (NASCIMENTO, 2010, p.46).

Figura 2.2 - Fluxo de potência na máquina de indução; (a) no modo motor; (b) modo gerador



Fonte: (NASCIMENTO, 2010, p.47)



(b)

Fonte: (NASCIMENTO, 2010, p.47)

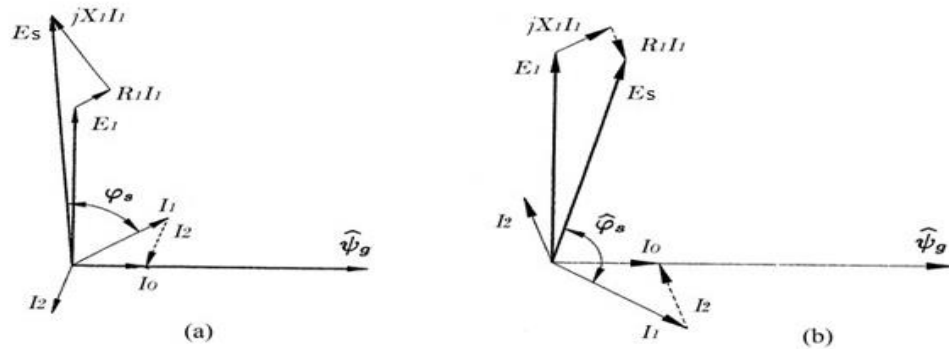
Quando uma máquina motriz aciona o eixo de um motor de indução acima da velocidade síncrona, ocorre a inversão do fluxo de potência ativa. É crucial notar que o fluxo de potência reativa permanece inalterado no modo gerador. A potência reativa exigida para gerar o campo magnético não pode ser suprida pelo rotor de gaiola de esquilo nem pela máquina motriz. Portanto, o motor de indução pode gerar potência ativa apenas se houver uma fonte externa de potência reativa disponível. Ao ser conectado a uma rede com outros tipos de geradores, a potência reativa pode ser fornecida por geradores síncronos operando em modo sobre-excitado.

Uma máquina de indução específica não consegue fornecer a mesma potência ativa à rede no modo gerador como absorveria no modo motor, a menos que tenha sido expressamente projetada para geração de energia. Isso ocorre devido ao aumento das perdas (no cobre, no núcleo e por fricção), uma vez que a máquina opera mais próxima da região de saturação. Teoricamente, a potência mecânica poderia ser aumentada para compensar essas perdas e alcançar uma potência elétrica de saída mais alta. No entanto, existe uma limitação, pois um aumento não controlado na potência mecânica de entrada sobrecarregaria a máquina, resultando em um superaquecimento dos enrolamentos do estator e danificando o isolamento das bobinas. Para evitar esse problema, a corrente máxima injetada na rede ou fornecida a uma carga específica não deve exceder a corrente nominal de placa. Ao comparar as Figura 2.2(a) e Figura 2.2(b), é evidente que a potência eletromagnética P_e através do entreferro é maior no modo gerador do que no modo motor, apesar de a potência aparente S ser a mesma em ambos os casos. Isso ocorre porque a potência necessária para compensar as perdas no estator deve ser transferida através do entreferro ao gerar energia, mas não quando em modo motor. Transmitir uma potência maior pelo entreferro requer mais corrente de magnetização para suprir o campo magnético

que conecta o rotor ao campo do estator. Consequentemente, o consumo de potência reativa aumenta e o fluxo de potência ativa diminui, já que a potência aparente é limitada para evitar superaquecimento. As alterações nos valores de potência ativa e reativa resultam em mudanças no fator de potência do sistema. Geralmente, observa-se que o fator de potência visto pela rede de uma máquina de indução operando como gerador é menor do que quando operando como motor, caso não haja compensação de reativos por meio de um banco de capacitores.

Quando operando como motor, a tensão induzida E_1 é menor que a tensão da rede E_s devido à queda de tensão na impedância equivalente do estator. Por outro lado, no modo gerador, E_1 deve ser maior que a tensão da rede, o que requer um aumento na magnetização da máquina, resultando em uma potência reativa absorvida maior do que quando operando como motor. Os diagramas fasoriais para as tensões do circuito equivalente estão representados na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Diagrama fasoriais; (a) modo motor; (b) modo gerador



Fonte: (HOMRICH, 2013, p.48).

2.1.1 O efeito da saturação

Na operação como gerador, o baixo fator de potência pode ser atribuído aos efeitos de saturação magnética. O aço presente nos núcleos do estator e do rotor exibe características ferromagnéticas favoráveis até que um determinado valor de fluxo magnético seja atingido. O fenômeno de indução de tensão aumenta de forma linear com a corrente magnetização até atingir o ponto indicado na curva da Figura 2.4, frequentemente denominado de "joelho". Para

correntes de magnetização superiores a esse valor, a tensão não aumenta mais linearmente; consequentemente, um pequeno aumento na tensão demanda um grande aumento na corrente de magnetização.



Fonte: (HOMRICH, 2013, p.49).

O aumento das necessidades de magnetização no modo gerador tende a deslocar o ponto de operação para a faixa de saturação magnética na maioria dos motores modernos de indução. Ao tentar manter a tensão induzida ao nível exigido, a corrente de magnetização, e com ela a demanda de potência reativa do gerador, poderá aumentar a ponto de baixar em demasia o fator de potência.

A curva de magnetização é obtida experimentalmente ao acionar um gerador de indução através de uma máquina motriz na velocidade síncrona e alimentá-lo com uma fonte externa de tensão variável e frequência fixa correspondente à síncrona. Nesse processo, o escorregamento tende a zero e a impedância equivalente do rotor tende a infinito, direcionando toda a corrente através do ramo de magnetização. Variando-se a tensão de alimentação de zero até cerca de 25% acima da tensão nominal da máquina e medindo a corrente correspondente, é possível obter a curva de saturação. Como a impedância do ramo de magnetização varia com a frequência, é gerada uma curva de saturação para cada frequência de operação do gerador de indução.

2.1.2 Passos para conexão do gerador a rede

Diferentemente do gerador síncrono, o gerador de indução não precisa estar sincronizado em tensão, frequência e fase com a rede para ser conectado. O procedimento a seguir deve ser feito ao conectar o GI na rede (CHAPALLAZ, 1992).

Com o gerador de indução desconectado, a velocidade da máquina primária é aumentada até atingir a velocidade síncrona. Desta forma, ao aplicar tensões nos terminais do estator, não ocorrerá movimento relativo entre o campo e o rotor, o que permite que o gerador seja conectado sem o risco de grandes picos de corrente.

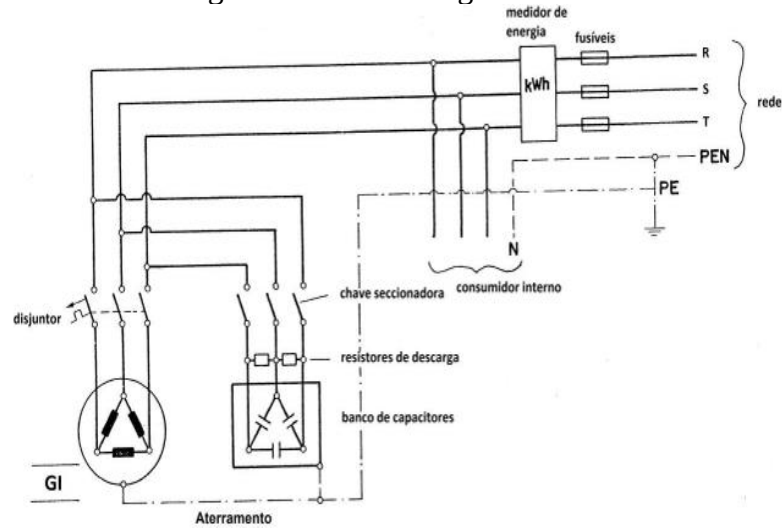
No entanto, mesmo na velocidade síncrona, a chamada corrente de in-rush está presente no momento da conexão. Isso ocorre porque o gerador de indução se comporta como um curto-circuito para a rede enquanto o estator ainda não está completamente magnetizado e apresenta uma pequena reatância para a corrente. Durante aproximadamente 10 milissegundos, essa corrente de in-rush não causa problemas para o gerador de indução nem para a rede. Os capacitores que podem ser usados para corrigir o fator de potência podem estar em paralelo com as fases da máquina no momento da conexão.

Após a conexão, o aumento da velocidade da máquina primária colocará a máquina em modo gerador, e esse aumento deve parar quando a corrente que flui da máquina para a rede atingir o valor nominal de placa.

O processo se inverte no momento da desconexão.

A velocidade da máquina motriz deve ser reduzida até a velocidade síncrona e o GI juntamente com o banco de capacitores podem ser desconectados simultaneamente. É importante que resistores sejam conectados em paralelo com o banco para descarregá-los no momento da desconexão e evitar que ocorram descargas elétricas em pessoas durante manutenção ou formações de arcos elétricos no momento de conexão (CHAPALLAZ, 1992). A Figura 2.5 mostra um exemplo de conexão do GI à rede.

Figura 2.5 - GI interligado a rede



Fonte: (HOMRICH, 2013, p.59).

2.1.3 Compensação da demanda de potência reativa

Capacitores são normalmente conectados em paralelo com as fases de um GI para melhorar o fator de potência. Os enrolamentos do estator e os capacitores formam um circuito ressonante onde a potência reativa oscila somente entre os capacitores e a máquina de indução. Dessa forma menos corrente reativa precisa ser absorvida e diminuem as perdas da rede de distribuição. As concessionárias de energia geralmente exigem um fator de potência mínimo das unidades geradoras distribuídas, que caso não seja respeitado, acarreta em multas para os responsáveis da unidade. A capacitância demandada por fase em um gerador de indução pode ser determinada pela Equação (2.1) e (2.2) (HOMRICH, 2013, p.60).

$$C_{fase} = \frac{\Delta Q}{3V_l^2(2\pi f)} \quad (2.1)$$

Onde: V_l = Tensão de linha (quando conectado em delta)

f = frequência da rede

ΔQ = potência reativa a ser compensada

$$\Delta Q = \text{potência reativa antes da compensação} \\ - \text{potência reativa depois da compensação.}$$

$$\Delta Q = P_{atg}(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.2)$$

Onde φ_1 e φ_2 são os ângulos entre a tensão e a corrente antes e após a compensação, respectivamente.

No modo motor o fator de potência é um dado de placa, e no modo gerador, ele deve ser medido ou estimado. Sabe-se que a queda do fator de potência (aumento da potência reativa absorvida) na transição de motor para gerador é extremamente dependente das características construtivas da máquina, como por exemplo, o tipo de barra rotórica e saturação magnética.

2.2 OPERAÇÃO ISOLADA

Em uma operação isolada, é necessário conectar um banco de capacitores em paralelo com os enrolamentos do estator da máquina. Isso permite que os capacitores forneçam os reativos necessários para magnetizar o gerador.

2.2.1 O processo de autoexcitação

A característica V/I de um capacitor representa sua reatância, a qual é linear. Quando um capacitor apropriado é conectado nos terminais do GI (Gerador Isolado), a reta que representa a reatância capacitiva intercepta a curva de magnetização em um ponto, definindo assim o ponto de operação do GI. A Figura 2.6 apresenta a reatância da máquina (curva de magnetização) e a reatância capacitiva.

Conforme discutido anteriormente, o processo de autoexcitação é necessário apenas em operações isoladas. Portanto, ao iniciar a máquina motriz de um GI, não há corrente de

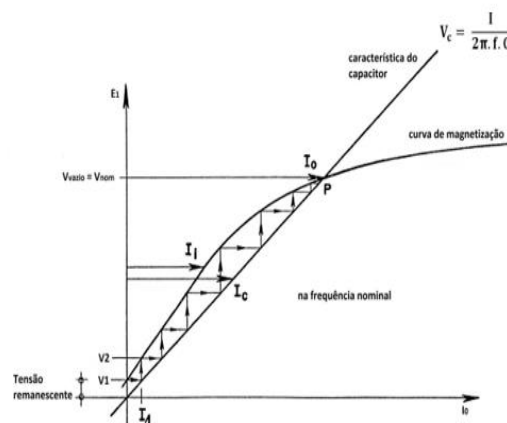
magnetização disponível nos enrolamentos do estator para gerar campo magnético, e os bancos de capacitores instalados não podem fornecer potência reativa sem estarem inicialmente carregados. No entanto, o rotor geralmente retém um magnetismo residual de operações anteriores, resultando em uma pequena tensão induzida quando a máquina é acionada, iniciando assim o processo de autoexcitação. Essa tensão inicial, chamada de tensão remanescente (V_1), é causada pelas linhas de fluxo do magnetismo que atravessam as bobinas dos enrolamentos do estator.

A tensão remanescente tem capacidade para carregar os capacitores, os quais fornecerão uma corrente de magnetização inicial (I_1) de volta para os enrolamentos do estator no próximo meio período AC. Essa corrente (I_1) aumenta a magnetização da máquina, resultando na produção de uma tensão (V_2). Esse processo se repete até que a corrente de magnetização (I_i), gerada pela tensão induzida (V_i), e a corrente do capacitor (I_c) estejam em equilíbrio. A Figura 2.6 apresenta equilíbrio no ponto de interseção das duas curvas.

Este processo ocorre quando a máquina está em vazio. Ao selecionar um valor apropriado de capacitância para conectar em paralelo aos enrolamentos de cada fase, é possível alcançar a tensão nominal no modo gerador. Na ausência de magnetismo residual no rotor, uma bateria pode ser temporariamente conectada aos terminais do estator (em apenas uma das fases) por alguns segundos quando a máquina estiver parada, a fim de restabelecer um pequeno campo magnético que será suficiente para iniciar o processo.

Alternativamente, pode-se utilizar o mesmo método nos capacitores que fornecerão a corrente de magnetização, desde que os resistores de descarga sejam removidos e, dependendo do tamanho do banco de capacitores, apenas alguns segundos de conexão serão necessários para carregá-los.

Figura 2.6 - Processo de autoexcitação do gerador de indução

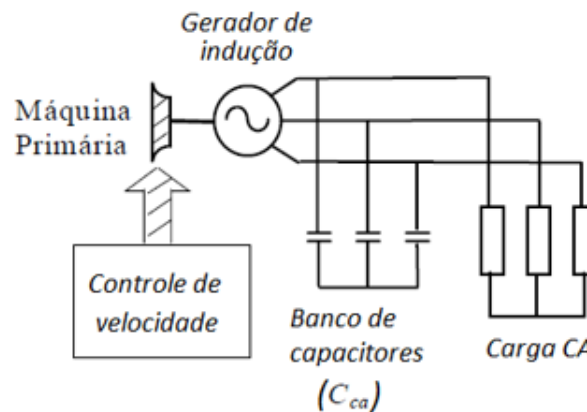


Fonte: (HOMRICH, 2013, p.62).

2.2.2 O problema da regulação de tensão e frequência nos geradores de indução isolados

A Figura 2.7 ilustra um sistema em que o gerador de indução, excitado por um banco trifásico de capacitores, opera isolados da rede elétrica. Nessas circunstâncias, a potência ativa da carga CA tem uma influência significativa na amplitude e na frequência da tensão terminal do gerador, mesmo quando a velocidade do rotor é mantida constante pela ação do regulador de velocidade (MARRA, 2000, p.2).

Figura 2.7 - GI excitado por banco de capacitores

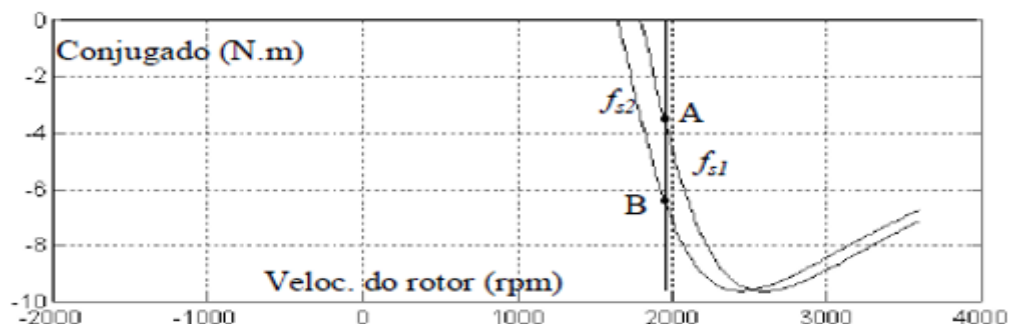


Fonte: (MARRA, 2000, p.2)

Desconsiderando as perdas mecânicas, elétricas e magnéticas, a potência elétrica convertida pelo GI é determinada pelo produto da velocidade angular do rotor pelo conjugado no eixo do gerador. Portanto, assumindo que a velocidade do rotor é constante, um aumento na potência ativa da carga CA resultará em uma queda na frequência síncrona. Isso ocorre porque a elevação do conjugado é necessária para atender à nova demanda de potência da carga, e a queda na frequência é a única maneira de alcançar esse aumento no conjugado, dado que a velocidade do rotor é mantida constante (MARRA, 2000, p.2).

A Figura 2.8 ilustra qualitativamente uma situação em que o GI está alimentando uma carga com fator de potência unitário. O ponto 'A' é o ponto de operação estável, cujo produto do conjugado pela velocidade do rotor equivale à potência da carga CA, desconsiderando-se as perdas. A frequência síncrona (f_s) da força magnetomotriz (FMM) do estator é igual a f_{s1} no ponto 'A'.

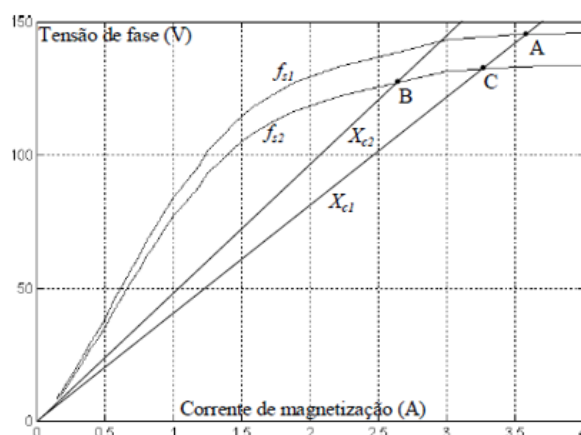
Figura 2.8 - Comportamento do conjugado com a variação da velocidade para diferentes frequências síncronas



Fonte: (MARRA, 2000, p.2)

O ponto 'A' na característica de conjugado da Figura 2.9 corresponde ao ponto de operação estável 'A' na característica de magnetização do GI.

Figura 2.9 - Comportamento da curva de magnetização e da reatância capacitiva com a variação da frequência síncrona.



Fonte: (MARRA, 2000, p.2)

O aumento de potência ativa na carga CA provoca queda na frequência síncrona de f_{s1} para f_{s2} , produzindo assim elevações tanto na frequência de escorregamento do rotor quanto no conjugado desenvolvido pelo gerador. Assim, a potência gerada aumenta para satisfazer a nova demanda da carga CA, conduzindo ao novo ponto estável de operação do gerador (ponto 'B'). Observe que o regulador de velocidade mantém a velocidade do rotor sempre constante em regime permanente (MARRA, 2000, p.2).

A queda na frequência síncrona para o valor f_{s2} reduz a tensão terminal do GI, apresentada na característica de magnetização da Figura 2.9, na mesma proporção, considerando-se que o fluxo no entreferro é mantido constante. Além de alterar a curva característica de

magnetização do gerador, a redução da frequência afeta a reatância capacitiva (X_c) do banco de capacitores, conforme descreve a Equação (2.3). X_{c1} e X_{c2} correspondem às respectivas frequências f_{s1} e f_{s2} , na Figura 2.9 (MARRA, 2000, p.2).

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_s C_{ca}} \quad (2.3)$$

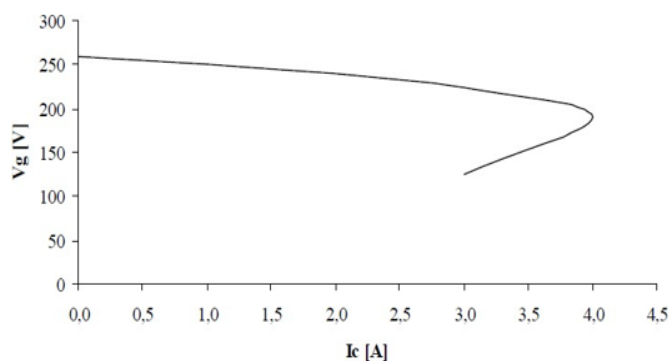
A capacitância C_{ca} pode ser elevada a fim de recuperar o valor inicial da reatância capacitiva (X_{c1}). No entanto, o ponto 'C' da curva de magnetização (Figura 2.9) será o novo ponto de operação estável do gerador em lugar do ponto 'A', uma vez que a frequência permanece com valor f_{s2} . A queda na tensão terminal do GI é o efeito resultante do aumento da potência ativa da carga, como resultado da influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador e no valor da reatância capacitiva do banco (MARRA, 2000, p.2)

É importante ressaltar que as quedas de tensão nas resistências e indutâncias de dispersão do estator e do rotor do GI em operação isolada não são a causa principal de sua regulação de tensão insatisfatória. A regulação de tensão do GI é afetada principalmente pela influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador e pela dependência desta frequência com a potência ativa da carga CA. No caso ilustrado nas Figura 2.8 e Figura 2.9, a variação da tensão terminal do gerador foi analisada exclusivamente sob influência da potência ativa. No entanto, a elevação da potência reativa da carga CA, bem como a queda de velocidade do rotor com o aumento do conjugado, podem ser fatores adicionais de deterioração da regulação de tensão do gerador (MARRA, 2000, p.2). Outro fator relevante a ser considerado para controlar a tensão de um GI isolado é a desmagnetização. Caso demanda por potência ativa aumente sem controle adequado do sistema, a corrente de magnetização pode assumir valores pequenos o suficiente para que o campo que mantém o vínculo entre rotor e estator deixe de existir, fazendo com que a tensão induzida se torne zero. Isso pode acontecer inclusive em transitórios, quando ao elevar bruscamente o valor da carga, mesmo que o sistema tenha condições de fornecer os reativos necessários, ocorre a desmagnetização do gerador.

2.3 REGULAÇÃO DE TENSÃO NO GERADOR DE INDUÇÃO

Uma característica conhecida do gerador de indução é a sua má regulação de tensão quando há variação de carga. A figura a seguir mostra a curva de regulação de tensão típica de um gerador de indução.

Figura 2.10 - Curva característica do comportamento da tensão em função do aumento de carga em um gerador de indução isolado



Fonte: (MEDEIROS, 2004, p.39)

Onde: V_g = tensão gerada pela máquina de indução [V];

I_c = corrente da carga [A].

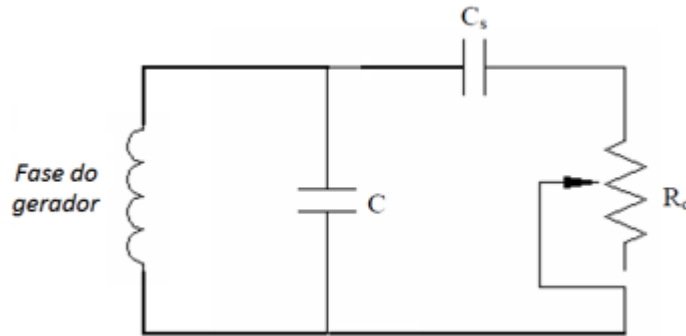
A Figura 2.10 mostra que a tensão do gerador decresce conforme a carga aumenta, onde se trata sobre o problema de regulação de tensão no GI.

A regulação de tensão do gerador de indução pode ser melhorada utilizando-se técnicas adequadas, segundo a natureza da carga que a máquina está alimentando. Estas técnicas são descritas na sequência.

2.3.1 Regulação por capacitor em série

Consiste na inserção de um capacitor em série com a carga conforme mostra a Figura 2.11 (HOMRICH, 2013, p.72).

Figura 2.11 - Método do capacitor em série



Fonte: (HOMRICH, 2013, p.72).

Onde: C = capacitor para autoexcitação do gerador de indução [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

C_s = capacitor série [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

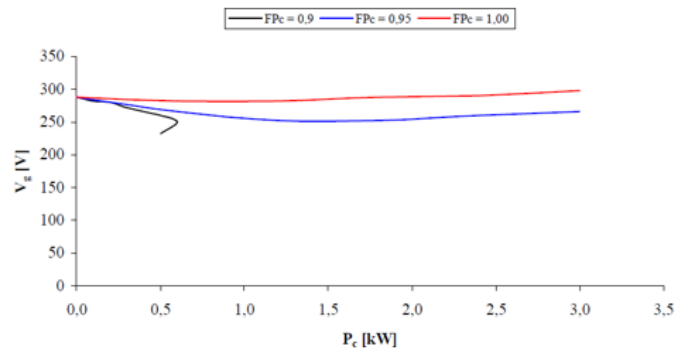
R_c = resistência da carga [Ω/fase].

O capacitor C_s em série com o gerador de indução desempenha um papel crucial na excitação da máquina. Quando a carga é conectada aos terminais do gerador de indução, a capacitância equivalente vista dos terminais do gerador é a soma das capacitâncias C e C_s . Portanto, à medida que aumenta o valor da carga nos terminais do gerador de indução, a capacitância vista também aumenta.

Consequentemente, um aumento na capacitância resulta em um aumento na tensão terminal da máquina. Isso ocorre porque, com uma maior capacitância vista nos terminais, a reatância indutiva total diminui, o que leva a uma diminuição na queda de tensão devido às perdas nos circuitos do estator e do rotor. Assim, o aumento na tensão devido ao capacitor em série pode compensar as quedas de tensão internas, resultando em uma melhor regulação de tensão e desempenho geral do gerador de indução.

Segundo o autor (MEDEIROS, 2004, p.42) mostra que esta técnica de regulação é razoável para cargas resistivas, porém insatisfatório para cargas indutivas, onde o fator de potência varia como pode ser visualizado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Resultados de regulação para regulação por capacitor em série

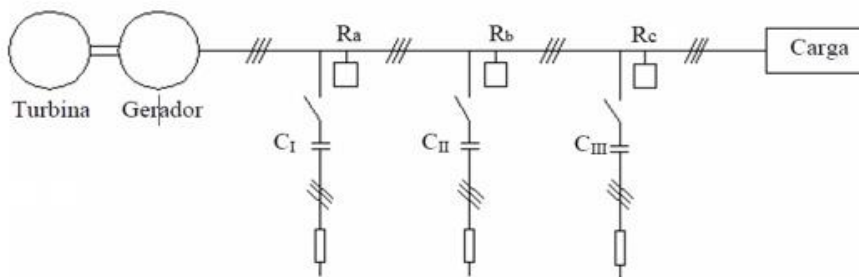


Fonte: (MEDEIROS, 2004, p.42)

2.3.2 Regulação por capacitores chaveados

Este método consiste no chaveamento de capacitores a medida que a necessidade de excitação do gerador e de energia reativa da carga aumentam. A Figura 2.13 mostra um esquema utilizando capacitores conectados em paralelo com o gerador (MEDEIROS, 2004, p.42)

Figura 2.13 - Regulação por chaveamento de capacitores



Fonte: (MEDEIROS, 2004, p.43)

A estratégia descrita envolve o uso de bancos de capacitores, como os bancos CI, CII e CIII, que são inseridos ou retirados do circuito conforme a carga aumenta ou diminui. Isso é controlado pelos relés Ra, Rb e Rc, que monitoram a tensão, com o objetivo de atender às necessidades de magnetização tanto do gerador quanto da carga e manter a tensão dentro de limites considerados satisfatórios.

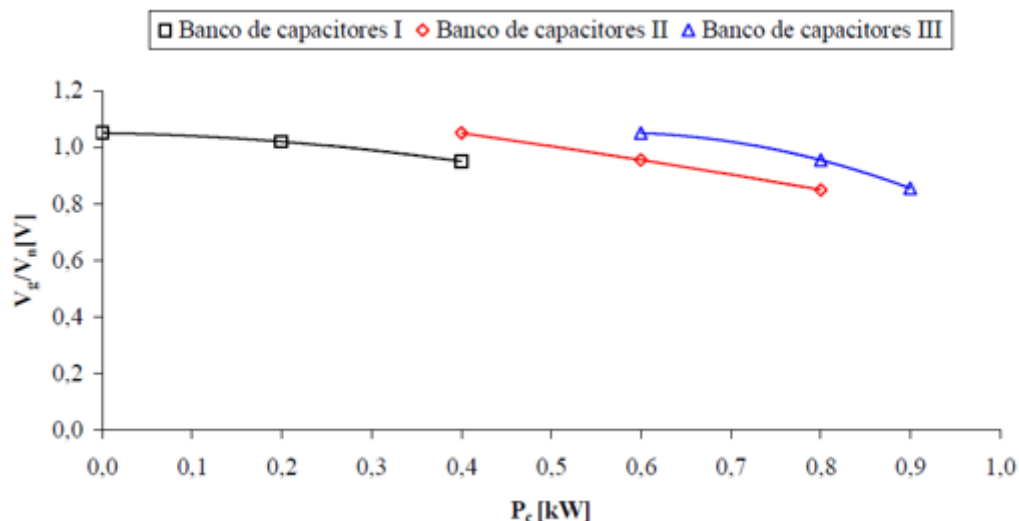
Um resultado típico dessa variação de tensão em função da carga acoplada aos terminais do gerador, utilizando esse método, provavelmente é mostrado na Figura 2.14. Essa figura deve

representar como a tensão de saída do gerador de indução varia em resposta à carga conectada e como os bancos de capacitores são controlados para manter a tensão dentro dos limites desejados. Essa abordagem visa garantir um fornecimento estável de energia elétrica, ajustando continuamente a excitação do gerador para atender às demandas da carga e manter a tensão em níveis adequados.

A regulação por chaveamento apresenta algumas desvantagens. Uma delas é que o sistema de controle responsável pela inclusão e retirada dos capacitores deve ser robusto o suficiente para evitar problemas como sobretensão ou desmagnetização do gerador em caso de mudanças repentinas na carga. Se o sistema de controle não for capaz de responder rapidamente e de forma precisa a essas mudanças, podem ocorrer variações indesejadas na tensão do gerador.

Além disso, tanto para o método de capacitor em série quanto para o método de chaveamento, se não houver uma correção adequada na velocidade da máquina motriz, podem ocorrer problemas de sub ou sobrefrequência. Isso porque as mudanças na carga afetam diretamente a velocidade da máquina motriz, e se essa variação não for compensada de forma adequada, a frequência da saída do gerador também será afetada, o que pode ser prejudicial para os equipamentos conectados à rede elétrica. Portanto, é essencial que o sistema de controle seja capaz de regular não apenas a tensão, mas também a velocidade da máquina motriz para garantir um fornecimento estável de energia elétrica.

Figura 2.14 - Resultados da regulação por chaveamento de capacitores



Fonte: (MEDEIROS, 2004, p.43)

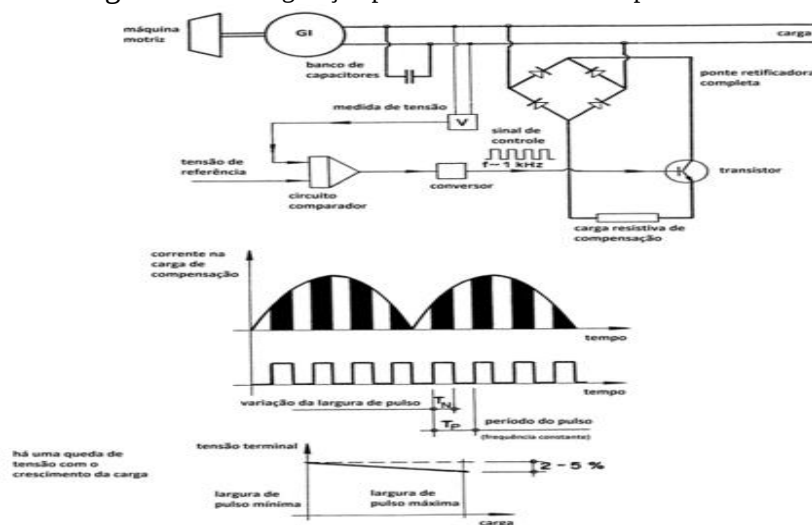
2.3.3 Regulação por controle de fluxo de potência ativa

No método descrito, o gerador opera fornecendo um valor fixo de potência ativa, pois o sistema de controle trabalha para manter a resistência equivalente da carga constante. Isso significa que a máquina sempre opera no seu ponto nominal de funcionamento, presumindo que a potência reativa não varie e que o banco de capacitores tenha sido dimensionado previamente para fornecer os reativos necessários tanto para o gerador quanto para a carga.

Portanto, qualquer variação na potência reativa só pode ser compensada pela alteração da velocidade do acionamento e, conseqüentemente, na frequência gerada. Isso implica em uma alteração na curva de magnetização da máquina, que é controlada para garantir um funcionamento estável e eficiente. Dessa forma, o sistema de controle regula tanto a potência ativa quanto a reativa para manter a estabilidade do sistema elétrico e garantir que o gerador opere dentro dos limites desejados.

Com este método é possível manter a rotação da máquina constante, pois mesmo que a demanda por potência ativa não esteja no valor máximo possível, o controle faz com que o gerador “enxergue” sempre a mesma carga (HOMRICH, 2013, p.75). Isso só é possível implantando uma carga de compensação e um controle que compare a tensão de saída com uma tensão de referência, gerando um sinal de modulação por largura de pulso (PWM) que faz com a potência na carga P_{carga} mais a potência na compensação P_{comp} ser igual em todos os instantes. Um esquemático para melhor compreensão do método está na Figura 2.15 abaixo.

Figura 2.15 - Regulação por controle de fluxo de potência ativa



Fonte: (HOMRICH, 2013, p.76).

Pode-se citar como vantagens desse método:

- Elimina a necessidade de regulação de velocidade atuando na máquina primária
- Permite a operação da máquina sempre no seu ponto de máximo rendimento.
- Energia consumida pela carga de lastro pode ser utilizada para aquecimento em geral.

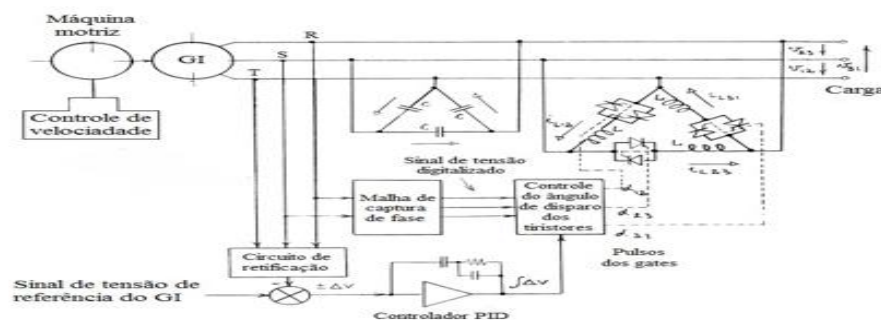
2.3.4 Regulação por controle de fluxo de potência reativa

O método descrito consiste na utilização de indutores controlados por meio de tiristores e capacitores. Os capacitores, mostrados na Figura 2.16, têm a finalidade de fornecer potência reativa tanto para o gerador de indução quanto para cargas indutivas, como motores. Quando ocorre uma variação na carga, como o desligamento de um motor, a tensão tende a aumentar devido ao excesso de potência reativa circulando pelo circuito.

Nesse momento, os tiristores entram em ação simulando a inserção de indutores no sistema. Esses indutores têm como finalidade drenar a potência reativa excedente gerada pelo banco de capacitores. Esse excedente é controlado pela ponte de tiristores, que regula a quantidade necessária de potência reativa para manter a tensão no valor desejado. Em suma, o sistema controla dinamicamente a potência reativa para garantir que a tensão permaneça dentro dos limites aceitáveis, mesmo diante de variações na carga.

O esquemático da Figura 2.16 também é conhecido como fonte estática de compensação de reativos. Segundo os autores, possíveis aplicações desse tipo de sistema incluem fornecimento de energia para áreas rurais e para grandes equipamentos de terraplanagem, além de sua inclusão no contexto de turbinas eólicas de alta velocidade (HOMRICH, 2013, p.77).

Figura 2.16 - Esquemático para regulação de tensão por chaveamento de tiristores



Fonte: (HOMRICH, 2013, p.77).

2.3.5 Regulação por inversor de frequência

O inversor de frequência possibilita a melhoria do comportamento do sistema de geração isolada não apenas em relação à regulação de tensão, mas também estabilização da frequência e compensação da potência reativa. A estratégia de operação do sistema consiste em fixar a frequência síncrona do gerador de indução através do inversor PWM. Para obter balanço de potência e regulação de tensão do gerador, os autores apresentaram duas alternativas: através da regulação da velocidade do rotor; ou enviando-se parte da energia acumulada no lado CC do inversor para rede através de linha monofásica, caso a velocidade do rotor não seja regulada e exista disponibilidade de conexão monofásica à rede. Segundo os autores, os resultados obtidos demonstram que o sistema é estável, robusto e capaz de gerar tensões trifásicas reguladas (MARRA, 2000, p.3).

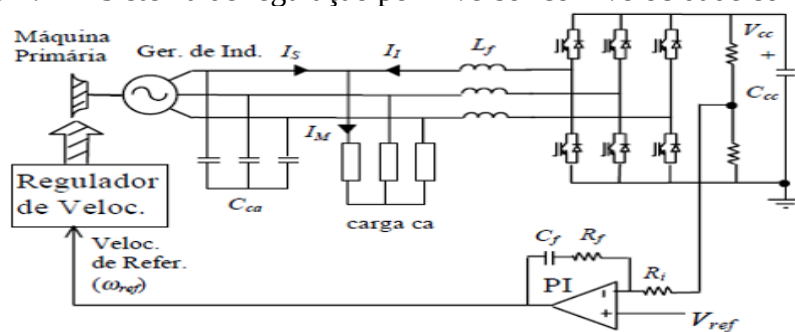
- Sistema com controle de velocidade

Há a utilização é mais adequada para sistemas de geração cuja fonte primária de energia apresenta custo elevado, como geração a Diesel. Emprega o regulador de velocidade da máquina primária, com a finalidade de controlar o valor da potência gerada.

- Sistema sem controle de velocidade

Similar ao método de controle do fluxo de potência ativa, uma vez que a ausência de regulador de velocidade não permite o controle do valor da potência elétrica gerada. Neste caso o excedente da energia gerada, não consumida pela carga CA, pode ser enviado à rede através de uma linha monofásica. Esta configuração pode ser aplicada em propriedades rurais atendidas por linhas monofásicas, e com disponibilidade hídrica para geração de energia. Na ausência da rede, a energia excedente pode ainda ser consumida por cargas auxiliares ajustáveis no lado CC ou CA do inversor (MARRA, 2000, p.4), conforme mostra a Figura 2.17.

Figura 2.17 - Sistema de regulação por inversor com velocidade controlada



Fonte: (MARRA, 2000, p.3)

3 MODELAGEM DA MÁQUINA

Para este capítulo é desenvolvido as equações dinâmicas do Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (GIGE). Será apresentado o circuito equivalente da máquina de indução em referência de eixo direto e quadratura, as equações de potência e o torque da máquina de indução.

3.1 MODELAGEM DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Aplicando um grupo de tensão trifásica defasadas em 120 graus ao estator resulta em um grupo de correntes trifásico circulando no estator. Estas tensões e correntes passam a produzir um campo magnético B_s , este campo magnético é formado pelo princípio da lei de Lenz, devido ao posicionamento dos enrolamentos, estes que estão distribuídos com diferença de 120 graus uma da outra, faz com que este campo magnético seja um campo girante. A velocidade síncrona de rotação do campo magnético formado nos enrolamentos é dada por (CHUNHA, 2023, p.26), conforme a Equação (3.1).

$$n_{sinc} = \frac{120f_{se}}{p} \quad (3.1)$$

Onde:

n_{sinc} – Velocidade síncrona (rpm)

f_{se} – Frequência de alimentação (Hz)

p – Número de polos da máquina

Esse campo magnético girante formado no estator e representado por B_s passa pelas barras condutoras do rotor, que por estar curto circuitadas agem como espiras submersas no campo magnético que está em movimento induz uma tensão no mesmo através da lei de Lenz. A tensão induzida depende da velocidade e o comprimento do condutor em uma dada barra do rotor que é dada pela equação a seguir (CHUNHA, 2023, p.26), conforme a Equação (3.2).

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (3.2)$$

Onde:

v – Velocidade da barra em relação ao campo magnético

B – Vetor da densidade de fluxo magnético

l – Comprimento do condutor.

A lei de Lenz descreve o funcionamento do campo magnético de rotor Br. Enfim, como o torque induzido na máquina assíncrona é dado pela Equação 3.3 (CHUNHA, 2023, p.26).

$$\tau_{ind} = k B_r \times B_s \quad (3.3)$$

Com o rotor magnetizado, é criado um campo magnético constante. Quando o motor é ligado, o campo magnético girante do estator tenta “arrastar” o rotor junto com ele. A sincronização acontece uma vez que o rotor atinge a velocidade síncrona, pois ele fica “trancado” com o campo girante do estator, e assim ambos giram juntos na mesma velocidade. Nesta condição o motor é dito estar sincronizado.

3.1.1 Conceito de escorregamento do rotor

O escorregamento em uma máquina de indução, nada mais é do que a perda de velocidade que temos no rotor da máquina, ou seja, é a diferença de velocidade entre a rotação mecânica do rotor e a rotação do campo magnético gerado no estator é determinado como velocidade relativa. A rotação de escorregamento, é definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade mecânica do rotor:

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (3.4)$$

Onde:

n_{esc} – Velocidade de escorregamento da máquina.

n_{sinc} – Velocidade dos campos magnéticos.

n_m – Velocidade mecânica do rotor.

O escorregamento é expresso por uma unidade de porcentagem como podemos observar na questão a seguir, conforme a Equação (3.5) e (3.6).

$$s = \frac{n_{esc}}{n_{sinc}} * (100\%) \quad (3.5)$$

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} * (100\%) \quad (3.6)$$

Ou em forma de velocidade angular (radianos por segundo) conforme a Equação (3.7).

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} * (100\%) \quad (3.7)$$

Se o rotor estiver girando na velocidade síncrona, então s 0, ao passo que, se o rotor estiver estacionário, então s 1. Valores entre 0 e 1 determina parâmetros de carga. É possível expressar a velocidade mecânica do eixo do rotor em termos de velocidade síncrona e de escorregamento. Resolvendo as Equações (3.4) e (3.5) em relação à velocidade mecânica, obtemos (CHUNHA, 2023, p.27), as seguintes Equação (3.8) e (3.9).

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad (3.8)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (3.9)$$

Caso o rotor seja parado de maneira que não possa girar, o rotor terá a mesma frequência do estator. E se, o rotor girar na velocidade síncrona, então a frequência de rotor será zero. Para n_m 0 rpm, a frequência de rotor é $f_{re} = f_{se}$ e o escorregamento é máximo (CHUNHA, 2023, p.28).

Para $n_m = n_{sinc}$, a frequência de rotor é f_{re} 0 Hz e o escorregamento é s 0. Para qualquer velocidade intermediária, a frequência de rotor é diretamente proporcional à diferença entre a velocidade do campo magnético n_{sinc} e a velocidade de rotor n_m . Uma vez que o escorregamento de rotor é definido como pela Equação (3.10) (CHUNHA, 2023, p.28).

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (3.10)$$

Então a frequência de rotor pode ser expressa pela Equação (3.11)

$$f_{re} = s f_{se} \quad (3.11)$$

Substituindo a Equação (3.10) do escorregamento na Equação (3.11) e, em seguida, fazendo uma substituição em n_{sinc} no denominador da expressão:

$$f_{re} = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} f_{se}$$

Como $n_{sinc} = 120 f_{se} / P$, temos a Equação (3.12).

$$f_{re} = ((n_{sinc} - n_m)P / 120 f_{se}) * f_{se}$$

Portanto,

$$f_{re} = P / 120 (n_{sinc} - n_m) \quad (3.12)$$

3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA

O funcionamento de uma máquina assíncrona, como a máquina de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo, depende das tensões e correntes induzidas em seu estator. Nesse caso, onde o rotor recebe apenas uma única excitação através do estator, podemos referir-nos a ela como uma máquina de excitação simples.

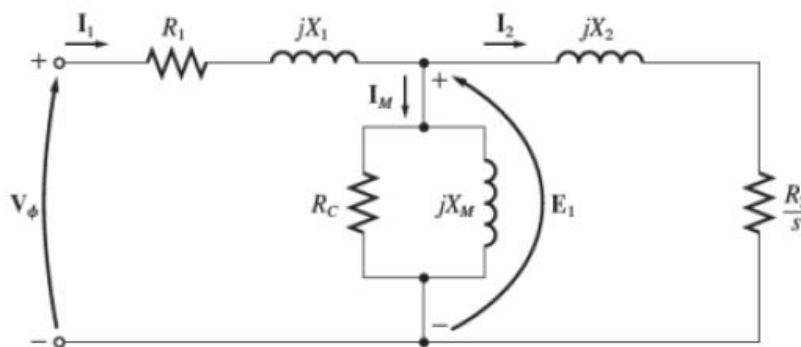
Ao contrário do modelo equivalente de um transformador, o circuito equivalente de uma máquina de indução é dinâmico. Isso ocorre porque seus parâmetros variam com o aumento da velocidade do rotor. À medida que a velocidade do rotor se aproxima da velocidade síncrona, a variação do campo magnético aplicado no estator diminui e, conseqüentemente, a corrente

induzida no estator também diminui. Isso reflete a dinâmica única e variável do funcionamento de uma máquina de indução, onde a velocidade de rotação afeta diretamente as características do campo magnético e, por conseguinte, a corrente induzida no estator.

Se o enrolamento da máquina de indução for simétrico e a máquina for alimentada com três tensões equilibradas, todos os parâmetros do circuito equivalente podem ser representados por fase, independentemente se a ligação for em delta ou estrela, como mostrado na Figura 3.1. Os valores desses parâmetros podem ser determinados a partir de ensaios em vazio, ensaios de rotor bloqueado e medições das resistências dos enrolamentos do estator.

Esses ensaios permitem determinar os parâmetros do circuito equivalente, tais como a resistência do estator R_1 , a reatância do estator X_1 , a resistência do rotor referida ao estator R_2' , a reatância do rotor referida ao estator X_2' , e a reatância de magnetização X_m . Com base nesses valores determinados experimentalmente, é possível construir o circuito equivalente da máquina de indução, que representa seu comportamento elétrico de forma precisa e confiável.

Figura 3.1 - Circuito equivalente de uma máquina assíncrona por fase



Fonte: (CHUNHA, 2023, p.32)

Os parâmetros são:

R_1 – Resistência efetiva do estator.

X_1 – Reatância de dispersão do estator.

R_c – Resistência de perdas do núcleo.

X_m – Reatância de magnetização.

R_2 – Resistência do rotor.

X_2 – Reatância de dispersão do rotor.

s – Escorregamento.

3.3 PERDAS DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA

Compreender o funcionamento de uma máquina de indução em modo gerador envolve entender o fluxo de potência quando a máquina opera tanto acima quanto abaixo da velocidade síncrona.

No modo de operação como gerador, a potência ativa flui do rotor para os terminais da máquina e sofre diversas perdas ao longo do processo de conversão. Essas perdas incluem as perdas nos condutores, perdas por atrito e ventilação, bem como perdas nos núcleos ferromagnéticos. É importante levar em consideração essas perdas ao calcular a eficiência da máquina.

A eficiência da máquina de indução operando como gerador pode ser calculada utilizando uma equação que considera as perdas mencionadas anteriormente. Este cálculo é fundamental para entender quão eficaz é o processo de conversão de energia na máquina de indução quando opera como gerador.

$$n_{\%} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} * 100 \quad (3.13)$$

No modo de operação como gerador, é importante notar que o fluxo de potência reativa não sofre alterações significativas. No entanto, para produzir o campo magnético necessário, essa potência reativa não pode ser fornecida pelo rotor do tipo gaiola de esquilo nem pela máquina motriz. Portanto, para que a máquina de indução possa fornecer potência ativa quando operando como gerador, é essencial que exista uma fonte externa de potência reativa disponível.

Em resumo, a capacidade da máquina de indução de fornecer potência ativa no modo gerador depende da disponibilidade de uma fonte externa de potência reativa para sustentar o campo magnético necessário.

3.4 POTÊNCIA E TORQUE EM MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

A potência em máquinas assíncronas sofre diversas perdas no estator e no rotor até que esta potência seja convertida em potência mecânica ou torque, algumas destas perdas que

mostram um efeito maior no resultado de saída de torque final serão tratadas a seguir. Neste projeto não serão analisadas as perdas de núcleo, pois para o motor de estudo na tração estas perdas não são perdas de grande impacto, por se tratar de um motor de baixa potência (CHUNHA, 2023, p.32).

3.4.1 Perdas de fluxo de potência

Uma máquina assíncrona pode ser comparada com um transformador rotativo, pois o circuito magnético do rotor é desconectado e ligado em um eixo girante que possui uma parte de entreferro. Para este projeto sua entrada é um sistema trifásico de tensões e correntes. Em uma máquina assíncrona comum, os condutores do secundário (armadura) estão em curto circuito, provocando uma reação no rotor e uma saída mecânica (CHUNHA, 2023, p.33).

Na entrada de uma máquina assíncrona ($P_{entrada}$) a potência é na forma de tensões e correntes trifásicas, ou seja, potência elétrica. As primeiras perdas encontradas na máquina são perdas I^2R nos condutores de cobre do estator (P_{PCE}). Outra quantidade de potência é perdida como histerese e corrente parasita no estator ($P_{núcleo}$). O fluxo de potência restante é transferido ao rotor da máquina através do entreferro do circuito magnético entre o estator e o rotor denominada potência de entreferro (P_{EF}) da máquina. Após a potência ser transferida ao rotor, uma parte dela é perdida nos condutores de cobre como perdas I^2R (P_{PCR}) e o restante é convertido da forma elétrica para a forma mecânica (P_{conv}). No rotor, as perdas por atrito e ventilação (P_{AeV}) e as perdas suplementares ($P_{suplementar}$) são subtraídas. A potência mecânica restante é a saída da máquina ($P_{saída}$) (CHUNHA, 2023, p.33).

As perdas no núcleo do rotor são muito pequenas em comparação com as do estator por este fato e pela dificuldade de representá-las no circuito, normalmente são desprezadas. Essas perdas são representadas no circuito equivalente da máquina assíncrona pelo resistor R_c (ou condutância G_c) (CHUNHA, 2023, p.33).

Quanto maior a velocidade de uma máquina assíncrona, maiores serão as perdas por atrito, ventilação e suplementares. e, quanto maior for a velocidade da máquina (até n_{sinc}), menores serão suas perdas no núcleo. As perdas rotacionais totais de um motor são

frequentemente consideradas constantes com a velocidade variável, porque as diversas perdas variam em sentidos opostos com mudança de velocidade (CHUNHA, 2023, p.33).

3.5 POTÊNCIA E TORQUE EM UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA

A corrente de entrada de uma fase da máquina pode ser obtida dividindo a tensão de entrada pela impedância equivalente total:

$$I_1 = \frac{V_{\phi}}{Z_{eq}} \quad (3.14)$$

A impedância equivalente:

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c - jB_M + \frac{1}{(\frac{V_2}{s} + jX_2)}} \quad (3.15)$$

As perdas no cobre do estator nas três fases são dadas por:

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (3.16)$$

As perdas no núcleo são dadas por:

$$P_{núcleo} = 3E_1^2 G_c \quad (3.17)$$

A potência de entreferro transferida para o rotor pode ser deduzida pela subtração das perdas na potência de entrada.

$$P_{EF} = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{núcleo} \quad (3.18)$$

O elemento do circuito equivalente em que a potência de entreferro pode ser consumida é no resistor R_2/s . Enfim, a potência de entreferro que chega até o rotor está a seguir.

$$P_{EF} = \frac{3I_2^2 R_2}{s} \quad (3.19)$$

As perdas resistivas do circuito do rotor são.

$$P_{PCR} = 3I_R^2 R_R \quad (3.20)$$

Ou como a corrente esta referida no primário temos.

$$P_{PCR} = 3I_2^2 R_2 \quad (3.21)$$

As perdas nos condutores de cobre do estator, no núcleo e nos condutores de cobre do rotor são subtraídas da potência de entrada da máquina, a potência restante é convertida em potência mecânica. Essa potência convertida, é dada por.

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{EF} - P_{PCR} \\ &= \frac{3I_2^2 R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\ &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\ P_{conv} &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \end{aligned} \quad (3.22)$$

As perdas no cobre do estator são iguais à potência de entreferro vezes o escorregamento.

$$P_{PCR} = sP_{EF} \quad (3.23)$$

Como $P_{CONV} = P_{EF} - P_{PCR}$, isso também fornece outra relação entre a potência de entreferro e a potência convertida da forma elétrica em mecânica:

$$P_{conv} = P_{EF} - P_{PCR}$$

$$= P_{EF} - sP_{EF}$$

$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG} \quad (3.24)$$

Finalmente, se as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares forem conhecidas, a potência de saída poderá ser obtida por.

$$P_{saída} = P_{conv} - P_{AeV} - P_{suplementar} \quad (3.25)$$

O torque induzido τ_{ind} de uma máquina foi definido como o torque gerado pela conversão interna de potência elétrica em mecânica, é dado pela equação.

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (3.26)$$

O torque induzido de uma máquina assíncrona também pode ser expresso de forma diferente. A Equação (3.9) fornece a velocidade real em termos de escorregamento, ao passo que a Equação (3.24) expressa P_{conv} em termos de P_{EF} e escorregamento. Substituindo as duas equações na Equação (3.26), temos.

$$\tau_{ind} = \frac{(1 - s)P_{EF}}{(1 - s)\omega_{sinc}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (3.27)$$

Expressando o torque induzido diretamente em termos de potência de entreferro e velocidade síncrona, que não varia. Portanto, o conhecimento de P_{EF} fornece diretamente τ_{ind} .

3.6 DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DO CONJUGADO INDUZIDO

Como mostrado anteriormente, o torque induzido em uma máquina de indução é dado pelas Equações (3.26) e (3.27). Sabendo que ω_{sinc} é constante, e conhecendo-se a potência no entreferro, é possível obter o conjugado induzido na máquina.

A potência no entreferro é igual a potência absorvida na resistência R_2/s . Se a corrente I_2 pode ser determinada, então a potência de entreferro e o conjugado induzido serão conhecidos. Então, a partir do circuito equivalente tem-se:

$$P_{EF,1\emptyset} = \frac{I_2^2 R_2}{s}$$

Logo, a potência no entreferro total é:

$$P_{EF,3\emptyset} = \frac{3I_2^2 R_2}{s}$$

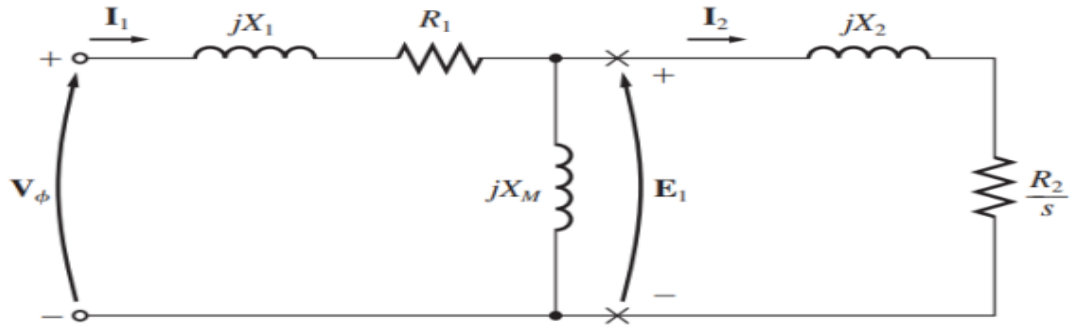
Aplicando o teorema de Thévenin à esquerda das cruzes (X) no circuito equivalente da Figura 3.2 é possível obter a impedância de Thévenin:

$$Z_{TH} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (3.28)$$

A partir da regra do divisor de tensão, tem-se que:

$$\begin{aligned} V_{TH} &= V_{\emptyset} \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} \\ &= V_{\emptyset} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + X_M} \end{aligned}$$

Figura 3.2 - Circuito equivalente por fase



Fonte: (CHUNHA, 2023, p.32)

Logo, o valor da tensão de Thévenin V_{TH} pode ser obtido a partir de:

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (3.29a)$$

Já que $X_M \gg X_1$ e $X_M \gg R_1$, o valor da tensão de Thévenin será aproximadamente:

$$V_{TH} \approx V_{\phi} \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (3.29b)$$

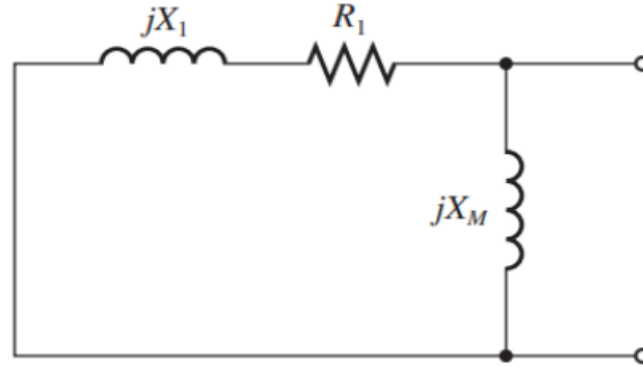
A

Figura 3.3 mostra o circuito de entrada com a fonte de tensão curto-circuitada. Com as duas impedâncias em paralelo, tem-se:

$$Z_{TH} = \frac{(Z_1 Z_M)}{(Z_1 + Z_m)}$$

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (3.30)$$

Figura 3.3 - Impedância de Thevenin do circuito de entrada



Fonte: (CHUNHA, 2023, p.39)

Como $X_M \gg X_1$ e $X_M \gg R_1$, a resistência e a reatância de Thévenin são aproximadamente:

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_M + X_1} \right)^2 \quad (3.31)$$

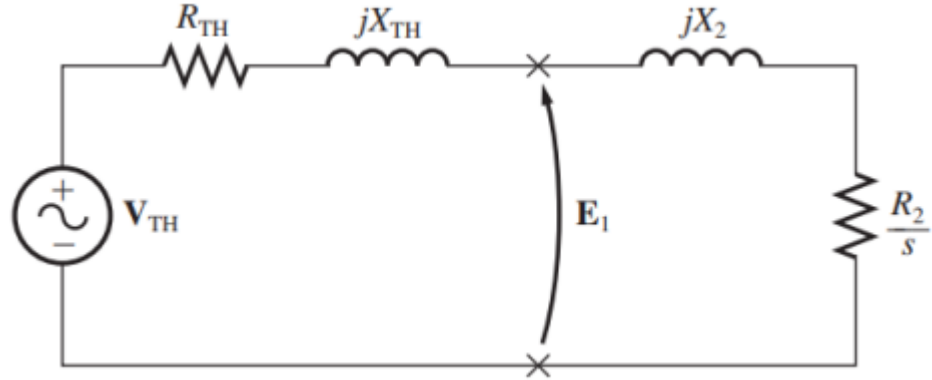
$$X_M \approx X_1 \quad (3.32)$$

A corrente I_2 pode ser obtida a partir do circuito equivalente da Figura 3.4 e é dada por:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (3.33)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2} \quad (3.34)$$

Figura 3.4 - Impedância de Thevenin do circuito de entrada



Fonte: (CHUNHA, 2023, p.39)

O valor dessa corrente é:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (3.35)$$

A potência de entreferro é dada por:

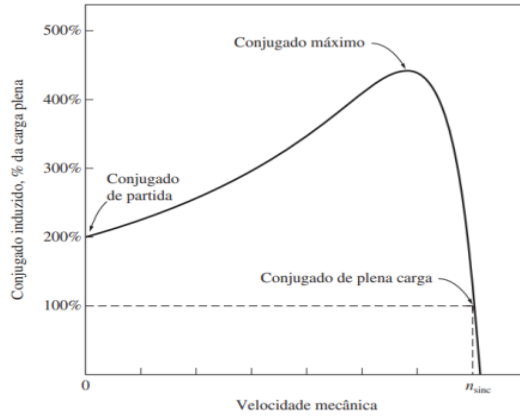
$$\begin{aligned} P_{EF,3\phi} &= \frac{3I_2^2 R_2}{s} \\ &= \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Enfim, o torque induzido é dado por:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (3.37)$$

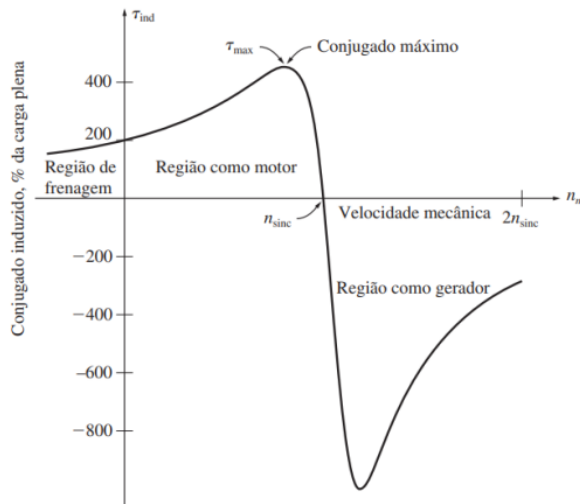
$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_{sinc} [(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (3.38)$$

Figura 3.5 - Curva característica de torque versus velocidade de uma máquina assíncrona gaiola de esquilo.



Fonte: (CHUNHA, 2023, p.42)

Figura 3.6 - Curva característica de torque versus velocidade de uma máquina assíncrona, mostrando as faixas estendidas de operação (região de frenagem e região como gerador).



Fonte: (CHUNHA, 2023, p.42)

A Figura 3.5 mostra um gráfico do torque de uma máquina assíncrona em função da velocidade e a Figura 3.6 mostra um gráfico com as velocidades acima e abaixo da faixa normal de funcionamento da máquina. A potência convertida para a forma mecânica em uma máquina assíncrona é igual a:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_{sinc}$$

3.7 TORQUE MÁXIMO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

Como o torque induzido é igual a PEF / ω_{sinc} , o torque máximo possível ocorre quando a potência de entreferro é máxima. Como a potência de entreferro é igual à potência consumida no resistor R_2/s , o torque máximo induzido ocorrerá quando a potência consumida por esse resistor for máxima. Em uma situação na qual o ângulo da impedância de carga é fixo, a transferência máxima de potência para o resistor de carga R_2/s ocorrerá quando o valor da impedância for igual ao valor da impedância da fonte.

$$Z_{fonte} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2 \quad (3.39)$$

A transferência máxima de potência ocorre quando.

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (3.40)$$

Isolando o escorregamento na Equação (3.39), vemos que o escorregamento de torque máximo é dado por.

$$s_{m\acute{a}x} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (3.41)$$

Observe que a resistência de rotor referida R_2 aparece apenas no numerador. Assim, o escorregamento do rotor no torque máximo é diretamente proporcional à resistência do rotor. O valor do torque máximo pode ser encontrado inserindo a expressão para o escorregamento de torque máximo na Equação (3.38).

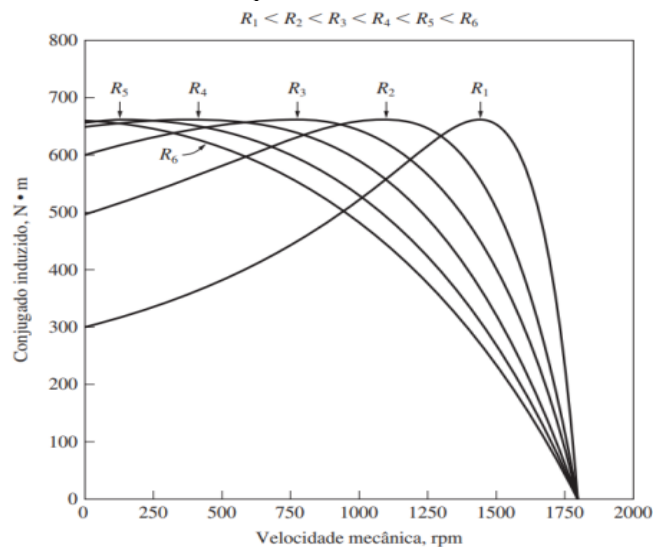
$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc}[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (3.42)$$

Quanto menores forem as reatâncias de uma máquina, maior será o torque máximo que ela é capaz de alcançar. Observe que o escorregamento para o qual ocorre o torque máximo é

diretamente proporcional à resistência do rotor [Equação (3.41)], mas o valor do torque máximo independe do valor dessa resistência [Equação (3.42)].

A característica de torque versus velocidade de uma máquina assíncrona de rotor bobinado está mostrada na Figura 3.7. Quando a resistência do rotor é aumentada, a velocidade do torque máximo do rotor diminui, mas o torque máximo permanece constante.

Figura 3.7 - Efeito da variação de resistência do rotor sobre a característica de torque versus velocidade de uma máquina assíncrona de rotor bobinado.



Fonte: (CHUNHA, 2023, p.45)

4 ENSAIOS NA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

4.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Para saber como uma máquina assíncrona responde às mudanças de carga, é necessário determinar os parâmetros do circuito equivalente. Já que é um modelo real, para achar esses valores é necessário realizar ensaios para descobrir os valores das resistências R_1 , R_2 , e reatâncias X_1 , X_2 , e X_M .

Os ensaios devem ser realizados em ambientes controlados com geradores em bom estado de conservação. Ensaios de rotor bloqueado envolvem esforços mecânicos e índices de aquecimento elevados, sendo assim, é necessário assegurar que o gerador esteja à temperatura ambiente antes do início do ensaio, visto que as resistências variam com a temperatura e com a frequência do rotor. O meio mecânico usado para bloquear a rotação do rotor deve possuir uma rigidez adequada para evitar lesões pessoais e danos materiais (MARTINS, 2023, p.51).

4.2 MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA

A máquina de indução trifásica utilizada para os testes e experimentos deste trabalho possui gaiola de esquilo simples e potência de 2200W. Pode ser alimentado a partir de dois modelos de ligações trifásicas. Em delta, a tensão nominal é de 220V e a corrente é de 8.18A. Para a ligação em estrela, a tensão é de 380V e a corrente mede 4.74A. A rotação em regime permanente é de 1735 rpm, frequência de 60Hz, fator de serviço 1.15, corrente de partida 6,5 vezes a nominal, fator de potência de 0,83 e índice de proteção IP55.

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a ligação em delta, 220V, por meio de um variavolt, para que fosse possível controlar a tensão trifásica de saída. A Figura 4.1 e Figura 4.2 mostra a placa do gerador de 3cv.

Figura 4.1 - Máquina de indução usada nos experimentos.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.2 - Placa de identificação da máquina de indução.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Para realizar as medidas foi usado o analisador de energia FLUKE 1775, com ponteiros capazes de medir tensão, corrente e potência.

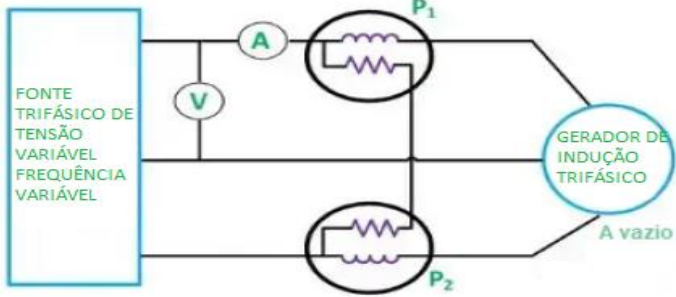
4.3 O ENSAIO A VAZIO OU SEM CARGA

O ensaio a vazio é um método usado para determinar os parâmetros do circuito equivalente de uma máquina de indução trifásico, como a resistência e a reatância de magnetização. Nesse método, as tensões trifásicas, geralmente equilibradas e sob frequência nominal, são

aplicadas aos terminais do estator da máquina, porém, ela gira sem nenhuma carga no eixo. Dessa forma, os valores de potência obtidos na entrada representam o total das perdas a vazio, compostas pelas perdas I^2R , perdas por atrito, ventilação e perdas no núcleo (ELETRICAL4U, 2023).

Para obter resultados mais precisos, é necessário esperar a máquina gire por algum tempo, até que os enrolamentos estejam completamente lubrificados. Nesse momento, as leituras de tensão, corrente de entrada e potência de entrada podem ser realizadas. Para descobrir as perdas rotacionais, basta subtrair as perdas I^2R do total obtido. A Figura 4.3 mostra o esquema para obter as grandezas nesse ensaio (ELETRICAL4U, 2023).

Figura 4.3 - Ensaio a vazio de uma máquina assíncrona.



Fonte: (ELECTRICAL, 2023)

4.3.1 Valor da resistência R_1 do estator

Primeiramente, antes da realização do ensaio, é necessário descobrir o valor da resistência R_1 do estator. Para descobrir esse valor, foi usado um ohmímetro para medir os valores diretamente nos terminais do gerador para cada fase. As medições foram realizadas com o gerador aquecido para maior proximidade com um cenário real. A Tabela 4.1 a seguir mostra os valores das medidas realizadas.

Tabela 4.1 - Resistência de cada fase			
	Fase A	Fase B	Fase C
Resistência (Ω)	2,7	2,8	2,7

Fonte: Próprio Autor (2024).

Para futuros cálculos, a resistência do estator será considerada $2,8\Omega$, que é resultado da média dos valores obtidos na Tabela 4.1.

4.3.2 Realização do ensaio a vazio e resultados

Com o auxílio de um varivolt, foi possível realizar o ensaio com tensões trifásicas de 220 V, frequência nominal e ligação em delta. Posteriormente, foram efetuadas leituras de tensão, corrente e potência.

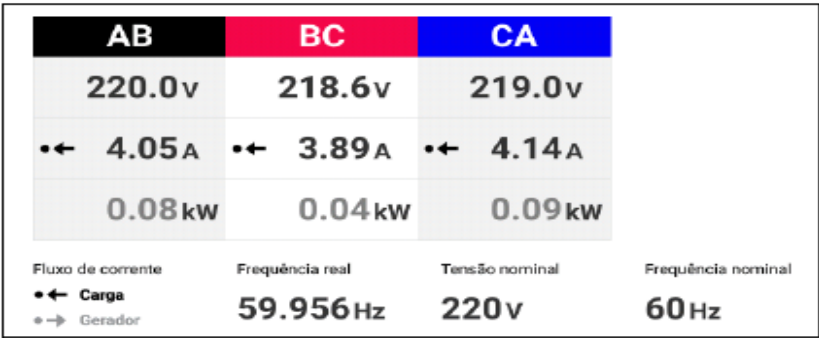
As imagens a seguir, retiradas do equipamento de medição, mostram os valores das leituras, as formas de onda da tensão e da corrente e os fasores (CUNHA, 2022, p.60).

Tabela 4.2 – Dados do ensaio a vazio

	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Tensão (V)	220	218,6	219	219,2
Corrente (A)	4,05	3,89	4,14	4,03
Potência (kW)	0,08	0,04	0,09	-

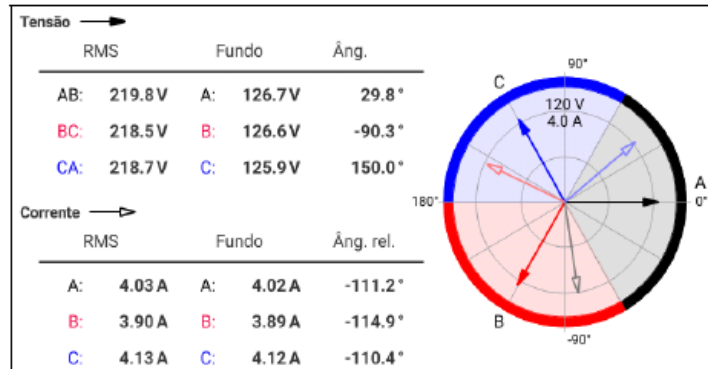
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.4 - Medidas no ensaio a vazio.



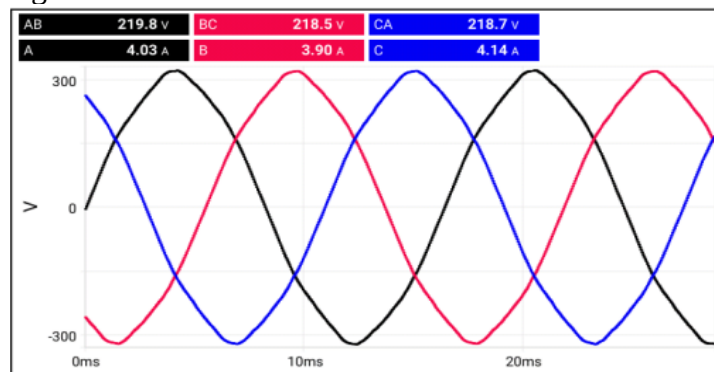
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.5 - Fasores no ensaio a vazio.



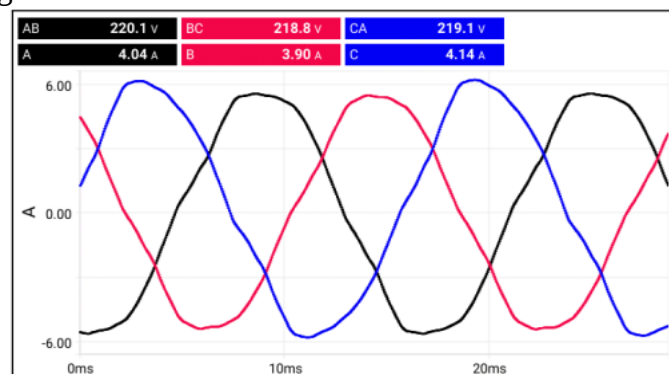
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.6 - Formas de onda da tensão no ensaio a vazio.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.7 - Formas de onda da corrente no ensaio a vazio.



Fonte: Próprio Autor (2024).

A partir dos dados obtidos tem-se:

$$I_{Lm\u00e9dia} = 4,03 A$$

$$I_{\emptyset, IZ} = \frac{4,03}{\sqrt{3}} = 2,33A$$

$$|Z_{vz}| = \frac{219,2}{2,33} = 94,08\Omega = X_1 + X_M$$

As perdas no cobre do estator s\u00e3o:

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 = 3(2,33A)^2 (2,8) = 45,60W$$

Sendo assim, as perdas rotacionais a vazio s\u00e3o:

$$P_{rot} = P_{entrada,z} - P_{PCE,vz}$$

$$P_{rot} = 210W - 45,60W = 164,4W$$

A P_{fe} pot\u00eancia ativa consumida no ensaio a velocidade s\u00edncrona, onde P_{vs} \u00e9 a pot\u00eancia ativa monof\u00e1sica.

$$P_{fe} = P_{vs} + 3I_1^2 R_1 = 210 + 45,60 = 255,6W$$

4.4 O ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO

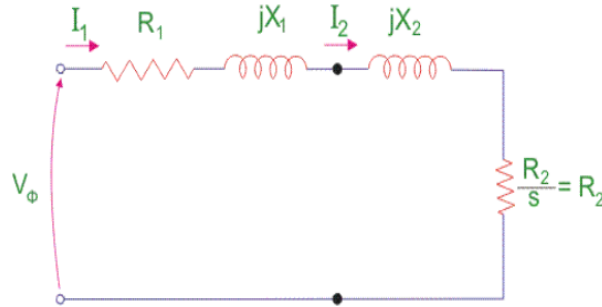
O ensaio de rotor bloqueado \u00e9 normalmente realizado em uma m\u00e1quina de indu\u00e7\u00e3o para achar a imped\u00e2ncia de dispers\u00e3o. Al\u00e9m disso, podem ser encontrados outros par\u00e2metros como: torque do gerador, corrente de curto-circuito para a tens\u00e3o normal. O teste de rotor bloqueado para o gerador \u00e9 an\u00e1logo a um ensaio de curto-circuito em um transformador. No gerador, o eixo \u00e9 travado de forma que n\u00e3o possa se mover e o enrolamento \u00e9 curto circuitado (ELETRICAL4U, 2023).

Para esse tipo de ensaio, a tens\u00e3o aplicada nos terminais do estator deve ser baixa, j\u00e1 que utilizar o valor nominal pode causar danos aos enrolamentos do estator. Sendo assim, com o eixo impedido de rodar e sua velocidade zero, a tens\u00e3o \u00e9 ajustada at\u00e9 que uma corrente de

plena carga passe pelos enrolamentos do estator. Em seguida, são medidas a potência, tensão e corrente de entrada antes que o gerador aqueça demais (ELETTRICAL4U, 2023).

A Figura 4.8 a seguir mostra o circuito equivalente resultante desse ensaio.

Figura 4.8 - Circuito equivalente para o rotor bloqueado



Fonte: (ELECTRICAL, 2023)

Sendo assim, a potência de entrada da máquina é:

$$P = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta$$

O fator de potência com o rotor bloqueado é dado por:

$$FP = \cos\theta = \frac{P_{entrada}}{\sqrt{3}V_T I_L} \quad (4.1)$$

O valor total da impedância do circuito com o rotor bloqueado (RB) é:

$$|Z_{RB}| = \frac{V_\phi}{I_L} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \quad (4.2)$$

E o ângulo da impedância total é. Portanto:

$$\begin{aligned} Z_{RB} &= R_{RB} + jX_{RB} \\ &= |Z_{RB}| \cos\theta + j|Z_{RB}| \sin\theta \end{aligned} \quad (4.3)$$

A resistência com rotor bloqueado é:

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \quad (4.4)$$

A reatância de rotor bloqueado é dada pela Equação 4.4, em que X'_1 e X'_2 são as reatâncias do estator e do rotor, respectivamente:

$$X'_{RB} = X'_1 + X'_2 \quad (4.5)$$

A resistência do rotor pode ser obtida a partir de:

$$R_2 = R_{RB} - R_1 \quad (4.6)$$

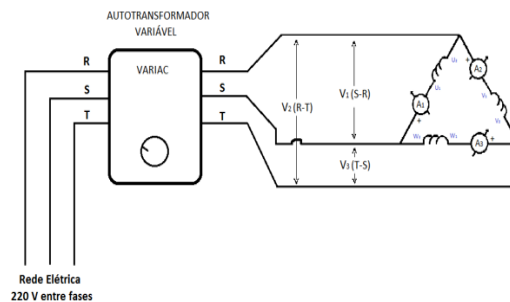
Já que a reatância total é diretamente proporcional à frequência, a reatância total equivalente, na frequência normal de funcionamento é dada por:

$$X_{RB} = \frac{f_{nominal}}{f_{ensaio}} X'_{RB} = X_1 + X_2 \quad (4.7)$$

4.4.1 Realização do ensaio com rotor bloqueado e resultados

A ligação para esse ensaio foi em delta também e o rotor foi bloqueado com o auxílio de um alicate de pressão. A corrente foi ajustada até chegar a um valor próximo do nominal e após isso, foram realizadas as medidas mostradas a seguir (CHUNHA, 2022, p.64).

Figura 4.9 - Montagem do ensaio a rotor bloqueado



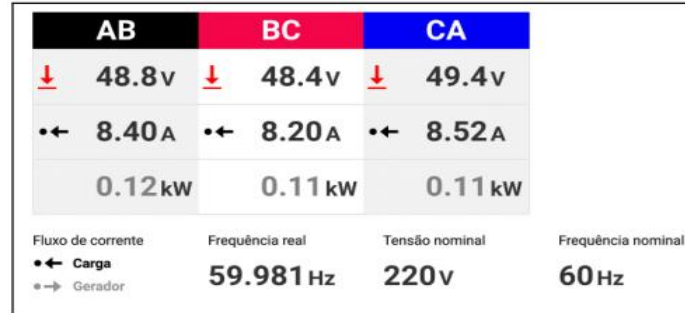
Fonte: (HOMRICH, 2013, p.90).

Tabela 4.3– Dados do ensaio com rotor bloqueado

	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Tensão (V)	48,8	48,4	49,4	48,87
Corrente (A)	8,4	8,2	8,52	8,37
Potência (kW)	0,12	0,11	0,11	-

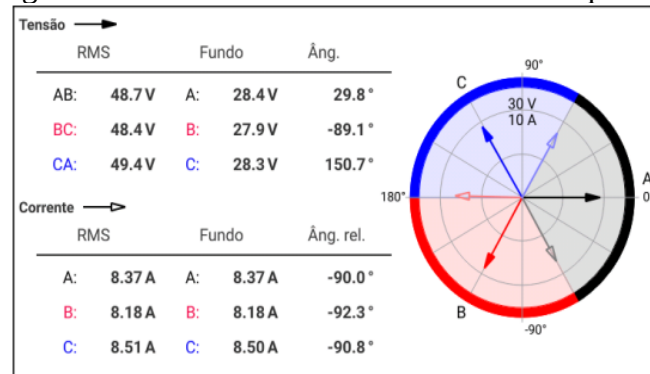
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.10 - Medidas no ensaio com rotor bloqueado.



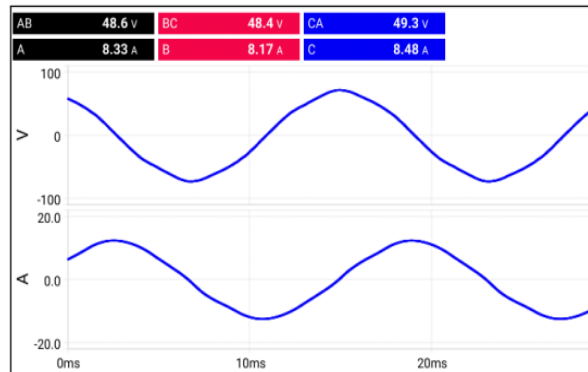
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.11 - Fasores no ensaio com rotor bloqueado.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.12 - Formas de onda da tensão e da corrente no ensaio com rotor bloqueado.



Fonte: Próprio Autor (2024).

A média da corrente nesse ensaio foi de:

$$I_{Lmédia} = 8,27A$$

$$I_{\emptyset,lz} = \frac{8,27}{\sqrt{3}} A = 4,83A$$

A impedância é dada por:

$$|Z_{RB}| = \frac{V_{\emptyset}\sqrt{3}}{I_L} = \frac{49,87\sqrt{3}}{8,37} = 10,32\Omega$$

Sendo assim o ângulo de impedância é:

$$\cos\theta = \frac{340}{\sqrt{3}(48,87)(8,27)} = 0,4957$$

$$\theta = 60,284^\circ$$

Com isso é possível descobrir o valor da resistência R_{RB} :

$$R_{RB} = 10,32 * \cos 60,284^\circ = 5,11\Omega$$

Como $R_{RB} = R_1 + R_2 = 5,11\Omega$ e $R_1 = 2,8\Omega$ então $R_2 = 2,31\Omega$. A reatância para X'_{RB} é:

$$X'_{RB} = 10,32 * \sin 60,284^\circ = 8,96\Omega$$

Logo, a reatância equivalente para 60Hz é:

$$X_{RB} = \frac{60Hz}{60Hz} 8,96 = 8,96\Omega$$

Para geradores de classe N, $X_1 = 0,68X_2$. Dessa forma, a reatância de magnetização é dada por:

$$X_1 = 0,68X_2$$

$$\begin{aligned}
X_1 + X_2 &= 8,96 \\
X_1 &= 0,68(8,96 - X_1) \\
X_1 &= 3,63\Omega \\
X_2 &= 5,33\Omega \\
X_M &= |Z_{VZ}| - X_1 = 94,8 - 3,63 = 91,17\Omega
\end{aligned}$$

Segundo, após obter P_{fe} que representa as perdas no núcleo do estator por fase [W], $I_{1,vs}^2$ é a corrente eficaz de fase monofásica, é possível calcular o parâmetro R_{fe} pela equação:

$$R_{fe} = \frac{\frac{X_m^2}{P_{fe}} + \sqrt{\left(\frac{X_m^2 I_{vs}^2}{P_{fe}}\right)^2 - 4X_m^2}}{2} = \frac{\frac{91,17^2}{45,60} + \sqrt{\left(\frac{91,17^2 * 2,33^2}{45,60}\right)^2 - 4 * 91,17^2}}{2} = 577,45\Omega$$

Os dados obtidos a partir do ensaio foram:

$$R_1 = 2,8\Omega \quad R_2 = 2,31\Omega \quad X_1 = 3,63\Omega \quad X_2 = 5,33\Omega \quad X_M = 91,17\Omega$$

4.4.2 Circuito equivalente de thévenin

$$V_{TH} \approx V_\phi \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right) = 127 \left(\frac{91,17}{3,63 + 91,17} \right) = 122,1V$$

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 = 2,8 \left(\frac{91,17}{3,63 + 91,17} \right)^2 = 2,589\Omega$$

$$\begin{aligned}
X_{TH} &\approx X_1 = 3,63\Omega \\
s_{m\acute{a}x} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{2,31}{\sqrt{(2,589^2 + (3,63 + 5,33)^2)}} = 0,2478 = 24,78\%
\end{aligned}$$

O torque máximo desse motor é dado por

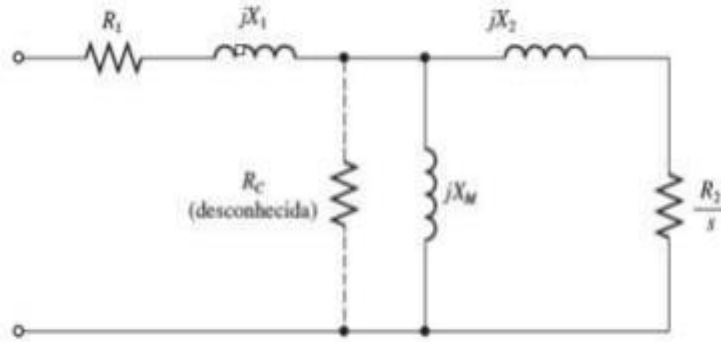
$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc}[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]}$$

$$= \frac{3(122,1)^2}{2\left(\frac{188,5rad}{s}\right)[2,589 + \sqrt{(2,589)^2 + (3,63 + 5,33)^2}]} = 9,95 N.m$$

$$P_{convmax} = \tau_{ind} * \omega_m = 9,95 * 188,5 = 1876,75W$$

A Figura 4.13 apresenta o circuito equivalente conforme os cálculos apresentados no capítulo 4.4.1

Figura 4.13 - Circuito equivalente por fase da máquina de 3 CV.



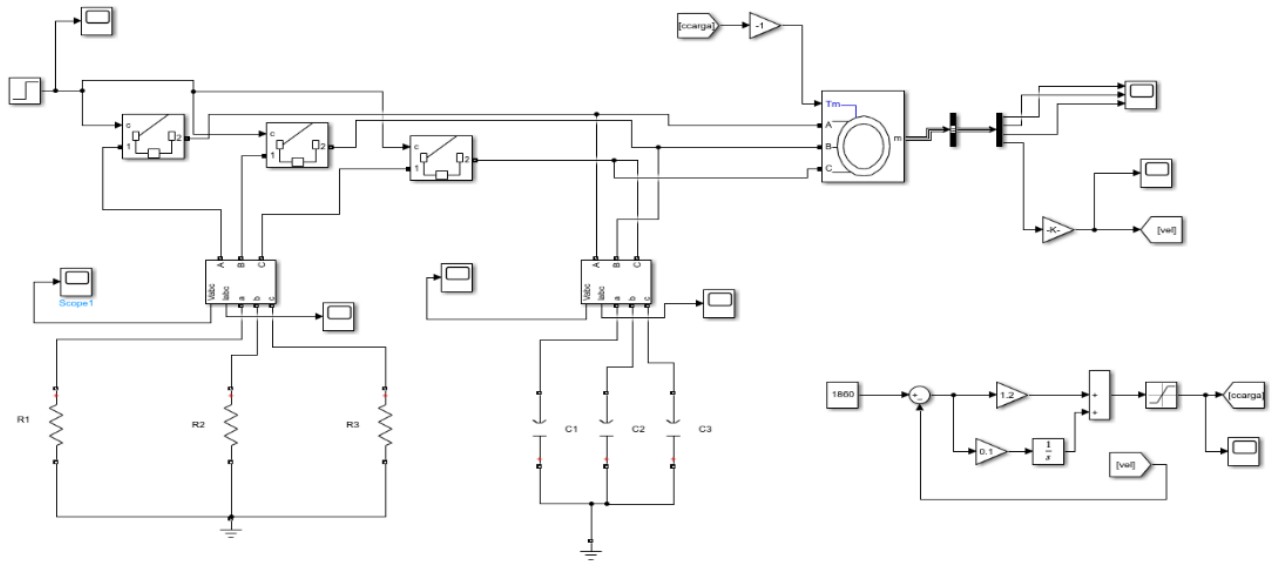
Fonte: (CHUNHA, 2023, p.66).

4.5 SIMULAÇÕES

Para prever o comportamento da máquina em operação interligada em regime permanente, foram utilizados os resultados dos ensaios em vazio e rotor bloqueado para desenvolver um código no MATLAB/ Simulink. Esse código gera figura dos resultados teóricos das equações apresentadas no Capítulo 4.

As simulações são realizadas no modo gerador, é sabido que a transição de modo motor para gerador ocorre quando a velocidade ultrapassa 1800 RPM. Para os testes é realizado com rotação de 1860RPM, que é inserido na máquina primaria (turbina), outro componente que é importante para esta simulação é o banco de capacitores necessário para magnetizar o gerador cujo a capacitância que foi inserido para a simulação é de 40μF.

Figura 4.14 – Diagrama montado no Matlab/Simulink do Sistema de geração eólica



Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.15 – Parâmetros do Circuito Elétrico Equivalente

Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]: [3*736, 380, 60]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]: [2.8 9.62e-3]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]: [2.31 14.13e-3]

Mutual inductance Lm (H): 0.241

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]: [0.00206 0 2]

Initial conditions

[slip, th(deg), ia, ib, ic(A), pha, phb, phc(deg)]:

[0 0 0 20 20 0 0]

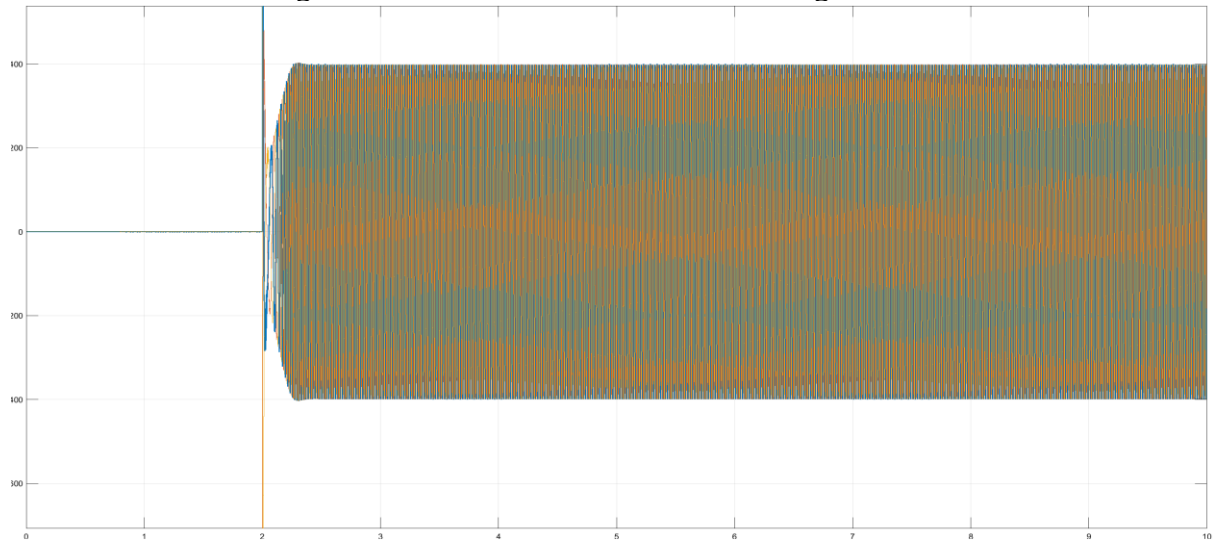
☐ Simulate saturation

[i(Arms) ; v(VLL rms)]: [302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

OK Cancel Help Apply

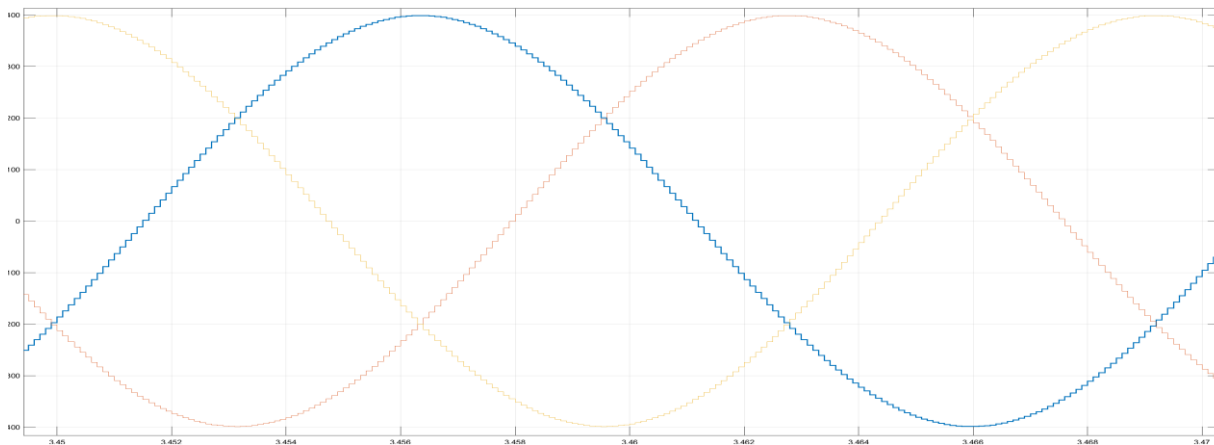
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 4.16 - Tensão Va, Vb e Vc com carga resistiva



Fonte: Próprio Autor (2024)

Figura 4.17 – Tensão Va, Vb e Vc com carga resistiva.



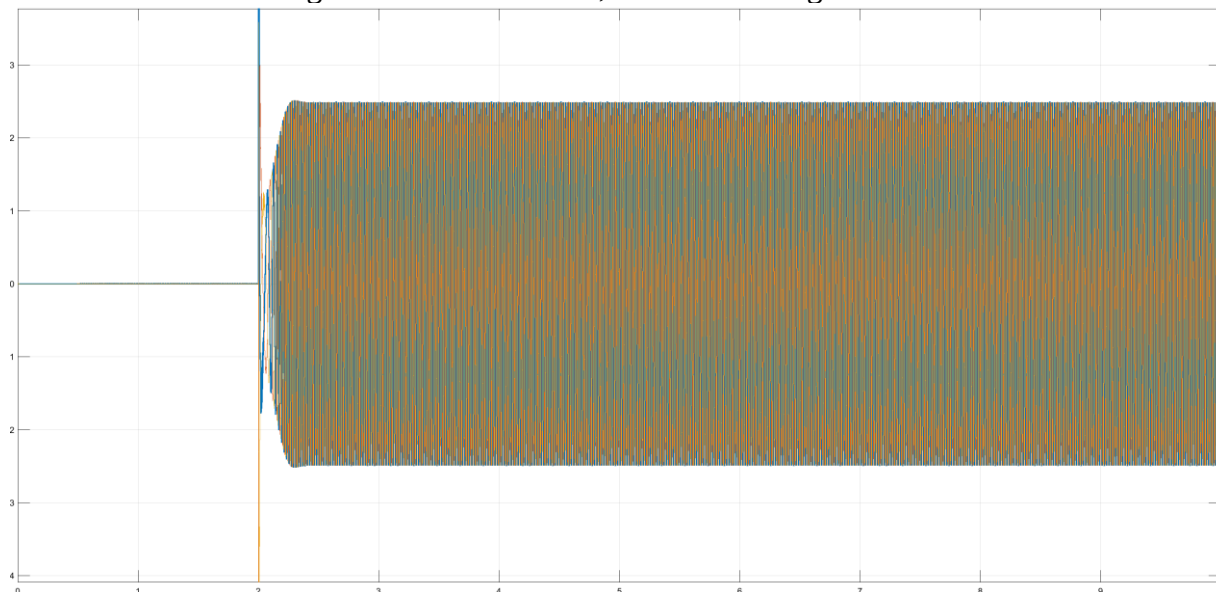
Fonte: Próprio Autor (2024).

A Figura 4.14 e apresentado o diagrama do sistema de geração eólica em que alimenta uma carga resistiva equilibrada de 160Ω .

Foram realizadas simulações conforme a Figura 4.15, onde é inserido os dados do gerador como: potência, tensão e frequência. Outros valores como resistência do rotor, estator e indutância do rotor, estator foram calculados durante o capítulo 4.

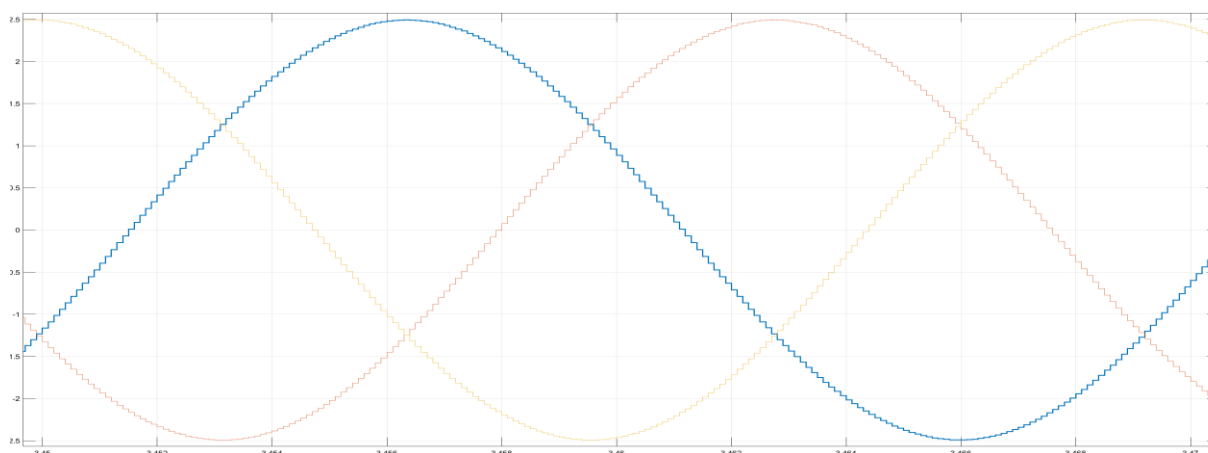
A Figura 4.16 mostra o escorvamento, no instante $t=2s$ a carga e conectada a geração ocasionando uma pequena oscilação até se estabilizar e permanecer em regime permanente. A Figura 4.17 apresenta os valores da tensão trifásica em regime permanente na carga resistiva, note que a tensão máxima é de 400V.

Figura 4.18 - Corrente Ia, Ib e Ic com carga resistiva



Fonte: Próprio Autor (2024).

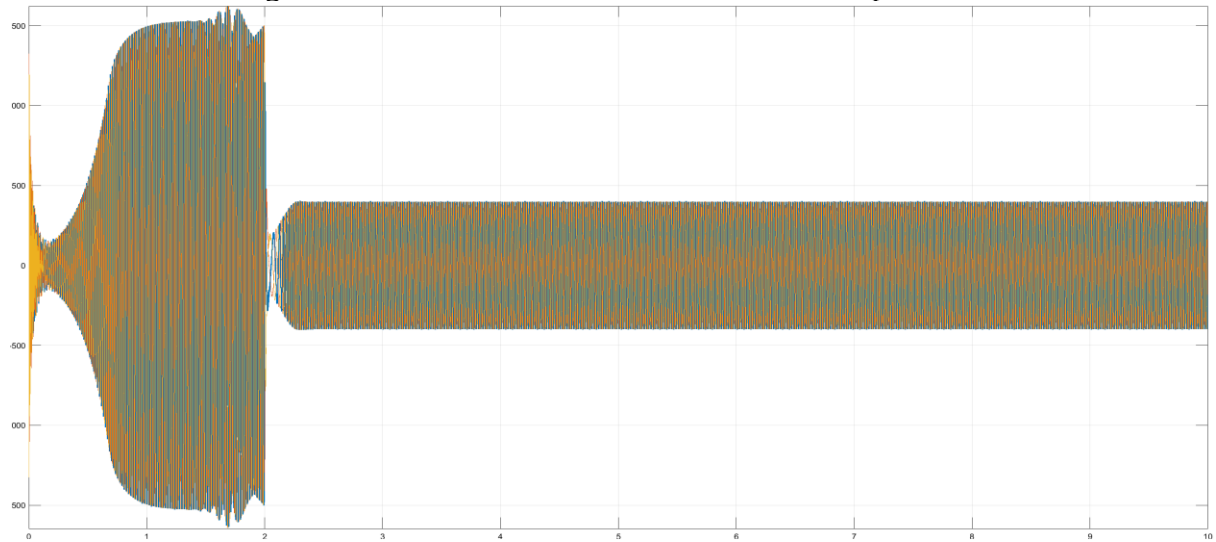
Figura 4.19 – Corrente Ia, Ib e Ic com carga resistiva.



Fonte: Próprio Autor (2024).

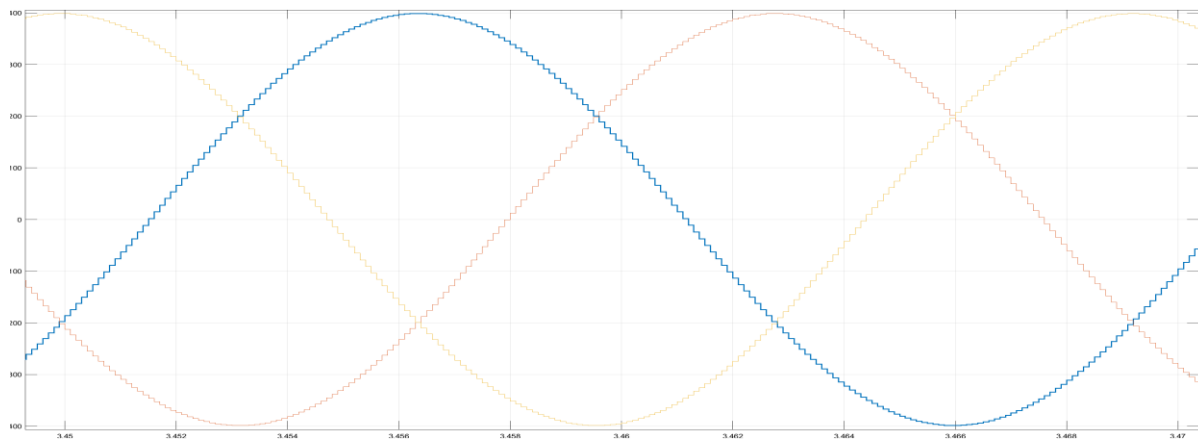
A Figura 4.18 apresenta as correntes nas fases durante o escorvamento para a mesma situação, a corrente inicial é zero pois não houve o chaveamento da carga e no instante $t=2s$ a carga é inserida no sistema e logo após corrente estabilizou para um valor de pico a 2,5 ampères, apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.20 - Tensão V_a , V_b e V_c no banco de capacitores



Fonte: Próprio Autor (2024).

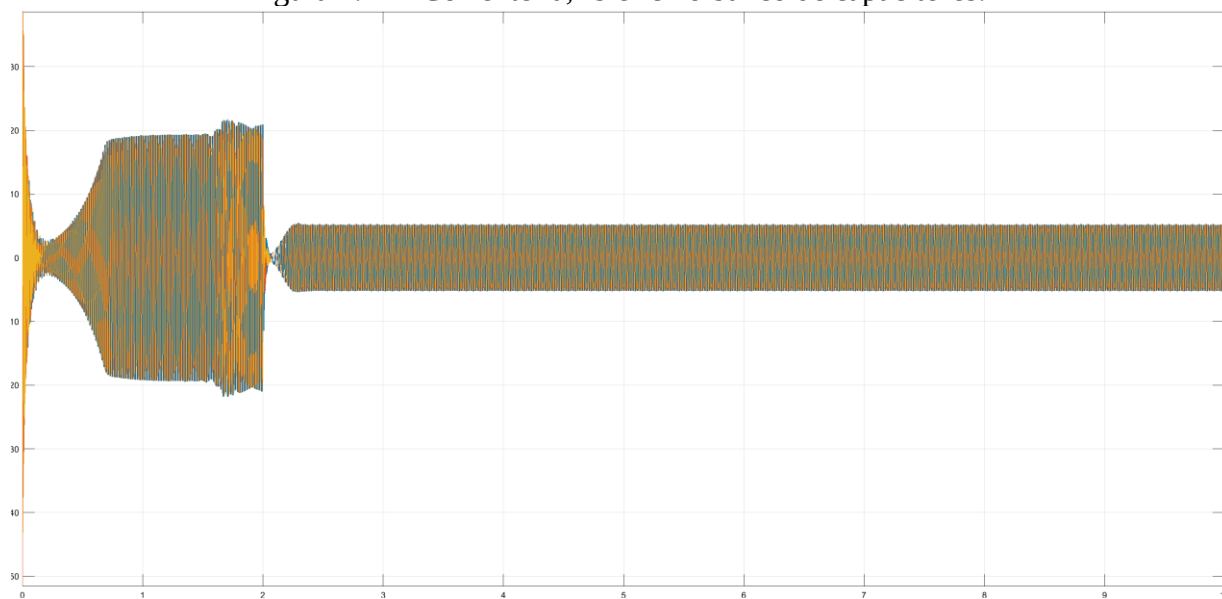
Figura 4.21 – Tensão V_a , V_b e V_c no banco de capacitores.



Fonte: Próprio Autor (2024).

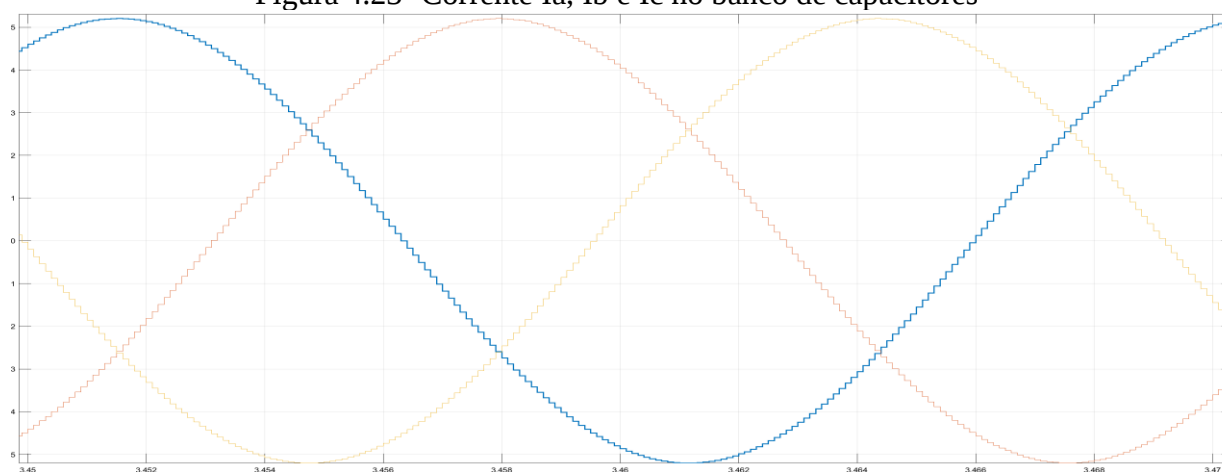
A Figura 4.20 mostra a tensão no capacitor durante o escorvamento de excitação inicial. No instante $t=2s$ é chaveado a carga e logo após é estabilizado a tensão e permanece constante. A Figura 4.21 apresenta a tensão em regime permanente com o valor de pico 400V.

Figura 4.22 - Corrente Ia, Ib e Ic no banco de capacitores.



Fonte: Próprio Autor (2024).

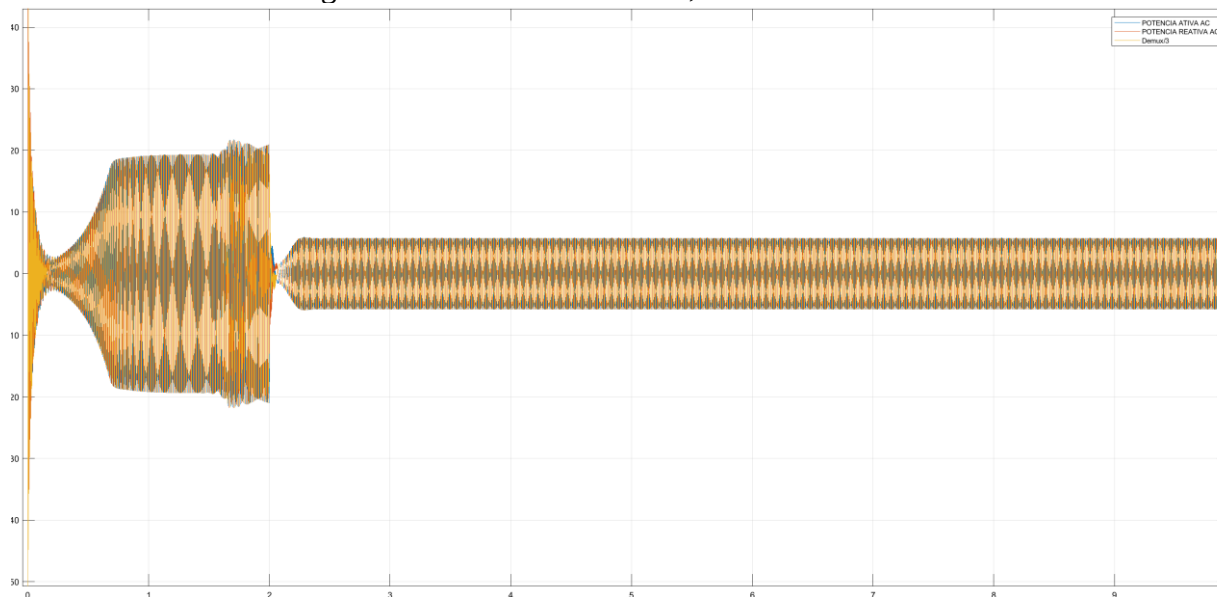
Figura 4.23- Corrente Ia, Ib e Ic no banco de capacitores



Fonte: Próprio Autor (2024).

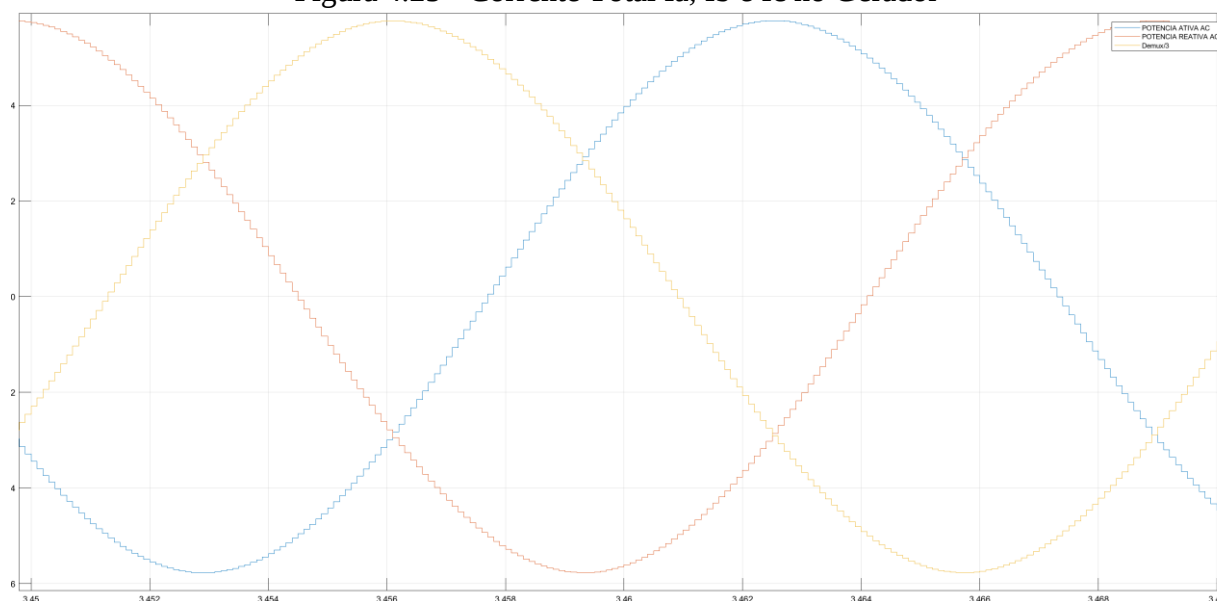
A Figura 4.22 mostra a corrente no capacitor durante o escorvamento inicial. No instante $t=2s$ a carga é inserida no sistema de geração. A Figura 4.23 mostra a corrente em regime permanente no capacitor, chegando a um valor de pico 5 ampères.

Figura 4.24 - Corrente Total Ia, Ib e Ic no Gerador



Fonte: Próprio Autor (2024)

Figura 4.25 - Corrente Total Ia, Ib e Ic no Gerador



Fonte: Próprio Autor (2024).

Note que a Figura 4.24 corresponde a corrente total que sai do gerador parte alimenta a carga e a banca de capacitores durante o escorvamento inicial, no instante $t=2$ s em que a carga é chaveado, ocorre uma oscilação e logo após é estabilizado, a Figura 4.25 mostra a corrente em regime permanente após estabilizar chegando a uma amplitude máxima próximo 6A.

Foi feito os ensaios no gerador para obter o circuito equivalente, após os ensaios do gerador, foi feito uma simulação dinâmica e nessa simulação comprovou que o ensaio foi desenvolvido.

A implementação feita no software é necessária para prever o comportamento do gerador, e a partir deste estudo simular estratégia de controle.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 ENSAIOS COMO GERADOR AUTOEXCITADO

5.1.1 Objetivo

A ideia desse trabalho é fazer apanhado geral dos modos de funcionamento do gerador de indução através de análise experimental, demonstrando o fenômeno da autoexcitação por meio de diferentes cargas e várias configurações de conexão entre os enrolamentos da máquina e capacitores, exemplificar o desempenho da máquina operando como gerador.

5.1.2 Material utilizado

Os materiais utilizados para o trabalho são apresentados conforme a Figura 5.1:

- 1 Gerador de indução trifásica de 3cv (220/380V).
- 2 Motor de indução trifásica de 10 cv (220/380/440V).
- 3 Inversor de Frequência CFW500.
- 4 Analisador de Qualidade de energia: Fluke 1775 Power Quality Analyzer.
- 5 Osciloscópio Digital: Tektronix TPS 2024B 200MHz 2GS/s.
- 6 Disjuntor trifásico 20A.
- 7 Disjuntor trifásico 10A.
- 8 Banco de capacitores 3,28KVAR por fase.
- 9 Carga Resistiva 160Ω por fase.
- 10 Motor de indução trifásico 0.25cv (220/380V).

Figura 5.1 - Ligação dos equipamentos para microgeração eólica.



Fonte: Próprio Autor (2024).

5.1.3 Acoplamento mecânico

Para que a máquina de indução funcione como gerador, é essencial fornecer energia mecânica para girar o rotor, permitindo assim a geração de energia elétrica.

Com o gerador de 3cv devidamente instalado o primeiro ensaio consistiu em funcionamento com rotação 1870 RPM, resultado de cálculos teóricos, para esta rotação o gerador deveria apresentar valores próximos aos valores nominais de placa com o valor de corrente um pouco mais elevado pois o motor está submetido a uma rotação mais elevada.

Nesta seção, realizamos experimentos para investigar o fenômeno de autoexcitação no gerador. Utilizamos um motor de indução 10cv controlado por tensão/frequência como motor principal, cujo eixo do rotor está mecanicamente acoplado ao gerador. A velocidade do motor de indução é precisamente controlada para operar o gerador de indução acima da velocidade síncrona, garantindo a geração de tensão. Durante este estudo, a velocidade do motor principal é mantida constante, emulando assim as condições de uma micro turbina eólica.

O banco de capacitores 3,28KVAR em paralelo com os enrolamentos do estator da máquina de forma a fornecerem reativos necessários para que o gerador se magnetize. é selecionado para gerar tensão e frequência nominais da linha.

Figura 5.2 - Ligação e acoplamento do gerador de 3cv ao motor de 10cv



Fonte: Próprio Autor (2024).

5.1.4 Experimentos realizados

Foram realizados os seguintes experimentos para a operação isolada:

- Verificação da capacitância mínima para a autoexcitação em vazio.
- Análise e comportamento do escorvamento.
- Avaliação do desempenho para carga resistiva e capacitância fixa e velocidade variável.
- Avaliação do desempenho para carga indutiva e capacitância fixa e velocidade variável.

5.2 CAPACITÂNCIA MÍNIMA PARA AUTOEXCITAÇÃO SEM CARGA

O gerador de indução (GI) pode operar nos modos estrela (Y) e delta (Δ) conforme de acordo com a conexão de carga. Por outro lado, a excitação os capacitores também podem ser conectados em estrela e delta. Várias abordagens para calcular o capacitor de excitação mínimo (CMIN) são analisados para identificar um simples e método fácil. Os valores calculados do CMIN são verificados experimentalmente para gerar a tensão nominal (Y) e frequência (Y) em

quatro combinações possíveis, como i) Δ GI - Δ CMIN, ii) Δ GI - Y CMIN iii) Y GI - Δ CMIN, e iv) Y GI - Y CMIN.

Cálculo do CMIN usando detalhes da placa de identificação: Esta abordagem é um dos métodos mais simples para calcular o CMIN valor para operação GI sem usar qualquer cálculo técnicas. Para a realizar a variação de carga, utilizou um quadro de cargas com as seguintes características.

$$C_{MIN} = \frac{Q_g}{3 * V^2 * 2 * \pi * f} \quad (5.1)$$

Em Q_g é a potência reativa do gerador de indução e que é responsável por gerar a tensão (V). O valor V é 220 para Δ e 380 para operação GI configurada em Y. Depois das simplificações, o CMIN dos quatro acima mencionados. As configurações GI são dadas por:

$$\Delta C_{MIN} - \Delta GI = \frac{1741}{3 * 220^2 * 2 * \pi * 60} = 31,80 \mu F/ph$$

$$Y C_{MIN} - \Delta GI = 3 * (\Delta C_{MIN} - \Delta GI) = 95,41 \mu F/ph$$

$$\Delta C_{MIN} - Y GI = \frac{1741}{3 * 380^2 * 2 * \pi * 60} = 10,66 \mu F/ph$$

$$Y C_{MIN} - Y GI = 3 * (\Delta C_{MIN} - Y GI) = 31,98 \mu F/ph$$

Tabela 5.1 - Seleção do capacitor de Excitação Mínima

Configuração	YC	Δ C
YGI	31,80 μ F/ph	10,66 μ F/ph
Δ GI	95,41 μ F/ph	31,98 μ F/ph

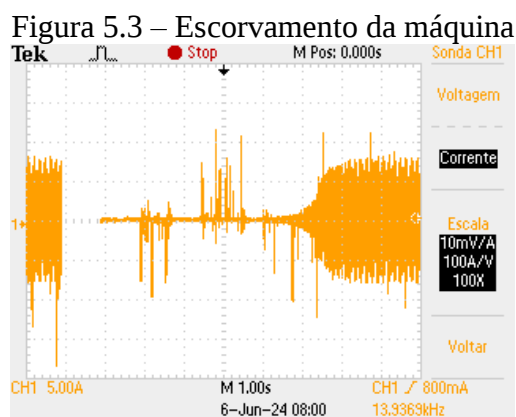
Fonte: Próprio Autor (2024).

Com esse teste e possível confirmar a faixa de valores de capacitância que podem ser usados para auto excitar a máquina. Observando a Tabela 5.1 note que para valores de capacitância inferior a 95,41 μ f a máquina não é excitada.

5.3 ANÁLISE E COMPORTAMENTO DO ESCORVAMENTO

O escorvamento é o transitório que ocorre no gerador, desde a tensão inicial com o pré-carregamento do capacitor, até o ponto de operação estável, onde se estabelece o regime permanente de tensão (BERNADELI, 2013, p.61).

A Figura 5.3 mostra a corrente no banco de capacitores no escorvamento inicial do gerador é realizado um teste a vazio. Essa corrente assume valores pequenos antes da geração, após o momento de magnetização da máquina a corrente começa a crescer até assumir valores de regime permanente.



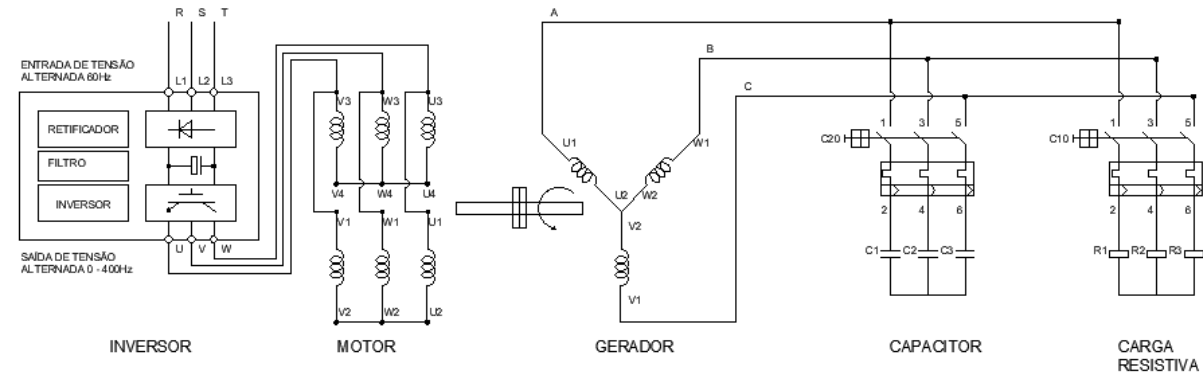
Fonte: Próprio Autor (2024).

5.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO PARA CARGA RESISTIVA E CAPACITÂNCIA FIXA E VELOCIDADE VARIÁVEL

Nesta seção, o fenômeno de autoexcitação no gerador é verificado experimentalmente para as configurações Y e Δ . Com o objetivo de analisar a influência da velocidade no funcionamento da máquina foi realizado um ensaio com uma carga de 160Ω e variou-se a velocidade de rotação do rotor, para estas análises observou os seguintes fechamentos.

5.4.1 Gerador em estrela, Capacitor em estrela e Carga resistiva em estrela e delta

Figura 5.4 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em estrela, capacitor em estrela e carga resistiva em estrela



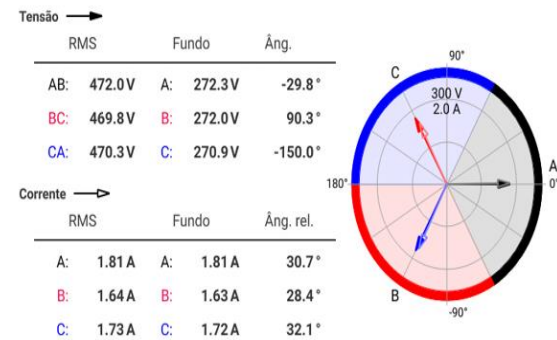
Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.2 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	f r(Hz)	Var (V)	Vbr (V)	Vcr (V)	Iar (A)	Ibr (A)	Icr (A)	Par (kW)	Pbr (kW)	Pcr (kW)
1800	59,99	448,7	446,5	447,1	1,67	1,57	1,86	0,44	0,43	0,38
1830	60,97	461,3	459,1	459,6	1,77	1,6	1,71	0,47	0,43	0,44
1860	61,83	472	469,8	470,4	1,81	1,64	1,72	0,49	0,45	0,46

Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.5 - Vetor de tensão e corrente para o item apresentado 5.4.1.



Fonte: Próprio Autor (2024).

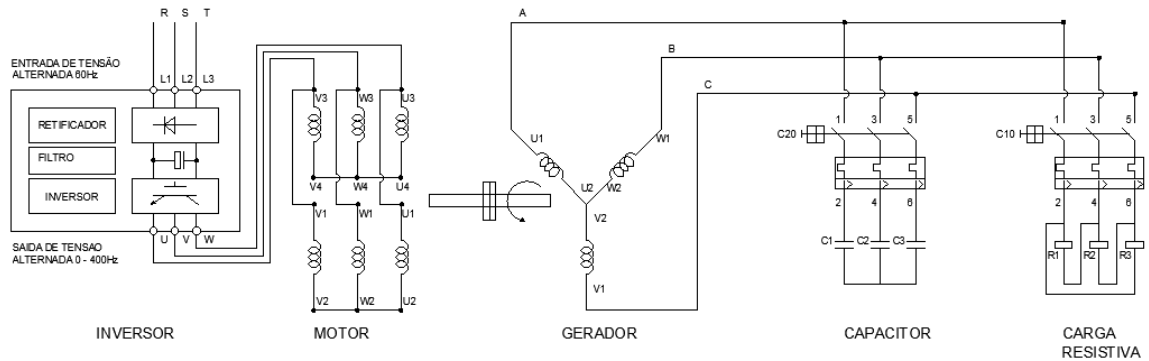
Figura 5.6 - Potência entregue a carga para o item apresentado 5.4.1.

AB	BC	CA
$\overline{\uparrow}$ 472.1v	$\overline{\uparrow}$ 469.8v	$\overline{\uparrow}$ 470.5v
$\bullet \leftarrow$ 1.81A	$\bullet \leftarrow$ 1.64A	$\bullet \leftarrow$ 1.73A
0.49kW	0.45kW	0.46kW

Fluxo de corrente	Frequência real	Tensão nominal	Frequência nominal
$\bullet \leftarrow$ Carga $\bullet \rightarrow$ Gerador	61.832Hz	380v	60Hz

Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.7 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em estrela, capacitor em estrela e carga resistiva em delta



Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.3 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	fr (Hz)	Var (V)	Vbr (V)	Vcr (V)	Iar (A)	Ibr (A)	Icr (A)	Par (kW)	Pbr (kW)	Pcr (kW)
1800	58,88	344,2	344,4	344,3	3,69	3,68	3,64	0,73	0,73	0,73
1830	59,81	359,4	359,5	359,4	3,87	3,87	3,58	0,81	0,78	0,78
1860	60,72	373,1	373,2	373	3,96	4,02	3,89	0,85	0,85	0,87

Fonte: Próprio Autor (2024).

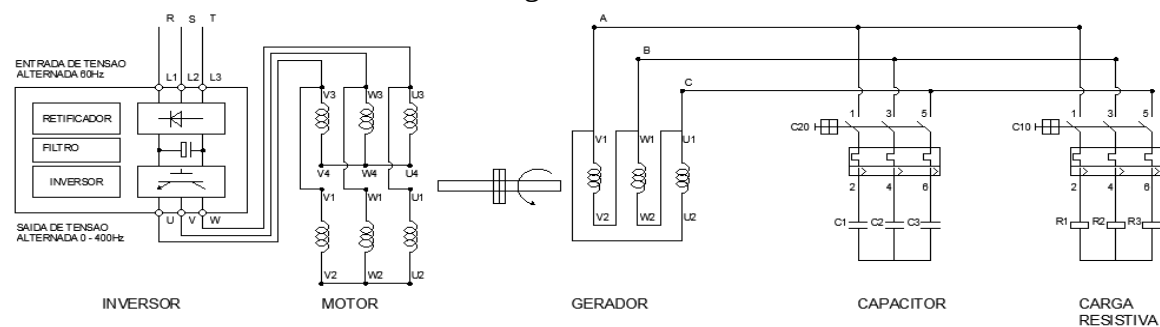
De acordo com os cálculos de capacitância mínima é necessário um banco de capacitores Y_{Cmin} de pelo menos $31,80\mu f/ph$ é selecionado para gerar a tensão de linha 380V a 60hz. Portanto para esta simulação o capacitor utilizado no laboratório é de $40\mu f/ph$. Note que a natureza da carga influencia na tensão gerada, tendo uma tensão máxima de 472Volts na fase “A”, e uma corrente mínima de 1,64A na fase “B”, e uma potência mínima de 0,46kW, comparando os resultados da Tabela 5.2 e Tabela 5.3.

5.4.2 Gerador em estrela, Capacitor em delta e Carga resistiva em estrela e delta

Não foi possível fazer os testes pois o capacitor tem uma capacitância muito mais elevado do que o mínimo exigido e causando uma sobretensão nos aparelhos de medições, colocando em risco os mesmos.

5.4.3 Gerador em delta, Capacitor em estrela e Carga resistiva em estrela e delta

Figura 5.8 - Diagrama funcional dos experimentos estudos do gerador em delta, capacitor em estrela e carga resistiva em estrela



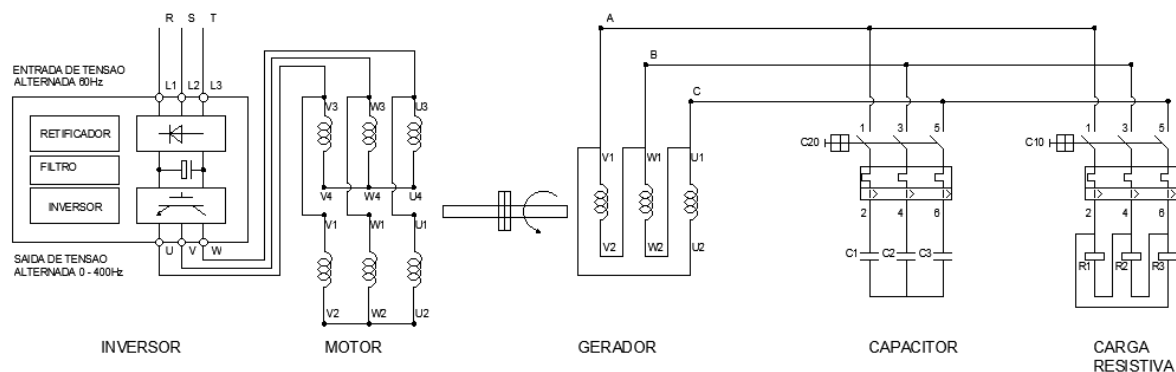
Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.4 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	fr (Hz)	Var (V)	Vbr (V)	Vcr (V)	Iar (A)	Ibr (A)	Icr (A)	Par (kW)	Pbr (kW)	Pcr (kW)
1800	60,97	2,8	2,8	2,8	0,08	0,16	0,33	0	0	0
1830	61,98	3	2,9	2,9	0,08	0,16	0,33	0	0	0
1860	62,9	3,1	3,1	3,1	0,08	0,16	0,33	0	0	0

Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.9 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em delta, capacitor em estrela e carga resistiva em delta



Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.5 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

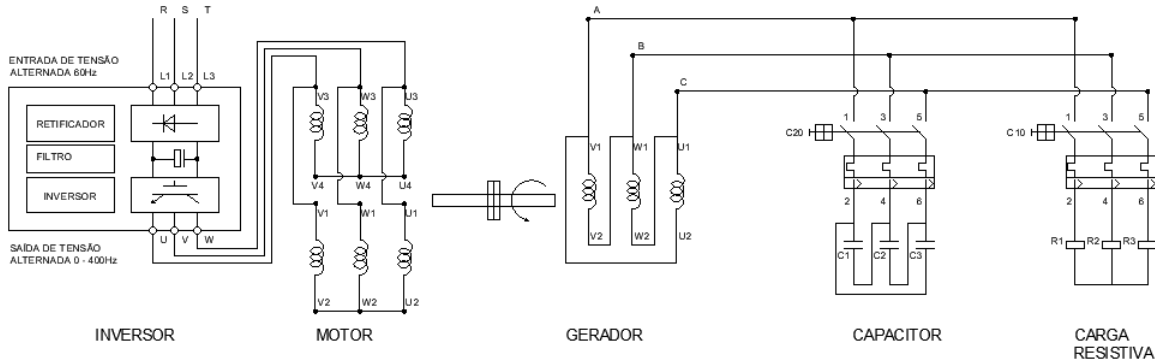
Máquina primária (RPM)	fr (Hz)	Var (V)	Vbr (V)	Vcr (V)	Iar (A)	Ibr (A)	Icr (A)	Par (kW)	Pbr (kW)	Pcr (kW)
1800	60,97	1,8	1,7	1,7	0,08	0,16	0,32	0	0	0
1830	61,98	1,8	1,8	1,7	0,08	0,16	0,32	0	0	0
1860	62,97	1,8	1,8	1,8	0,08	0,16	0,32	0	0	0

Fonte: Próprio Autor (2024).

Para geração de energia o seguinte fechamento, o capacitor utilizado não atende a capacitância mínima que é de 95,41 μ f/ph. Portanto a energia capturada pelo aparelho analisador de energia, são a energia residual do entreferro.

5.4.4 Gerador em delta, Capacitor em delta e Carga resistiva em estrela e delta

Figura 5.10 - Diagrama funcional dos experimentos estudos do gerador em delta, capacitor em delta e carga resistiva em estrela



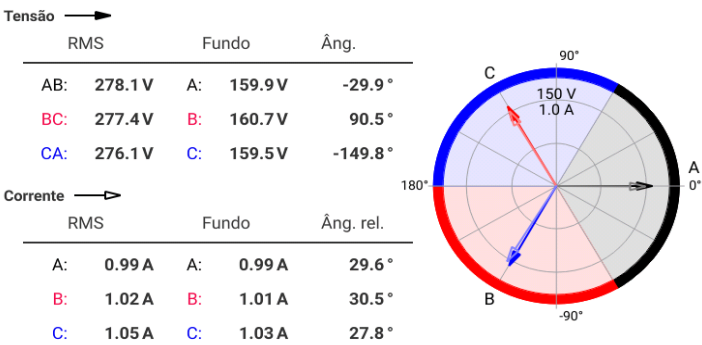
Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.6 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	fr (Hz)	Var (V)	Vbr (V)	Vcr (V)	Iar (A)	Ibr (A)	Icr (A)	Par (kW)	Pbr (kW)	Pcr (kW)
1800	59,52	263,6	263	261,7	0,96	0,87	1,11	0,15	0,13	0,16
1830	60,48	270,8	270,1	268,8	0,94	1	1,15	0,15	0,16	0,17
1860	61,46	278,2	277,4	276,1	1	1	1,03	0,16	0,16	0,16

Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.11 - Vetor de tensão e corrente para o item apresentado 5.4.4



Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.12 - Potência entregue a carga para o item apresentado 5.4.4

AB	BC	CA
↓ 278.2v	↓ 277.4v	↓ 276.1v
•← 1.00A	•← 1.00A	•← 1.03A
0.16kW	0.16kW	0.16kW

Fluxo de corrente
•← Carga
•→ Gerador

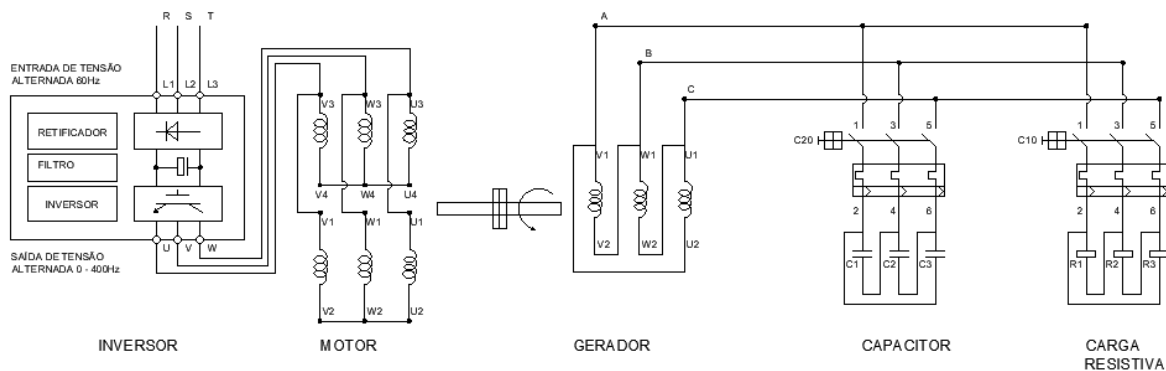
Freqüência real
61.469Hz

Tensão nominal
380v

Freqüência nominal
60Hz

Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.13 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em delta, capacitor em delta e carga resistiva em delta



Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.7 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	fr (Hz)	Var (V)	Vbr (V)	Vcr (V)	Iar (A)	Ibr (A)	Icr (A)	Par (kW)	Pbr (kW)	Pcr (kW)
1800	60,06	255,6	255,2	254,8	2,71	2,64	2,5	0,2	0,39	0,23
1830	61,03	262,4	262,1	261,7	2,8	2,79	2,81	0,21	0,43	0,2
1860	61,98	269,4	268,9	268,6	2,87	2,86	2,88	0,22	0,44	0,21

Fonte: Próprio Autor (2024).

O banco de capacitores mínimos ΔC_{min} é de 31,98 μ f/ph é selecionado para gerar a tensão de fase 220V a 60hz. Portanto para esta simulação é utilizado um capacitor de 40 μ f/ph. Note que de acordo com a natureza da carga tenho uma tensão de saída máxima de 278,2V na fase “A”, com valores de tensão muitos próximos com o segundo teste, cuja a tensão máxima

de acordo com a Tabela 5.7, foi de 269,4V na fase “A”. E também com valores próximos de potência gerada.

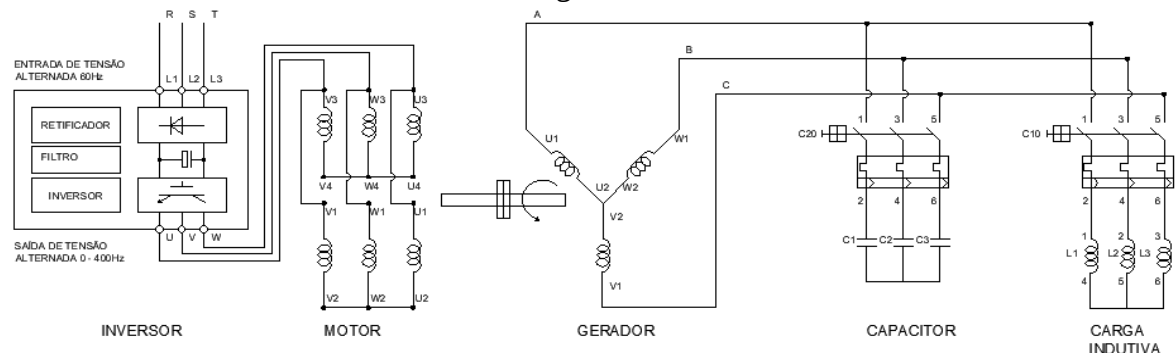
Por outro lado, a corrente comparando as simulações caiu pela metade na Tabela 5.6, chegando a um valor máximo 1,03A.

5.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO PARA CARGA INDUTIVA E CAPACITÂNCIA FIXA E VELOCIDADE VARIÁVEL

O principal problema com um gerador de indução é a variação significativa de sua tensão em resposta a mudanças na carga, especialmente cargas reativas. Em particular, quando há carga indutiva, a tensão colapsa rapidamente. Isso ocorre porque os capacitores fixos devem fornecer toda a potência reativa necessária tanto para a carga quanto para o gerador. Qualquer potência reativa desviada para a carga desloca o gerador ao longo de sua curva de magnetização, resultando em uma grande queda na tensão do gerador.

5.5.1 Gerador em estrela, Capacitor em estrela e Carga indutiva em estrela e delta

Figura 5.14 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em estrela, capacitor em estrela e carga indutiva em estrela

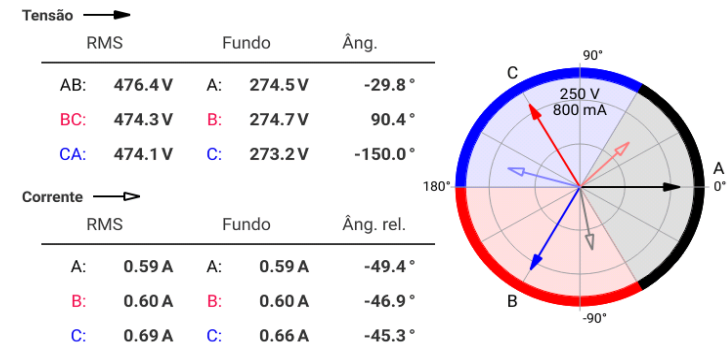


Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.8 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio										
Máquina primária (RPM)	fi (Hz)	Vai (V)	Vbi (V)	Vci (V)	Iai (A)	Ibi (A)	Ici (A)	Pai (kW)	Pbi (kW)	Pci (kW)
1800	59,78	449,8	447,7	447,4	0,53	0,54	0,82	0,02	0,05	0,04
1830	60,75	463	460,9	460,7	0,58	0,56	0,72	0,02	0,04	0,05
1860	61,74	476,7	474,4	474,3	0,59	0,6	0,7	0,03	0,04	0,04

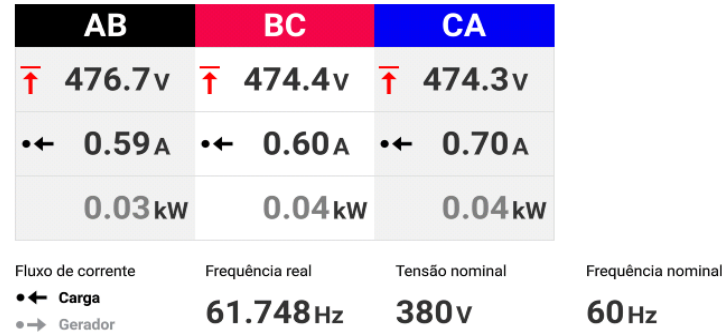
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.15 - Vetor de tensão e corrente para o item apresentado 5.5.1.



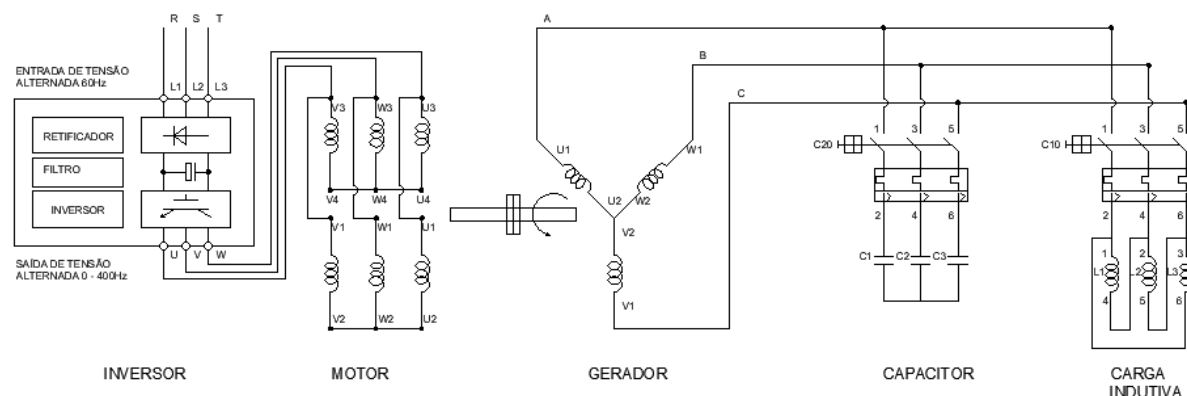
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.16 - Potência entregue a carga para o item apresentado 5.5.1



Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.17 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em estrela, capacitor em estrela e carga indutiva em delta



Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.9 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	fi (Hz)	Vai (V)	Vbi (V)	Vci (V)	Iai (A)	Ibi (A)	Ici (A)	Pai (kW)	Pbi (kW)	Pci (kW)
1800	60,76	302,8	303,1	302,7	1,35	1,4	1,4	0,05	0,04	0,05
1830	61,75	316,9	317,2	316,7	1,49	1,49	1,49	0,06	0,05	0,06
1860	62,73	331,1	331,5	330,9	1,61	1,63	1,66	0,06	0,06	0,07

Fonte: Próprio Autor (2024).

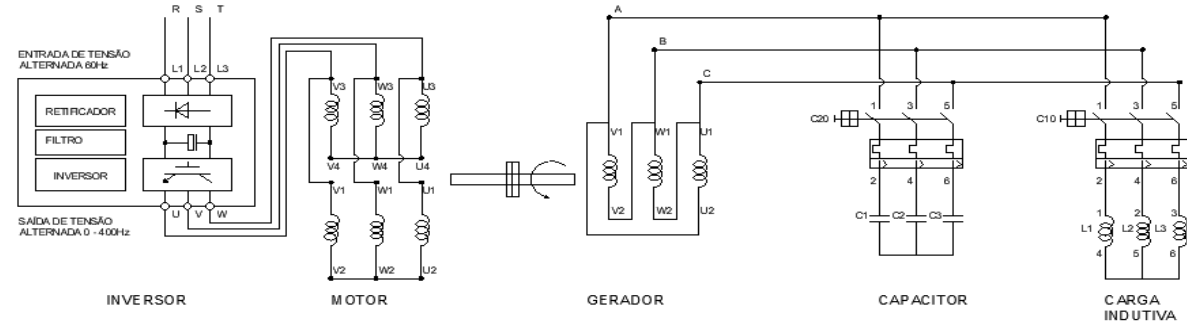
O banco de capacitores YCmin é de 31,80 μ f/ph é selecionado para gerar a tensão de fase 380V a 60hz. Portanto para esta simulação o capacitor utilizado é de 40 μ f/ph, a carga indutiva trata-se de um motor 0,25cv. Note que a tensão máxima gerada foi de 476,7Volts na fase “A”, conforme a Tabela 5.8, com corrente de máxima 0,7A na Fase “C” e potência de 40W na Fase “B”.

5.5.2 Gerador em estrela, Capacitor em delta e Carga indutiva em estrela ou delta

Não foi possível fazer os testes pois o capacitor tem uma capacitância muito mais elevado do que o mínimo exigido e causando uma sobretensão nos aparelhos de medições, colocando em risco os mesmos.

5.5.3 Gerador em delta, Capacitor em estrela e Carga indutiva em estrela e delta

Figura 5.18 - Diagrama funcional dos experimentos estudos do gerador em delta, capacitor em estrela e carga indutiva em estrela



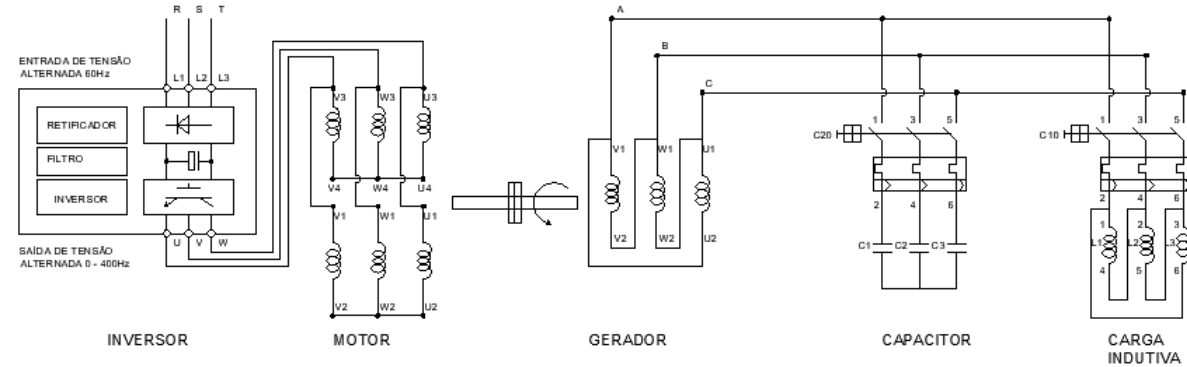
Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.10 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	f_i (Hz)	V_{ai} (V)	V_{bi} (V)	V_{ci} (V)	I_{ai} (A)	I_{bi} (A)	I_{ci} (A)	P_{ai} (kW)	P_{bi} (kW)	P_{ci} (kW)
1800	60,97	2,8	2,8	2,8	0,09	0,14	0,33	0	0	0
1830	61,98	3	3	2,9	0,09	0,14	0,33	0	0	0
1860	62,97	3,1	3,1	3,1	0,09	0,14	0,33	0	0	0

Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.19 - Diagrama funcional dos experimentos estudos do gerador em delta, capacitor em estrela e carga indutiva em delta



Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.11 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

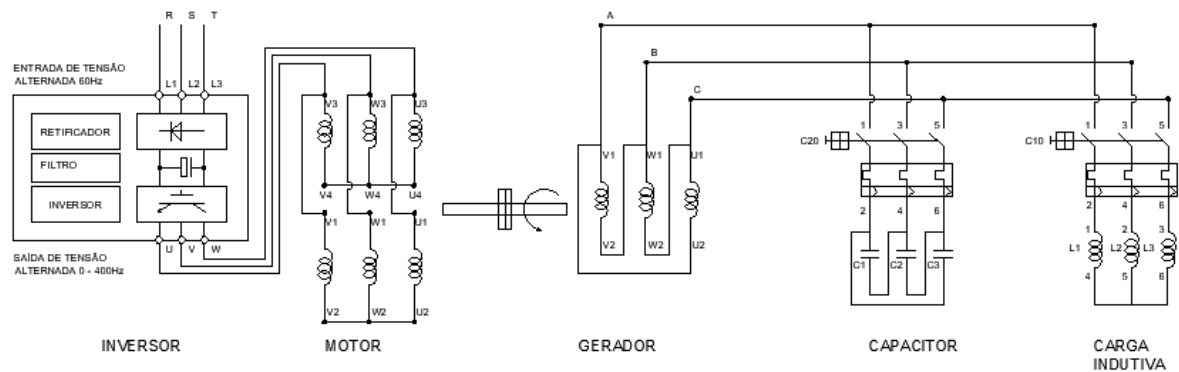
Máquina primária (RPM)	f_i (Hz)	V_{ai} (V)	V_{bi} (V)	V_{ci} (V)	I_{ai} (A)	I_{bi} (A)	I_{ci} (A)	P_{ai} (kW)	P_{bi} (kW)	P_{ci} (kW)
1800	60,97	1,8	1,8	1,8	0,1	0,14	0,34	0	0	0
1830	61,98	1,9	1,9	1,9	0,09	0,14	1,9	0	0	0
1860	62,97	2	2	1,9	0,09	0,14	0,34	0	0	0

Fonte: Próprio Autor (2024).

Note que para os seguintes fechamentos de acordo com a Tabela 5.10 e Tabela 5.11 o gerador não foi capaz de escorvar e gerar energia.

5.5.4 Gerador em delta, Capacitor em delta e Carga indutiva em estrela e delta

Figura 5.20 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em delta, capacitor em delta e carga indutiva em estrela e delta



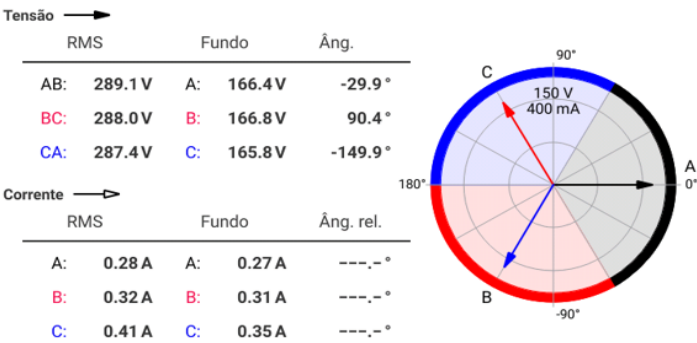
Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.12 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	f_i (Hz)	V_{ai} (V)	V_{bi} (V)	V_{ci} (V)	I_{ai} (A)	I_{bi} (A)	I_{ci} (A)	P_{ai} (kW)	P_{bi} (kW)	P_{ci} (kW)
1800	60,73	273,9	273	272,3	0,29	0,3	0,37	0,01	0	0,02
1830	61,72	281,5	280,6	279,8	0,28	0,31	0,38	0,01	0,01	0,01
1860	62,69	289,1	288,1	287,4	0,28	0,31	0,42	0,01	0,01	0,02

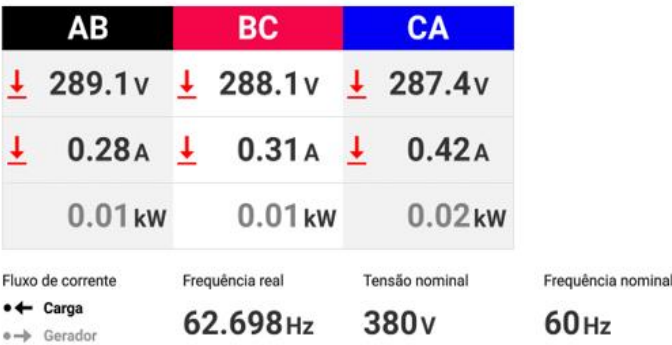
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5.21 - Vetor de tensão e corrente para o item apresentado 5.5.4



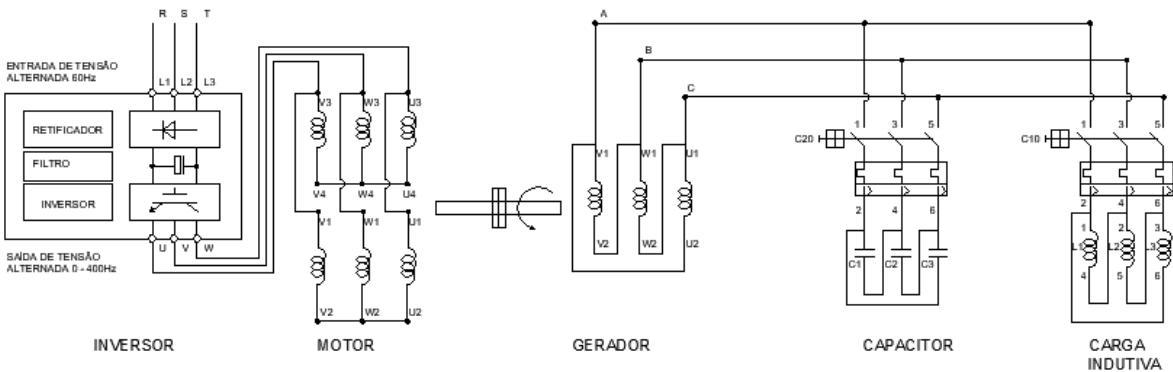
Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.22 - Potência entregue a carga para o item apresentado 5.5.4



Fonte: Próprio Autor (2024).

Figura 5.23 - Diagrama funcional dos experimentos estudados do gerador em delta, capacitor em delta e carga indutiva em delta



Fonte: Próprio Autor (2024).

Tabela 5.13 - Valores de frequência, tensão e corrente de linha medidos durante o ensaio

Máquina primária (RPM)	f_i (Hz)	V_{ai} (V)	V_{bi} (V)	V_{ci} (V)	I_{ai} (A)	I_{bi} (A)	I_{ci} (A)	P_{ai} (kW)	P_{bi} (kW)	P_{ci} (kW)
1800	60,76	264,3	263,7	262,7	0,94	1	1,15	0,13	0,02	0,11
1830	61,75	271,8	271,1	270,4	0,98	1	1,07	0,14	0,02	0,12
1860	62,73	279,5	278,7	278	1,01	1,05	1,14	0,15	0,03	0,13

Fonte: Próprio Autor (2024).

Note que a tensão máxima gerada foi de 289,1Volts na fase “A”, conforme a Tabela 5.12. com corrente máxima 0,41A na Fase “C”, e potência máxima de 20W na Fase “C”. Além disto o esquema de ligação da carga influenciou bastante na potência gerada comparando com a Tabela 5.13

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que os resultados obtidos nesse trabalho, estão correspondendo a um desempenho desejável, apesar da má regulação de tensão do gerador que pode ser melhorada utilizando-se estratégias de controle adequado.

As tabelas mostram que os valores de frequência, tensão, corrente e potência medidos no ensaio para uma capacitância de $40\mu\text{F}$. A partir das simulações foi possível observar o fluxo de potência ativa do sistema, verificando em diferentes velocidades, portanto a tensão gerada depende da velocidade em que é acionada. Quanto maior a velocidade maior a tensão gerada, até chegar ao limite de saturação onde não se impões mais fluxo na máquina.

Na operação é possível observar que a tensão gerada também depende do valor da carga que é conectada em seus terminais, podendo até causar colapso do gerador e fazendo com que ele não seja capaz de gerar energia ou escorvar.

A autoexcitação do gerador de indução é alcançada selecionando um banco de capacitores com um valor específico de capacitância. De acordo com este estudo ajuda na seleção e modo de conexão do capacitor para a operação bem sucedida, portanto existe uma grande dependência do valor da capacitância tanto para excitação do gerador quanto para a redução de oscilação de tensão nos terminais, esse valor deve ser suficiente para atender esses dois parâmetros. Portanto o gerador de indução operando de forma isolada tem a necessidade de fazer o chaveamento de capacitores em velocidades variáveis, para manter a tensão terminal em níveis adequados.

Portanto todas as possíveis combinações de métodos e configurações de autoexcitação do gerador de indução são analisados para pequenas escalas acionadas por velocidade constante aplicações isoladas micro/pico geração eólica isoladas, espera-se que este trabalho seja apenas o começo de uma série de trabalhos futuros que visem novas propostas de melhorias para o sistema já implementado.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme apresentado anteriormente, os temas que podem ser abordados para dar continuidade ao trabalho desenvolvido até o momento, realizado estratégias de controle da regulação de tensão do gerador:

- No trabalho foi considerado diferentes velocidades na turbina do gerador. Recomenda-se fazer a análise de cenários utilizando estratégias de controles de capacitância como por exemplo a regulação por capacitores chaveados, capaz de manter o núcleo magnético do gerador em sincronismo alimentar cargas diversas de grande porte ou velocidades variadas na turbina.
- Elaborar a análise de controle, mas com a penetração de outros tipos de gerações, como por exemplo a solar. Uma boa opção é a regulação por inversor de frequência utilizando controlador de carga e bateria, já que este além de manter a tensão no nível desejado, controla a rotação e mantém o grupo no ponto de melhor rendimento, já que o gerador de indução não enxerga a variação na carga, e fazer um estudo corporativo com os resultados das simulações deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABEEOLICA. **Energia eólica os bons ventos do brasil:** Com mais de 1.500 GW de potencial em eólicas onshore e offshore e ocupando o sexto lugar no Ranking Global de Capacidade Instalada onshore, a indústria eólica brasileira tem o papel crucial de ajudar a enfrentar a emergência climática.. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

AIRSWIFT. **Energia eólica no Brasil bate recordes e gera empregos.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.airswift.com/pt/blog/wind-energy-brazil/>. Acesso em: 21.set. 2023.

ALEMDAENERGIA. **Energia eólica no país tem potencial praticamente inesgotável:** Estudos do setor de energia apontam que energia eólica pode ser mais de quatro vezes maior do que todas as outras fontes instaladas. [S. l.], 21 jan. 2020. Disponível em: <https://www.alemda-energia.engie.com.br/energia-eolica-no-pais-tem-potencial-infinito/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ARCHIEXPO, **Turbina eólica de pequeno porte de eixo vertical WS-4 RANGE.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.archiexpo.com/pt/prod/windside/product-88530-959470.html>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ARIZONAGRUPPO. **Você sabe como é feito o transporte de pás eólicas?.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://arizonagrupo.com.br/voce-sabe-como-e-feito-o-transporte-de-pas-eolicas/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BASSET, E. D.; POTTER, F. M; **Capacitive Excitation of Induction Generators.** *Transactions*AIEE; Vol. 54; pp. 540 . 545; 1935.

BERNADELI, V. R. **Estudo Sobre o Comportamento do Gerador a Relutância Variável Opernado no Modo Autoexcitado.** 2014. 138 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica.

HOMRICH, Guilherme. **Regulação de tensão em Geradores de Indução**. 2013. 124 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica.

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamentos**: Elsevier, 2009.

BRASILESCOLA. **Energia eólica**: Energia eólica é a eletricidade gerada pela força do vento. Ela responde por 8,6% da energia produzida no Brasil, ganhando cada vez mais espaço na matriz elétrica do país..[S. l.], 2023. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/energia-eolica.htm>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BRENNEN, M. B.; ABBONDANT, A.; **Static Exciters for Induction Generators**. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. IA-13, no. 5, pp 422 . 428, September, 1977.

CALDAS, F. P.; **Um Estudo do Gerador de Indução Auto-excitado e Aplicações**. Dissertação de Mestrado; UFRJ; Rio de Janeiro; Agosto; 1987.

CEPEL, Eletrobrás. **Atlas do potencial eólico brasileiro**: Simulações 2013. [S. l.], 2017. Disponível em: https://www.observatoriodocarvao.org.br/wp-content/uploads/2020/01/Novo-Atlas-do-Potencial-Eolico-Brasileiro-SIM_2013.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.

CHAPALLAZ, J.M. et al. **Manual On Induction Motors Used As Generators**. Braunschweig: Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologien-Gate, 1992. (Mhpg series harnessing water power on a small scale; v.10).

CHAPMAN, S.J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5nd ed. Boston: McGrawHill, 1991.

CHAPMAN, Stephen, J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.L.], 2023. Disponível em: <https://www.drb-m.org/av1/Fundamentos%20de%20Maquinas%20Eletricas.pdf/>. Acesso em: 21.set. 2023.

CHEN Z.; GUERRERO, J. M. B. F. **A review of the state of the art of power electronics for wind turbines**. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 8, p. 1859–1875., 2009.

CHUNHA, L, R, M. **Desenvolvimento de plataforma experimental para o estudo do desempenho dinâmico da máquina assíncrona operando em velocidade variável para aplicação em tração elétrica.** [S.L], 2023. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1237/1/tcc_Leonardo%20Rodrigues%20Mendes%20da%20Cunha.pdf/. Acesso em: 21.set. 2023.

CIMENTOITAMBE. **Torres eólicas com concreto protendido:** saiba as vantagens: Estruturas permitem gerar mais energia, têm custo menor de construção e a manutenção é mais barata. [S. l.], 26 jul. 2021. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinza/torres-eolicas-com-concreto-protendido-saiba-as-vantagens/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

DEL TORO, VINCENT. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** [S. l.]: Ltc gen, 1994.

DUARTE, Lucas. **Transpes realiza o transporte da maior pá eólica já fabricada no Brasil.** [S. l.], 10 mar. 2020. Disponível em: <https://www.caminhoes-e-carretas.com/2020/03/transpes-realiza-o-transporte-da-maior.html>. Acesso em: 13 abr. 2023.

ELETRICAL4U. **Sem teste de carga do motor de indução.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.electrical4u.com/no-load-test-of-induction-motor/>. Acesso em 21.set. 2023.

ELETRICAL4U. **Teste de rotor bloqueado do motor de indução.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.electrical4u.com/blocked-rotor-test-of-induction-motor/>. Acesso em 21.set. 2023.

ENELGREENPOWER. **Hélice eólica:** Moinhos de vento do terceiro milênio: é assim que as turbinas eólicas conseguem produzir eletricidade explorando as correntes de ar.. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-eolica/helice-eolica>. Acesso em: 10 abr. 2023.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 10 abr. 2023.

GOV. **Energia eólica registra primeiro recorde de geração instantânea de 2022:** O total produzido corresponde ao suficiente para atender todo o Nordeste durante um minuto. [S. l.], 2 ago. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/08/energia-eolica-registra-primeiro-recorde-de-geracao-instantanea-de-2022#:~:text=Os%20estados%20brasileiros%20que%20mais,essa%20fonte%20no%20per%C3%ADodo%20citado>. Acesso em: 10 abr. 2023.

HOGUANE, César António. **Revista Brasileira de Energias Renováveis: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DAS PÁS NA POTÊNCIA E EFICIÊNCIA MECÂNICAS DE UMA TURBINA EÓLICA HÍBRIDA DE EIXO VERTICAL DO TIPO SAVONIUS-DARRIEUS.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/56166>. Acesso em: 10 abr. 2023.

HOMRICH, Guilherme. **Regulação de tensão em Geradores de Indução.** 2013. 124 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica.

IBERDROLA. **Sabe como os parques eólicos offshore funcionam?:** A energia eólica offshore é a fonte de energia limpa e renovável que se obtém aproveitando a força do vento que sopra em alto-mar, onde este alcança uma velocidade maior e mais constante, devido à inexistência de barreiras. Para explorar ao máximo esse recurso, são desenvolvidas megaestruturas assentadas sobre o leito marinho e dotadas das últimas inovações técnicas. Descubra como são e como funcionam esses autênticos colossos do mar.. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>. Acesso em: 10 abr. 2023.

KHAMIS, A. A. H. et al. Zaid, S. A. **Computer Simulation of a Series-Connected Induction Generator and Determination of Minimum Required Capacitance for Self-Excitation for Wind Enrgy Applications.** IEEE, p. 1-6, 2020.

KHUSHILD, S. S. et al. Sirojiddin. R. C. et al. Firdavs, O. I. **Three-phase Self-excited Induction Generator for Windmills Analytical Techniques and Experimental Results**. IEEE, p. 1-6, 2020.

KRISHNA, B. M. V. et al. Sandeep, V. **Experimental Study on Different Modes of Self Excited Induction Generator Operation**. IEEE. p. 1-2, 2020.

LAHCENE OUAZENE, George McPherson, **Analysis of the isolated induction generator**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, August 1983.

MACHADO, Nayara. **Eólica offshore mais cara no Brasil, hidrogênio no Ceará e 27 novas plantas de biometano**: Realização de leilões de energia específicos para eólicas offshore é um dos principais pleitos das companhias interessadas em projetos do tipo no Brasil. [S. l.], 20 jun. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/eolica-offshore-mais-cara-no-brasil-hidrogenio-no-ceara-e-27-novas-plantas-de-biometano/>. Acesso em: 7 abr. 2023.

MARRA E.G. & POMILIO J.A, **Sistemas de geração baseados em gerador de indução operando com tensão regulada e frequência constante** - SBA Controle & Automação Vol. 11 no. 01 / Jan., Fev., Mar, Abril de 2000.

MARTINS, G. S. **Técnicas de controle de potências ativa e reativa utilizando gerador de indução gaiola de esquilo aplicado a um sistema de geração eólica**. 2018. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MARTINS, Leonardo, Estevo. **Estruturação de procedimentos de ensaio para motores de indução trifásicos**. [S.L], 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/218635/TCC%20Leonardo%20Estevo%20VERSAO%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y/>. Acesso em: 21.set. 2023.

MAXWELL. **Energia Eólica**: Este capítulo visa apresentar uma abordagem geral sobre energia eólica e suas características no Brasil e no mundo.. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19308/19308_3.PDF. Acesso em: 10 abr. 2023.

MEDEIROS, D.M. **A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica.** Tese de Mestrado - Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia da Energia.

MEDEIROS, Valdemar. **Ceára é o líder de energia eólica com mais de 86 parques eólicos e 2187,9MW.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/ceara-e-o-estado-lider-de-energia-eolica-com-mais-de-86-parques-eolicos-e-2-1879-mw/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

MZ, **Usinas Eólicas (UE's).** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.mzsolutions.com.br/team-1>. Acesso em: 10 abr. 2023.

NASCIMENTO, S. C. **Proposta para Implantação de Microcentrais de Geração a Gás com Utilização de Geradores de Indução.** Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

NEOENERGIA. **Você sabe como funciona um aerogerador?.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ONS. **Capacidade instalada de geração.** [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx. Acesso em: 10 abr. 2023.

PORTILLO, Germán. **Aerogenerador vertical.** [S. l.], 14 jun. 2021. Disponível em: <https://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

SANTOS, Marcílio Marques. **Geração de energia eólica conectada à rede elétrica a partir de gerador de indução em gaiola de esquilo.** [S.L], 2018. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/47722/1/2018_tcc_ammsantos.pdf/. Acesso em: 21.set. 2023.

SILVEIRA, Evanildo. **O pouco conhecido impacto negativo da energia eólica no Nordeste.** BBC News Brasil, 6 out. 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-49858734>. Acesso em: 10 abr. 2023.

STROSKI, Pedro Ney. **Turbinas Gorlov:** Neste post é explicado o funcionamento e as aplicações da turbina Gorlov. É uma modificação da turbina Darrieus e usada em energias eólica e hidrelétrica. O botão a seguir acessa o post sobre a turbina Darrieus.. [S. l.], 26 mar. 2019. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2019/03/26/turbinas-gorlov/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

SUÇUARANA, Monik da Silveira. **Energia eólica.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.infoescola.com/tecnologia/energia-eolica/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

WAGNER, C. F. **Self Excitation of Induction Motors.** Vol. 58.. AIEE Transactions on Electrical Engineering, February 1939. P. 47-51.

WINDBOX. **Componentes dos aerogeradores: conheça toda a sua estrutura:** Aqui estamos em mais um conteúdo que tirará todas as suas dúvidas sobre os componentes dos aerogeradores e de quebra ainda falará um pouco sobre como se deu o desenvolvimento deles no decorrer do tempo. [S. l.], 3 jan. 2020. Disponível em: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>. Acesso em: 10 abr. 2023.