

RAMON RAMOS GONÇALVES PASSOS

Geradores de indução: motores de indução trifásico operando como geradores em paralelo com a rede elétrica em usinas eólicas

Ramon Ramos Gonçalves Passos

Geradores de indução: motores de indução trifásico operando como geradores em paralelo com a rede elétrica em usinas eólicas

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luiz Octávio Mattos dos Reis

P289g	Passos, Ramon Ramos Gonçalves Geradores de indução: motores de indução trifásico operando como geradores em paralelo com a rede elétrica em usinas eólicas / Ramon Ramos Gonçalves Passos – Guaratinguetá, 2019. 92 f : il. Bibliografia: f. 89-90 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo Mesquita 1. Motores elétricos de indução. 2. Máquinas elétricas de indução. 3. Turbinas eólicas. I. Título. CDU 621.313.333
-------	---

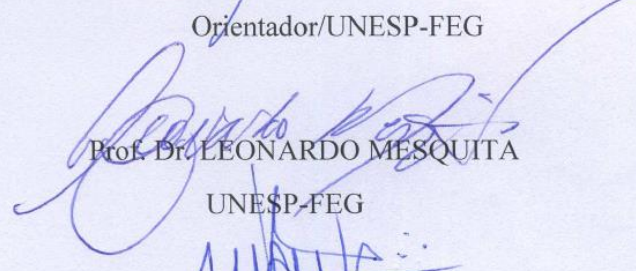
RAMON RAMOS GONÇALVES PASSOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP-FEG


Prof. Esp. JOSÉ MARCELO DE ASSIS WENDLING JR.
Examinador Externo

OUTUBRO/2019

DADOS CURRICULARES

RAMON RAMOS GONÇALVES PASSOS

NASCIMENTO	13.01.1993 – Bragança Paulista / SP
FILIAÇÃO	Rogério José Passos Márcia Aparecida Ramos Gonçalves Passos
2008/2010	Ensino Médio Colégio Atibaia
2011/2018	Bacharel em Engenharia Elétrica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

dedico este trabalho

de modo especial, à minha primeira família meus amados pais Rogério e Márcia, irmãos Rafael e Gustavo, minha cunhada Denise e minha adorável sobrinha Sofia, pessoas que são meus pilares neste mundo.

E um agradecimento especial à minha segunda família, República Papagatas onde aprendi e convivi com pessoas extraordinárias.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Rogério e Márcia*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Aos Irmãos Papagateanos, com os aprendizados que obtive nessa república minha vida ganhou muito mais sentido e valores.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Os homens tropeçam por vezes na verdade,
mas a maior parte torna a levantar-se e
continua depressa o seu caminho, como se
nada tivesse acontecido”

Winston Churchill

RESUMO

Considerando o cenário atual da geração eólica no Brasil, nas quais os leilões de energia eólica têm derrubado os preços do MWh produzido, premiando projetos competitivos economicamente, sob essa ótica neste trabalho é feito um estudo sobre o motor de indução trifásico operando como gerador. Foi abordado neste trabalho: uma explicação sobre as turbinas eólicas, forças que atuam nas pás e diferenças entre projetos construtivos, e uma explicação profunda sobre máquina de indução elétrica operando como gerador. Para isso a máquina escolhida foi o motor de indução trifásico (MIT) com rotor em gaiola de esquilo, essa máquina apresenta uma construção robusta, exige pouca manutenção e devido a sua produção em larga escala apresenta baixo custo frente aos motores síncronos que além de apresentarem alto custo de aquisição necessitam de manutenções frequentes. O (MIT) com rotor em gaiola de esquilo operando como gerador sofre variações na tensão e corrente conforme a carga que ele está alimentando varia, foram abordados métodos de regulação de tensão que permitem atenuar essa variação de tensão e corrente. Com a finalidade de prever o comportamento desse motor operando como gerador foram realizados ensaios em laboratório para levantamento dos parâmetros do modelo matemático do motor, com os parâmetros do modelo a simulação no MatLab foi realizada resultando em gráficos que demonstram a operação da máquina de indução operando como gerador, através desses gráficos foi possível a elaboração de análises e conclusões.

PALAVRAS-CHAVE: Gerador de indução. Turbina eólica. Gerador interligado à rede. Motor de indução trifásico.

ABSTRACT

Considering the current scenario of wind generation in Brazil, in which wind energy auctions have knocked down the prices of MWh produced, rewarding economically competitive projects, from this perspective, a study is made on the three-phase induction motor operating as a generator. It was covered in this paper: an explanation of wind turbines, forces acting on blades and differences between construction projects, and an in-depth explanation of electric induction machine operating as a generator. For this the machine chosen was the three-phase induction motor (MIT) with squirrel cage rotor, this machine has a robust construction, requires little maintenance and due to its large-scale production has low cost compared to synchronous motors that besides having high cost of purchase require frequent maintenance. The squirrel cage rotor (MIT) operating as a generator suffers variations in voltage and current as the load it is feeding varies. Voltage regulation methods have been approached to attenuate this voltage and current variation. In order to predict the behavior of this motor operating as a generator, laboratory tests were performed to survey the parameters of the motor mathematical model, with the model parameters the simulation in MatLab was performed resulting in graphs that demonstrate the operation of the induction machine operating. As a generator, through these graphs it was possible to elaborate analyzes and conclusions.

KEYWORDS: Induction generator. Wind turbine. Generator connected to the grid. Three phase induction motor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Preço de contratação de empreendimentos eólicos.....	21
Figura 2 -Número de parques eólicos e capacidade instalada por estado em 2019.....	26
Figura 3 - Cilindro de vento fictício	27
Figura 4 - Passagem do Fluxo de Ar pela Turbina Eólica.....	28
Figura 5 - Vetores de velocidades e forças sob uma pá eólica	30
Figura 6 - Turbinas de Eixo Horizontal (pequena potência e alta potência)	32
Figura 7 - Turbinas Eólicas de Eixo Vertical	33
Figura 8 – Partes componentes da máquina de indução	34
Figura 9 -Rotor do tipo alumínio injetado	36
Figura 10 - Rotor em gaiola do tipo em barras.....	36
Figura 11 - Correntes que circulam na fase do estator	37
Figura 12 - Ilustração de um estator com duas ranhuras por fase e um par de pólos.....	37
Figura 13 -Campo magnético rotativo por quatro instantes de tempo de um enrolamento de estator trifásico bipolar	38
Figura 14 - Desenvolvimento do conjugado em um motor de indução; (a) sem carga na ponta do eixo; (b) com carga na ponta do eixo;	40
Figura 15 -Conjugado x Velocidade na máquina de indução.....	41
Figura 16 -Circuito equivalente de motor de indução	42
Figura 17 - Circuito do rotor.....	44
Figura 18 - Circuito do rotor com os efeitos do escorregamento	45
Figura 19 - Circuito equivalente por fase de um motor de indução	46
Figura 20 -Fluxo de potência de uma máquina de indução operando como motor.....	47
Figura 21 - Fluxo de potência na máquina de indução no modo gerador	49
Figura 22 - Diagramas fasoriais: (a) modo motor; (b) modo gerador	50
Figura 23 - Efeito da saturação	51
Figura 24 - Circuito para levantamento da curva de magnetização teórica.....	52
Figura 25 - Circuito equivalente monofásico da máquina de indução	55
Figura 26 - Modelo do MIT após simplificação usando o teorema de Thévenin.....	56
Figura 27 - Gerador de Indução interligado a rede.....	60
Figura 28 - Curva característica do comportamento da tensão em função do aumento de carga em um gerador de indução isolado	63
Figura 29 - Método do capacitor em série	64

Figura 30 - Regulação por chaveamento escalonado de capacitores.....	65
Figura 31 - Resultados da regulação por chaveamento escalonado de capacitores.....	66
Figura 32 - Gráfico Potência ativa x Tempo	66
Figura 33 - Esquemático da regulação por controle de carga dividido em etapas	67
Figura 34 - Comparação da corrente na carga de lastro com variação PWM	68
Figura 35 - Gráfico da variação de tensão no gerador com a carga dos consumidores.....	68
Figura 36 - Interconexão de controle vetorial orientada ao estator	69
Figura 37 - Motor de indução WEG, modelo W22 - IR2, 4 pólos, 0,75kW	70
Figura 38 - Medição da resistência estatórica para conexão delta	74
Figura 39 - Decomposição da corrente em vazio do motor de indução trifásico	77
Figura 40 - Circuito equivalente do ensaio em curto circuito	79
Figura 41 - Circuito equivalente da máquina WEG	83
Figura 42 - Gráfico da simulação para conjugado e potência mecânica	83
Figura 43 - Gráfico da simulação para fator de potência e corrente de fase	84
Figura 44 - Gráfico da simulação da potência ativa e a potência reativa	85
Figura 45 - Gráfico da simulação do rendimento e potência ativa.....	85
Figura 46 - Gráfico da tensão induzida em relação a velocidade.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do ensaio a vazio.....	78
Tabela 2 - Resultados do ensaio a rotor bloqueado	81
Tabela 3 - Resultados dos ensaios a velocidade síncrona	82
Tabela 4 - Medidas de resistência do estator	75
Tabela 5 - Resultados dos cálculos de reatância do circuito equivalente	82
Tabela 6 - Resultados dos cálculos para as resistências do circuito equivalente	82
Tabela 7 - Resultados do ensaio comparado com as simulações	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Características de turbinas de eixo vertical	33
Quadro 2 - Dados de placa do motor utilizado para os ensaios.....	71

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Dados de placa do motor	71
Fotografia 2 - Medidor de grandezas elétricas Yokogawa	72
Fotografia 3 -Tâcometro utilizado	72
Fotografia 4 - Multímetro digital utilizado.....	73
Fotografia 5 - Bancada para os ensaios montada	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternate Current
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
DC	Direct Current
DVR	Dynamic Voltage Restorer
GI	Gerador de Indução
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
LER	Leilão de Energia de Reserva
MIT	Motor de Indução Trifásico
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PWM	Pulse Width Modulation
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

LISTA DE VARIÁVEIS E UNIDADES

A	área varrida pelas pás da turbina (m^2);
a	fator de interferência sobre a velocidade de vento incidente;
a_{ef}	relação de espiras entre o rotor e o estator;
B_r	campo magnético do rotor em (Wb/m^2);
B_{net}	campo magnético resultante em (Wb/m^2);
c	corda a 0.7 do raio das pás (m);
C_p	coeficiente de potência;
C_s	capacitor série [μF /fase].
D	diâmetro do rotor (m);
E'_R	tensão rotor referida ao estator (V);
$E_{1(gerador)}$	tensão do estator no modo gerador (V);
E_1	tensão no estator (V);
E_1	tensão no estator (V);
E_{1eq}	tensão equivalente (V);
E_r	tensão induzida no rotor (V);
E_{r0}	tensão de rotor travado (V);
E_s	tensão do estator entre os pontos a e b (V);
F	força devido a corrente de ar sobre o plano do rotor (N);
f	frequência elétrica, em HZ
F_D	força de arrasto (N);
F_L	força de sustentação (N);
F. P	fator de potência;
f_r	frequência induzida no rotor em (Hz);
f_s	frequência síncrona em (Hz);
I_0	corrente de magnetização (A);
I_{1f}	corrente no estator por fase em (A);
$I_{f(cc)}$	corrente de curto circuito por fase (A);
$I_{2(gerador)}$	corrente no rotor no modo gerador (A)
I_2	corrente do rotor (A);
I_R	corrente no rotor (A);
$I_{o(L)}$	corrente de linha em vazio (A);

K	constante proveniente da construção da máquina, a unidade é [Newton-metro/Ampére];
L_R	indutância do rotor (Ω);
m	quantidade de massa contida no cilindro fictício (kg);
n	número de pás;
n_{fases}	número de fases da máquina;
n_r	velocidade do rotor em (RPM);
n_s	velocidade síncrona em (RPM);
P	número de pólos da máquina
p^+, p^-	pressão no plano do rotor na tomada de ar e na saída de ar respectivamente (atm);
p_1	pressão a montante do rotor ($p_1 = p_2 = p_{atm}$) (atm);
P_0	Perdas em vazio em (W);
P_1	potência elétrica (W);
P_2	é a potência disponível no eixo do motor (W).
$P_{A,V}$	são as perdas por atrito e ventilação (W);
P_{cap}	potência captada pelas pás da turbina (W);
P_{cc}	potência de curto circuito (W);
P_{em}	potência eletromagnética transferida do estator para o rotor (W);
P_{fe1}	são as perdas no núcleo do estator (W);
P_{fe2}	são as perdas no núcleo do rotor (W);
P_{J1}	são as perdas joule no estator (W);
P_{J2}	são as perdas joule no rotor (W);
$P_{Jo,1}$	Perdas joule no estator em (W);
$P_{mec(gerador)}$	potência mecânica no modo gerador (W);
P_{mec}	potência mecânica total (W);
P_w	potência eólica (W);
R	raio da circunferência descrita pelo movimento das pás (m);
R_c	resistência da carga [Ω /fase].
$r_{1\Delta f}$	resistência estatórica por fase em (Ω);
R_1	resistência do estator (Ω);
R_{fe}	resistência de magnetização (Ω);

R_{med} resistência estatórica medida em (Ω);
 R_R resistência rotórica (Ω);
 s escorregamento;
 $T_{mec(gerador)}$ conjugado eletromecânico no modo gerador (N.m);
 T_{mec} o conjugado eletromagnético em (N.m);
 V velocidade do vento incidente (m/s);
 v velocidade do vento (m/s);
 v_1 velocidade do vento a montante do rotor (m/s);
 v_2 velocidade do vento a jusante do rotor (m/s);
 $V_{f(cc)}$ tensão de curto circuito por fase (V);
 V_L tensão de linha (quando capacitores estão conectados em delta), em (V);
 $V_{o(L)}$ tensão de linha em vazio (V);
 V_r velocidade de vento relativa (m/s);
 W energia cinética em Joules
 X_1 reatância do estator (Ω);
 X_2 reatância equivalente do rotor (Ω);
 X_R reatância do rotor (Ω);
 X_{R0} reatância do rotor bloqueado (Ω);
 X_m reatância de magnetização (Ω);
 Z_2 impedância do rotor em (Ω);
 $Z_{R,eq}$ Impedância equivalente do estator (Ω);
 $Z_{ab(gerador)}$ impedância equivalente do circuito com escorregamento negativo (Ω);
 Z_{ab} impedância equivalente entre os pontos a e b (Ω);
 Z_{eq0} impedância equivalente para o escorregamento zero (Ω);
 Z_m impedância do circuito de magnetização (Ω);
 Z_r impedância do circuito do rotor (Ω);
 α ângulo de ataque em relação ao plano de rotação (ângulo entre a velocidade de vento relativa e o eixo de simetria do perfil aerodinâmico);
 β ângulo de passo do perfil aerodinâmico (ângulo entre o eixo de simetria do perfil aerodinâmico e o plano de rotação)
 τ_{ind} torque induzido no motor (N.m);
 ρ = massa específica do ar ($\cong 1,2\text{kg/m}^3$);

- ω_r frequência do rotor em rad/s;
- μ permeabilidade magnética no núcleo, varia conforme a saturação da máquina
- ω velocidade angular do rotor eólico (rad/s);
- δ ângulo formado entre o campo magnético resultante B_{net} e o campo magnético do rotor B_r .

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
1.2	OBJETIVOS.....	23
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2	PANORAMA E ASPECTOS DA GERAÇÃO EÓLICA.....	25
2.1	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	25
2.2	CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS.....	26
2.3	FORÇAS NAS PÁS DA TURBINA EÓLICA.....	29
2.4	SOLIDEZ.....	31
2.5	CLASSIFICAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS.....	32
3	PRINCIPIOS DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO.....	34
3.1	PARTES CONSTRUTIVAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO.....	34
3.2	O CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NA MÁQUINA DE INDUÇÃO.....	36
3.3	O CIRCUITO EQUIVALENTE.....	41
4	O GERADOR DE INDUÇÃO.....	47
4.1	MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO GERADOR.....	47
4.2	LIMITAÇÕES DO GERADOR.....	49
4.3	O EFEITO DA SATURAÇÃO.....	50
4.4	CARACTERÍSTICAS SEM CARGA.....	51
4.5	OPERAÇÃO INTERLIGADA COM REDE.....	54
4.6	CIRCUITO EQUIVALENTE POR THÉVENIN.....	56
4.7	CARACTERIZAÇÃO EM REGIME PERMANENTE EM MODO GERADOR.....	58
4.8	TUTORIAL PARA CONEXÃO DO GERADOR A REDE.....	59
4.9	EQUILÍBRIO DA DEMANDA DE POTÊNCIA REATIVA.....	60
5	REGULAÇÃO DE TENSÃO.....	62
5.1	MOTIVOS PARA REGULAÇÃO.....	62
5.1.1	Regulação por capacitor em série.....	63
5.1.2	Regulação por capacitores escalonados.....	64

5.1.3	Regulação por controle de carga.....	66
5.1.4	Regulação por controle vetorial.....	68
6	MODELAGEM E SIMULAÇÕES.....	70
6.1	MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	70
6.2	MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ESTATÓRICA.....	74
6.3	ENSAIO A VAZIO.....	75
6.3.1	Determinação dos parâmetros do ramo magnetizante.....	76
6.4	ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO.....	78
6.5	ENSAIO A VELOCIDADE SÍNCRONA.....	81
6.6	PARÂMETROS DO MODELO.....	82
6.7	SIMULAÇÕES.....	83
6.8	RESULTADOS E ANÁLISES.....	86
7	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89
	ANEXO A - Rotina de programação no Matlab para simulação do gerador.....	91

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é utilizada há milhares de anos, para atividades mecânicas simples como bombeamento de água e moagem de grãos. Porém somente com a propagação do uso da energia elétrica em grandes centros urbanos no século XIX, é que houveram estudos envolvendo geração e transmissão de energia elétrica.

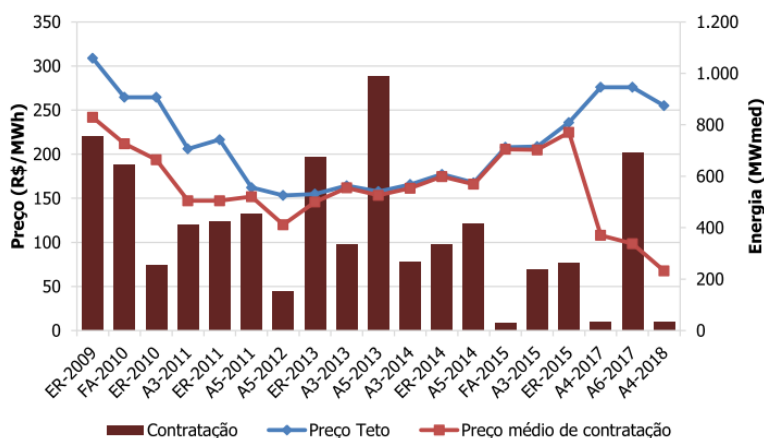
Nikola Tesla, responsável por consolidar os meios de transmissão de energia em forma da corrente alternada, inventou o motor de indução entre os anos 1882 e 1887, e o motor com rotor em gaiola de esquilo foi inventado em 1892. O motor em gaiola de esquilo se popularizou e foi produzido em uma vasta quantidade, e hoje a quantidade em operação ultrapassa os milhões em todo o mundo.(OWEN; GRIFFITH, 1983).

A junção entre a geração eólica e os motores de indução operando como geradores veio como resposta à crise do petróleo de 1970, na qual os aumentos sucessivos no valor do petróleo, fomentaram o interesse em formas de geração de energias renováveis competitivas.

Durante os anos de 1970 e 1990, os valores para geração eólica ainda eram altos frente as outras fontes como derivados do petróleo e carvão utilizados em termelétricas, porém a partir do ano 1990 a geração eólica sofreu um forte aumento, segundo Ackermann,(2005) a geração no mundo praticamente dobrava a cada 3 anos, essa característica de aumento se manteve, fazendo com que os preços por MWh gerado diminuíssem.

No Brasil, os preços da geração eólica começaram a cair a partir de 2009, com a realização de leilões para geração eólica, conforme mostra o gráfico da Figura 1.

Figura 1 - Preço de contratação de empreendimentos eólicos



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2018).

Onde:

ER – Leilão de energia de reserva;

FA – Leilão de fontes alternativas;

A3 – Leilão de energia nova com usinas que entram em operação em até 3 anos;

A4 - Leilão de energia nova com usinas que entram em operação em até 4 anos;

A5 - Leilão de energia nova com usinas que entram em operação em até 5 anos;

A6 - Leilão de energia nova com usinas que entram em operação em até 6 anos;

Na Figura 1 é possível observar a queda nos preços a partir de 2009, com exceção a 2015, onde nossa moeda sofreu forte desvalorização frente ao dólar, houve um aumento. Em 2009 o preço do MWh era de 311 reais, já em 2017 o valor contratado de MWh passou a valer 99 reais.

Com esse cenário, a geração eólica mostra seu crescimento e pesquisas para elaboração de projetos competitivos se fazem necessárias para atender o mercado.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para elaboração do panorama da energia eólica no Brasil, os dados da associação brasileira de energia eólica (ABEEÓLICA) bem como o trabalho de Pavinatto (2005) colaboraram como fontes de números, dados e figuras.

Os trabalhos de Reis (2002), Silva (2013), Ackermann (2005) e Manwell, J, F; McGowan, J, G; Rogers, A (2002), forneceram dados técnicos sobre as operações das turbinas eólicas e as concepções de métodos construtivos.

A elaboração da parte técnica do motor de indução em gaiola de esquilo, teve contribuição dos materiais de aula de Reis; Rossi (2015a), o manual da WEG (2016), os trabalhos de Chapallaz *et al.* (1992), Chapman (2005) e Homrich (2013) contribuíram com equações, figuras e definições do motor de indução em gaiola de esquilo.

O capítulo sobre regulação de tensão teve contribuição dos trabalhos de Marra; Pomilio (2000), Wagner (1939) e Seyoum; Grantham; Rahman (2003), suas contribuições com figuras, equações e definições tornaram o tema mais didático.

As modelagem e simulações foram seguindo os roteiros do trabalho de Homrich (2013) e os materiais de aula de Reis, Rossi (2015b), forneceram os métodos de laboratório, além de figuras e equacionamentos. O código utilizado no MatLab para simular a operação do motor foi retirado de Homrich, (2013).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é fornecer um tutorial sobre geração eólica, então serão vistos tópicos como o projeto de turbinas eólicas e o motor de gaiola de esquilo operando como gerador de forma interligada a rede elétrica.

Como objetivo específico serão analisados os problemas de controle de tensão que o motor de indução operando como gerador apresenta. Para isso se faz necessário explicar os tópicos listados a seguir:

- Explicar de forma detalhada a operação do motor de indução;
- Explicar de forma detalhada a operação do motor de indução com rotor em gaiola de esquilo operando como gerador;
- Explicar de forma resumida algumas técnicas de regulação de tensão;
- Testar em laboratório o motor, para levantamento dos parâmetros da máquina;
- Testar o motor operando como gerador;
- Fazer simulações no MatLab, e com isso comparar resultados práticos e teóricos;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta um breve contexto da energia eólica no Brasil, na sequência são traçados os aspectos relacionados as turbinas eólicas, questões como as forças atuantes nas pás eólicas, aspectos construtivos como diferença entre eixos em relação ao vento e o fator adimensional conhecido por solidez são abordados neste capítulo.

O capítulo 3, apresenta a máquina de indução com o rotor em gaiola de esquilo, os aspectos construtivos são abordados de forma detalhada. Também são abordados os temas da formação do campo magnético responsável por transmitir a energia entre o rotor e o estator e é definido um circuito equivalente da máquina de indução que possibilitará uma análise mais precisa da mesma.

O capítulo 4 apresenta a máquina de indução operando como gerador, neste capítulo são abordadas as limitações do gerador, os efeitos da saturação magnética. É também elaborado um circuito equivalente do gerador usando o método Thévenin bem como os cálculos dos parâmetros da máquina. No fim do capítulo é elaborado um tutorial para conexão do gerador à

rede elétrica de forma segura, e também o cálculo da capacitância requerida no banco de capacitores para correção do fator de potência do gerador.

O capítulo 5 apresenta a necessidade regulação da tensão no gerador de indução, são apresentados métodos para realizar a regulação na tensão quando a carga na rede sofre variação.

O capítulo 6 apresenta as simulações em MatLab e a modelagem do gerador de indução, para isso são realizados alguns ensaios em laboratório com a máquina de indução, com o resultado destes ensaios é possível encontrar os parâmetros da máquina de indução. Com os parâmetros da máquina de indução é possível realizar as simulações no MatLab onde serão levantadas algumas curvas de operação da máquina de indução. Comparando os resultados do laboratório com os resultados das simulações as análises são abordadas neste capítulo.

O capítulo 7 apresenta a conclusão deste trabalho bem como sugestão para trabalhos futuros.

O anexo 1 traz o código utilizado no MatLab para a geração das curvas de operação da máquina de indução.

2 PANORAMA E ASPECTOS DA GERAÇÃO EÓLICA

Nesse capítulo, será feita uma abordagem sobre panorama da energia eólica no Brasil, desde a instalação do primeiro gerador até os dias mais recentes.

Também será abordado as características das turbinas eólicas, serão definidas as forças atuantes nas turbinas eólicas, bem como as distinções entre projetos construtivos das mesmas.

2.1 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

No ano de 1992 o primeiro gerador eólico de grande porte (75kW), foi instalado no Brasil, na ilha de Fernando de Noronha, com a finalidade de economizar o combustível de um gerador elétrico à Diesel que operava na ilha. Esse gerador eólico foi uma parceria entre a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) e o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE).

No ano de 1996, em Fortaleza, CE a Companhia Elétrica do Ceará iniciou um programa de geração eólico com a Usina de Mucuripe, a potência instalada era de 1,2MW (PAVINATTO, 2005).

Em 2001, ocorreu uma grave crise energética no Brasil, houve a necessidade de incentivar a contratação de empreendimentos de geração de energia eólica pelo país. Desse esforço surgiu o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA), como objetivo, esse programa previa a contratação de 1050 MW de projetos na área da energia eólica até o prazo de dezembro de 2003. O PROEÓLICA não obteve os resultados esperados e foi substituído pelo Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA. Dentre várias contribuições do PROINFA em relação ao desenvolvimento das fontes renováveis de energia elétrica destaca-se o caminho aberto para a fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas no país, devido a exigência de conteúdo nacional na fabricação dos aerogeradores instalados a partir desse programa (ABEEÓLICA, 2018a)

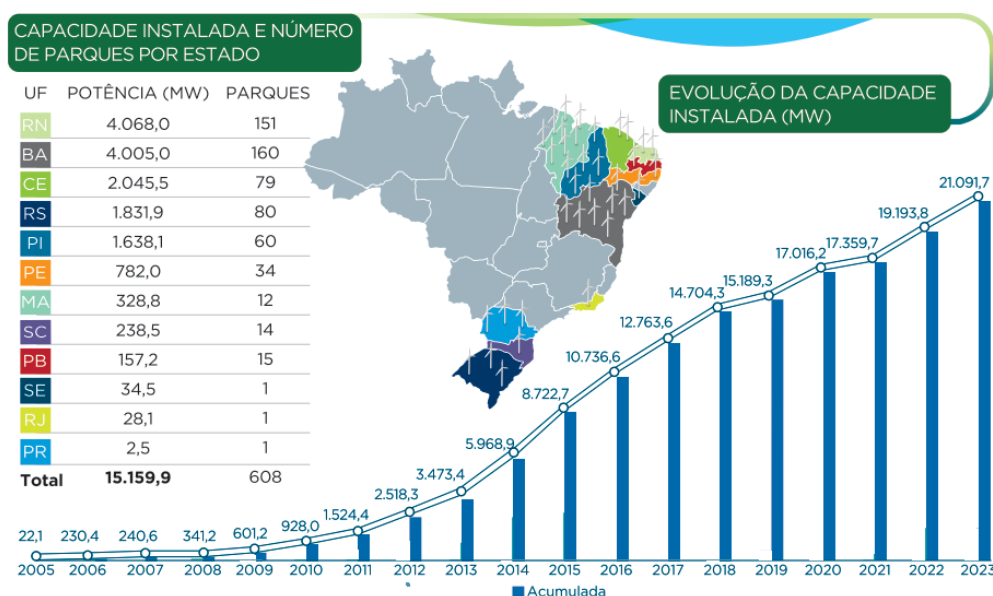
No início do PROINFA, o alto custo da tecnologia da geração eólica ainda era um obstáculo, por isso havia a necessidade de leilões competitivos para fomentar a geração eólica. No final de 2009 foi realizado o primeiro leilão de comercialização de energia voltado exclusivamente para a fonte eólica. O leilão denominado de Leilão de Energia de Reserva (LER), obteve sucesso com a contratação de 1,8GW de potência instalada, e possibilitou que novos leilões ocorressem (ABEEÓLICA, 2018a).

A capacidade instalada no Brasil em dezembro de 2018, era de 14,71GW, com 583 parques eólicos instalados por 12 estados no país. Essa capacidade atendeu cerca de 25,5 milhões de residências e foi responsável por suprir 9% da matriz energética brasileira (ABEEÓLICA, 2018b).

Já em agosto de 2019 os valores são de 15,1GW de potência instalada, com 608 parques eólicos, representando cerca de 4% de crescimento em parques instalados comparado com dezembro de 2018, e 7477 aerogeradores instalados no país (ABEEÓLICA, 2019)

A Figura 2 ilustra o cenário da geração eólica em agosto de 2019 no Brasil, e faz também uma projeção do crescimento até 2023.

Figura 2 - Número de parques eólicos e capacidade instalada por estado em 2019



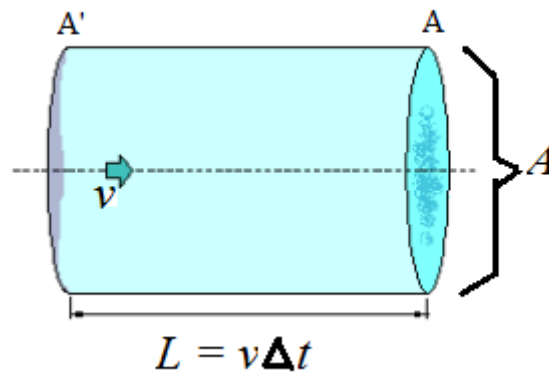
Fonte: ABEEÓLICA (2019).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS

Com a finalidade de encontrar a potência eólica disponível em Reis (2002), é desenvolvido um equacionamento para obter a potência eólica disponível em determinado local, onde deseja-se instalar turbina eólica.

Primeiramente para saber a quantidade de massa de vento que se movimenta em determinada área, segundo Reis (2002) deve ser analisado a quantidade de massa que se desloca em um cilindro fictício, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Cilindro de vento fictício



Fonte: Reis (2002).

Onde as bases do cilindro são A' e A de áreas iguais a **A**. Considerando que A' está em movimento em direção a A com velocidade v e o tempo decorrido para o deslocamento entre A' e A como Δt . Logo a massa do ar contida no cilindro sendo **m** é obtida pela Equação (1):

$$\mathbf{m} = \rho A v \Delta t \quad (1)$$

Onde:

ρ = massa específica do ar ($\cong 1,2\text{kg/m}^3$);

Com o valor da massa de ar contida no cilindro, segundo Reis, (2002), é possível obter a energia cinética pela Equação (2):

$$W = \frac{1}{2} \mathbf{m} v^2 \quad (2)$$

Onde:

W = energia cinética (J)

m = quantidade de massa contida no cilindro fictício (kg);

v = velocidade do vento (m/s);

E segundo Reis (2002), a potência eólica é dada pela Equação (3):

$$\mathbf{P}_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

Onde:

$\mathbf{P}_w$ = potência eólica em Watts;

ρ = massa específica do ar ($\cong 1,2\text{kg/m}^3$);

v = velocidade do vento (m/s);

Embora a energia contida na massa de ar seja grande, nem toda ela é transferida ao eixo da turbina, segundo Reis (2002), uma parcela dessa energia é transferida devido ao limite estabelecido por Betz, que estabeleceu o coeficiente de potência C_p , esse coeficiente não será desenvolvido neste trabalho, mas seu valor máximo é 0.5926. É obtido pela Equação (4):

$$C_p = \frac{P_{cap}}{P_w} \quad (4)$$

Onde:

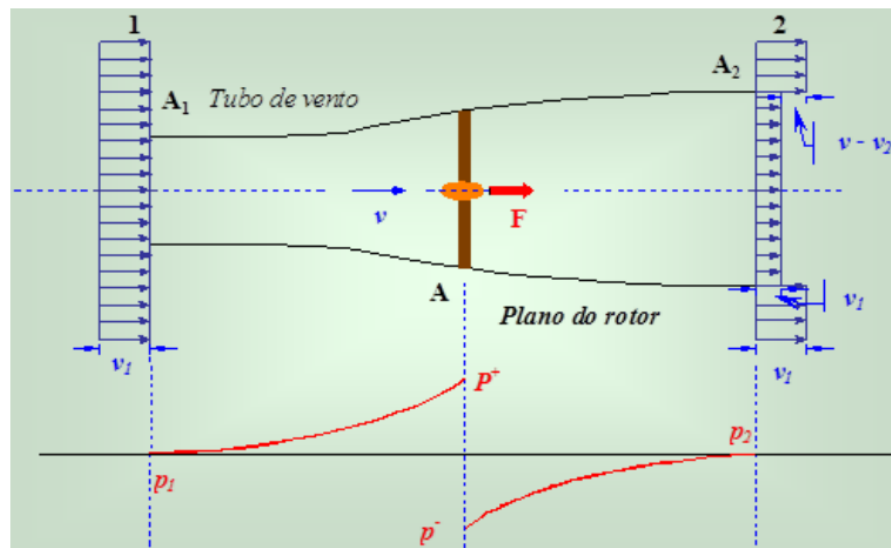
C_p = coeficiente de potência;

P_{cap} = potência captada pelas pás da turbina, em Watts;

P_w = potência eólica em Watts;

A Figura 4 ilustra a passagem de ar na turbina, além de apresentar os parâmetros para ser calculado a potência captada pelas pás da turbina P_{cap} .

Figura 4 - Passagem do Fluxo de Ar pela Turbina Eólica



Fonte: Reis (2002).

Onde:

v_1 = velocidade do vento a montante do rotor (m/s);

v_2 = velocidade do vento a jusante do rotor (m/s);

v = velocidade incidente no plano do rotor da turbina (m/s);

F = força devido a corrente de ar sobre o plano do rotor (N);

p_1 = pressão a montante do rotor ($p_1 = p_2 = p_{atm}$) (atm);

p^+, p^- = pressão no plano do rotor na tomada de ar e na saída de ar respectivamente (atm);

Através do equacionamento elaborado por Reis, (2002), a potência captada nas pás da turbina é dado pela Equação (5):

$$P_{cap} = (\rho A \frac{(v_1 + v_2)}{2}) (\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2}) \quad (5)$$

Onde:

P_{cap} = potência captada pelas pás da turbina (W);

ρ = massa específica do ar ($\cong 1,2 \text{ kg/m}^3$);

A = área varrida pelas pás da turbina (m^2);

v_1 = velocidade do vento a montante do rotor (m/s);

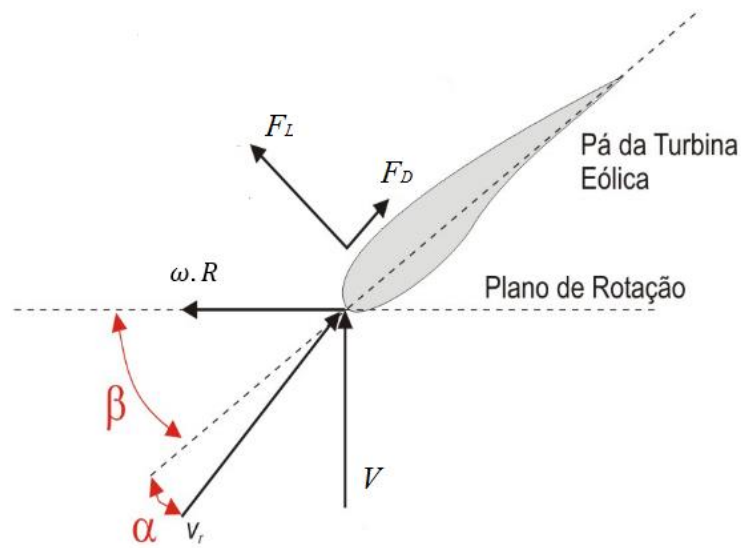
v_2 = velocidade do vento a jusante do rotor (m/s);

2.3 FORÇAS NAS PÁS DA TURBINA EÓLICA

Segundo Reis (2002), duas forças surgem devido a diferença de pressão nas partes superior e inferior da pá da turbina eólica, são elas: força de sustentação (F_L) e força de arrasto (F_D).

Em Reis (2002), a força de sustentação (F_L), possui direção perpendicular ao vento. Já a força de arrasto (F_D) está a 90° da primeira, ou seja, na direção do vento. A Figura 5 ajuda a elucidar a atuação das forças.

Figura 5 - Vetores de velocidades e forças sob uma pá eólica



Fonte: Pavinatto (2005).

Onde:

F_L = força de sustentação (N);

F_D = força de arrasto (N);

V_r = velocidade de vento relativa (m/s);

V = velocidade do vento incidente (m/s);

ω = velocidade angular do rotor eólico (rad/s);

R = raio da circunferência descrita pelo movimento das pás (m);

α = ângulo de ataque em relação ao plano de rotação (ângulo entre a velocidade de vento relativa e o eixo de simetria do perfil aerodinâmico);

β = ângulo de passo do perfil aerodinâmico (ângulo entre o eixo de simetria do perfil aerodinâmico e o plano de rotação)

Em Silva, (2013), a velocidade de vento relativa V_r é calculada pela Equação (6):

$$V_r = V(1 - a) - \omega \cdot R \quad (6)$$

Onde:

V_r = velocidade de vento relativa (m/s);

V = velocidade do vento incidente (m/s);

a = fator de interferência sobre a velocidade de vento incidente;

ω = velocidade angular do rotor eólico (rad/s);

R = raio da circunferência descrita pelo movimento das pás (m);

Vale ressaltar que na Equação (6), todas as velocidades são vetores, pois possuem direções distintas como observado na Figura 5.

Em Silva (2013), a força resultante F_a , que atua pá eólica pode ser calculada por (7):

$$F_a = F_L \sin \theta - F_D \cos \theta \quad (7)$$

Onde: $\theta = \alpha + \beta$

α = ângulo de ataque em relação ao plano de rotação (ângulo entre a velocidade de vento relativa e o eixo de simetria do perfil aerodinâmico)

β = ângulo de passo do perfil aerodinâmico (ângulo entre o eixo de simetria do perfil aerodinâmico e o plano de rotação)

F_a = força resultante na pá eólica (N);

F_L = força de sustentação (N);

F_D = força de arrasto (N);

2.4 SOLIDEZ

Em Silva (2013), é definido um parâmetro muito significativo para a execução de projeto de turbinas eólicas denominado solidez (σ). A solidez é um parâmetro adimensional que é calculado através da relação entre a área total das pás do rotor e a área varrida por estas em um perímetro que corresponde a 70% do raio das pás. O cálculo da solidez (σ) é mostrado na Equação (8):

$$\sigma = \frac{n \cdot c}{0,7\pi D} \quad (8)$$

Onde:

n = número de pás;

c = corda a 0.7 do raio das pás (m);

D = diâmetro do rotor (m);

Segundo Silva (2013), a menção ao ponto de 70% do raio de ação das pás da turbina eólica é feita pois essa área está exposta as maiores solicitações estruturais. Pelo estudo realizado em alguns projetos nota-se que o aumento da solidez torna a operação das turbinas melhor em baixas velocidades e melhora o conjugado de partida. Já a diminuição da solidez

torna a operação das turbinas melhor em altas velocidades, porém apresentam baixo conjugado de partida.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS

Em Silva (2013) é apresentado uma forma de classificar os tipos de turbinas eólicas, através dos seguintes critérios:

- Direção do eixo de rotação em relação ao vento (eixo horizontal e eixo vertical);
- Qualidade das forças predominantes (arrasto e sustentação);
- Quantidade de material existente no rotor (baixa e alta solidez).

As turbinas de eixo horizontal (HAWT), na qual as forças de sustentação predominam e apresentam baixa solidez, obtiveram maior proficiência na geração de eletricidade quando comparado com as turbinas de eixo vertical (VAWT) (MANWELL, J, F; MCGOWAN, J, G; ROGERS, A, 2002).

A Figura 6 apresenta dois tipos de turbinas de eixo horizontal, uma delas aplicada em zona rural com menor porte, e a outra com maior porte é aplicada em usinas eólicas

Figura 6 - Turbinas de Eixo Horizontal (pequena potência e alta potência)



Fonte: Silva (2013).

As turbinas de eixo vertical (VAWT), são representadas pelos modelos Darrieus e Savonius. O modelo Darrieus apresenta baixa solidez e altas velocidades de operação, esse modelo foi bastante estudado nos Estados Unidos e Canadá durante as décadas de 1970 e 1980 e a sua geração de eletricidade é a maior disponível entre as (VAWT). Já o modelo Savonius apresenta alta solidez e opera em baixas velocidades foi utilizado para aplicações simples como bombeamento de água. Os dois modelos de turbinas de eixo vertical

apresentam problemas no tocante a proteção contra fortes ventos e operações ineficientes (MANWELL, J, F; MCGOWAN, J, G; ROGERS, A, 2002).

Na Figura 7 é apresentado as duas turbinas de eixo vertical, e no Quadro 1 as características de cada uma são definidas.

Figura 7 - Turbinas Eólicas de Eixo Vertical



Turbina Savonius



Turbina Darrieus

Fonte: Silva (2013).

Quadro 1- Características de turbinas de eixo vertical

Turbina Savonius	Turbinas Darrieus
• Predomina o arrasto; • Alta solidez e baixa rotação; • Baixa eficiência ($C_{pmax}=10\%$); • Utilizado em aplicações mecânicas e entretenimento; • Simples construção; • Inadequada para geração de eletricidade	• Predomina a sustentação; • Turbina de baixa solidez; • Alta rotação e eficiência; • Não tem partida autônoma; • Esforços mecânicos severos sobre as pás; • Frenagem complexa • Turbina não-comercial

Fonte: Silva (2013).

3 PRINCIPIOS DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO

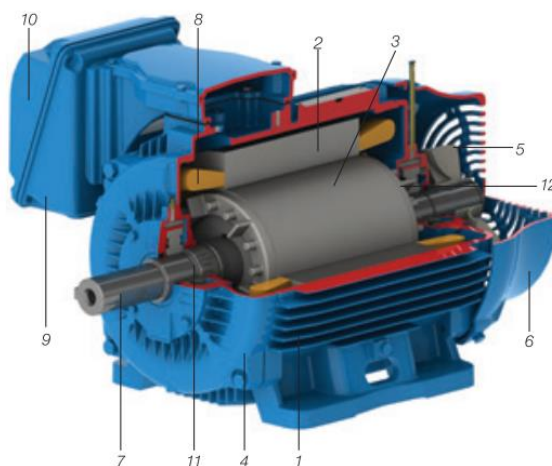
Neste capítulo será abordado os princípios de funcionamento de uma máquina de indução. Durante o texto serão revisitados os seguintes temas: as partes construtivas da máquina de indução, características da máquina e os princípios que regem a operação da máquina de indução.

3.1 PARTES CONSTRUTIVAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Segundo Chapallaz *et al*, (1992), a máquina de indução pode ser dividida em duas partes principais: a parte estacionária denominada de estator e a parte cilíndrica giratória, denominada rotor.

Em WEG (2016) é fornecido um esquemático que descreve as partes componentes da máquina de indução.

Figura 8 – Partes componentes da máquina de indução



Fonte: WEG (2016).

Onde:

- (1) – Carcaça: componente estrutural, robusta geralmente construída em ferro fundido ou aço;
- (2) – Núcleo em chapas (estator): constituído de chapas de aço magnético;
- (3) – Núcleo em chapas (rotor): constituído de chapas de aço magnético;
- (4) – Tampa: constituído de ferro fundido ou aço;

- (5) – Ventilador: constituído de alumínio;
- (6) – Tampa defletora: constituída de aço ou ferro fundido;
- (7) – Eixo do rotor: constituído de aço;
- (8) – Enrolamento trifásico: composto de cobre, e material isolante (verniz e esmalte);
- (9) – Caixa de ligação: composto de aço e cobre;
- (10) – Terminais: Contatores de cobre e aço;
- (11) – Rolamentos: composto de aço e alumínio;
- (12) – Barras e anéis de curto-circuito: composto de aço e cobre;

O estator compreende os seguintes componentes: (1) Carcaça, responsável pela rigidez e estrutura da máquina; (2) Núcleo em chapas, composto por laminações de alguns décimos de milímetro de espessura para diminuir as perdas por histerese e corrente parasita; (8) Enrolamento trifásico, composto por bobinas de cobre são responsáveis pela criação do campos magnético quando alimentadas por uma corrente trifásica alternada.

Já o rotor compreende as seguintes componentes: (7) Eixo, responsável por transmitir a potência desenvolvida pela máquina; (3) Núcleo em chapas, composto por laminações de alguns décimos de milímetro de espessura para diminuir as perdas por histerese e corrente parasita; (12) Barras e anéis de curto-circuito, responsáveis pelo fluxo de campo e corrente induzida no rotor.

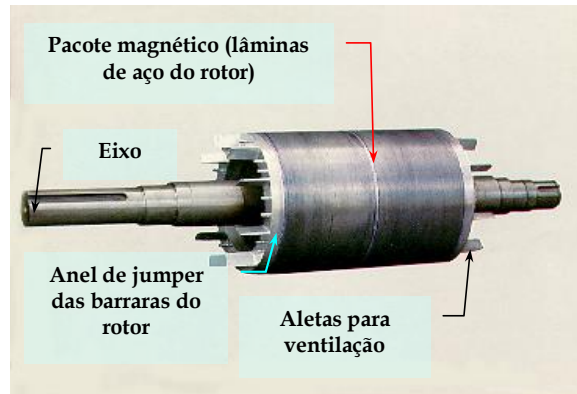
Em Reis; Rossi (2015c) o projeto do enrolamento do rotor pode variar dependendo das necessidades de controle de velocidade e torque. Basicamente em dois tipos de arquiteturas, são elas: o rotor em gaiola de esquilo e o rotor bobinado (em anéis).

Neste trabalho será abordado a arquitetura do rotor em gaiola de esquilo, onde segundo Reis; Rossi (2015c) pode ser subdividida em outros dois tipos, são eles: tipo barras e do tipo alumínio injetado.

O rotor em gaiola do tipo alumínio injetado, segundo Reis; Rossi (2015c) possuem como características: elevada capacidade de dissipação térmica, altos torques durante a partida aliado com baixas correntes além de uma rigidez mecânica elevada, para suportar altos valores de conjugado mecânico.

Já o processo de fabricação em Reis; Rossi (2015c) é descrito como a injeção de alumínio fundido sob pressão sobre um pacote de chapas magnéticas de aço silício. Durante o processo as barras serão formadas no interior do pacote magnético e para efetuar o contato elétrico necessário, fechando em curto circuito as barras da gaiola rotórica, um anel de alumínio é fundido em ambas as partes do rotor. A Figura 9 ilustra esse tipo de rotor.

Figura 9 -Rotor do tipo alumínio injetado

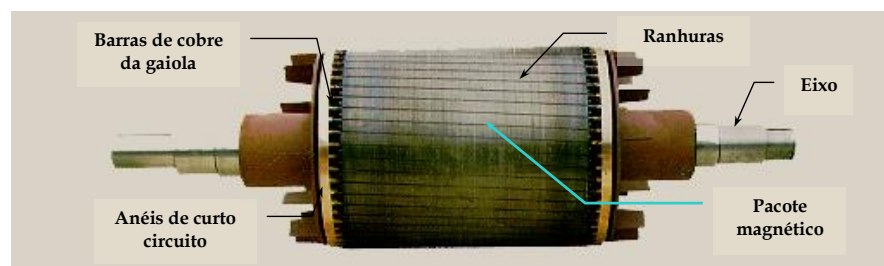


Fonte: Reis; Rossi (2015c).

E o rotor em gaiola do tipo rotor de barras, é fabricado da seguinte maneira: nas ranhuras das lâminas de aço que compõem o núcleo do estator, são inseridas barras retangulares de cobre. Em seguida é soldado um anel de curto-circuito em cada uma das extremidades do rotor, conectando todas as barras rotóricas e completando o circuito do rotor. É necessário, durante o processo de soldagem das barras ao anel, certo cuidado devido as constantes vibrações mecânicas decorrente das partidas e sobreaquecimento, que ocorrem nos pontos de soldagem. Devido esses fatores ocorre fadiga das soldas ocasionando rupturas nos pontos de soldagem das barras (REIS; ROSSI, 2015c).

A Figura 10, ilustra este tipo de rotor.

Figura 10 - Rotor em gaiola do tipo em barras



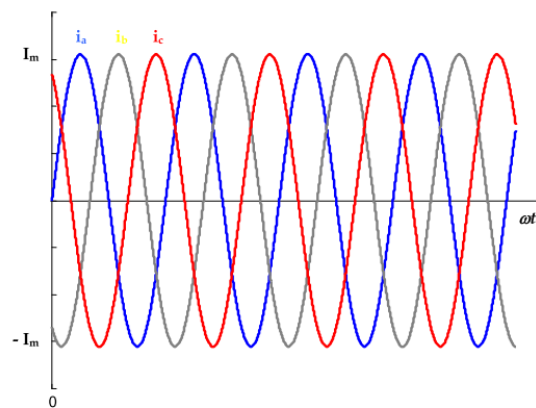
Fonte: Reis; Rossi (2015c).

3.2 O CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Em Reis; Rossi (2015b) o campo magnético estático é estabelecido, quando as correntes alternadas percorrem as bobinas do estator. Dessa forma em cada uma das bobinas de fase é estabelecido a produção de um fluxo magnético pulsante.

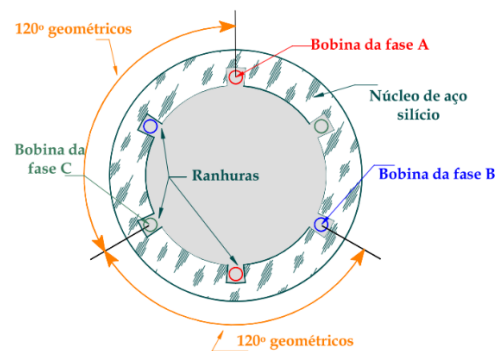
Como o fluxo magnético é produzido por corrente alternada, ele terá características diferentes do fluxo encontrado em máquinas de corrente contínua. Em Reis; Rossi (2015b) é analisado o comportamento das correntes alternadas nas bobinas do estator. Considerando que as correntes estão 120° elétricos defasadas entre si, conforme Figura 11, e que elas percorrem as três bobinas elétricas que estão 120° geométricos defasadas entre si, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 11 - Correntes que circulam na fase do estator



Fonte: Reis; Rossi (2015b).

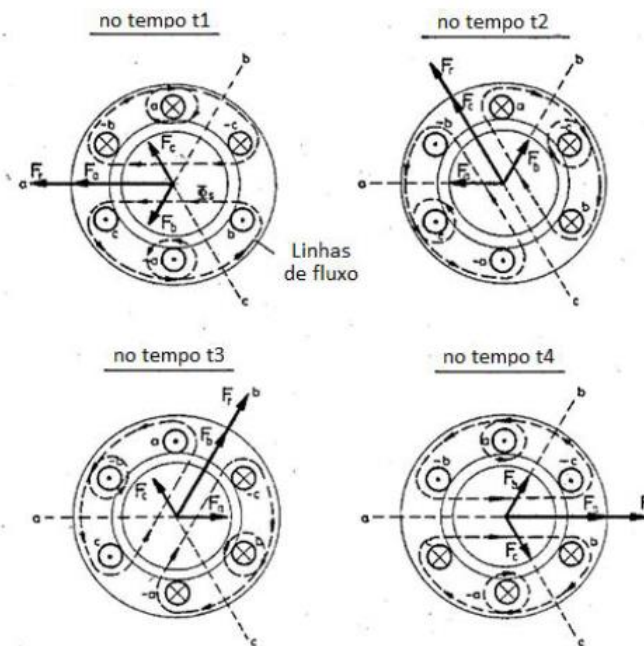
Figura 12 - Ilustração de um estator com duas ranhuras por fase e um par de pólos



Fonte: Reis; Rossi (2015b).

Portanto em Chapallaz *et al* (1992) as formas de onda da corrente alternada, faz com que a força magnetomotriz de cada fase também oscile entre um máximo positivo e um máximo negativo. E mesmo cada um dos três vetores da força magnetomotriz sendo estacionário, o campo magnético, resultante da soma desses três vetores parece girar, conforme é visto na Figura 13.

Figura 13 -Campo magnético rotativo por quatro instantes de tempo de um enrolamento de estator trifásico bipolar



Fonte: Chapallaz *et al* (1992).

Ainda segundo Manwell, J, F; McGowan, J, G; Rogers, A (2002), durante a fabricação do estator é possível organizar os enrolamentos das bobinas, para obtenção de determinado pares de pólos por fase. No entanto ao aumentar o número de pólos o campo magnético rotativo girará com menos velocidade. O campo magnético rotativo gira na velocidade síncrona, e é mostrado na Equação (9).

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (9)$$

Onde:

f = frequência elétrica, em HZ

n_s = velocidade síncrona em rpm

P = número de pólos da máquina

Definido uma vez a velocidade síncrona da máquina, é importante saber quando ocorrerá a força eletromotriz. Em Manwell, J, F; McGowan, J, G; Rogers, A (2002), para que haja a força magnetomotriz induzida no rotor, o mesmo deve cortar as linhas de fluxo, para isso o rotor deve rotacionar em uma velocidade ligeiramente diferente da velocidade síncrona, havendo dessa forma movimento relativo entre os campos do rotor e do estator. A razão da

diferença de velocidade do rotor com o campo magnético síncrono pela velocidade síncrona, se dá o nome de escorregamento, e é calculado pela Equação (10).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (10)$$

Onde:

s = escorregamento;

n_s = velocidade síncrona em (RPM);

n_r = velocidade do rotor em (RPM);

A Equação (10), pode ser simplificada para se encontrar a velocidade do rotor facilmente, sabendo o valor de escorregamento s , e o valor da velocidade síncrona n_s , dada pela Equação (11).

$$n_r = (1 - s)n_s. \quad (11)$$

Onde:

s = escorregamento;

n_s = velocidade síncrona em (RPM);

n_r = velocidade do rotor em (RPM);

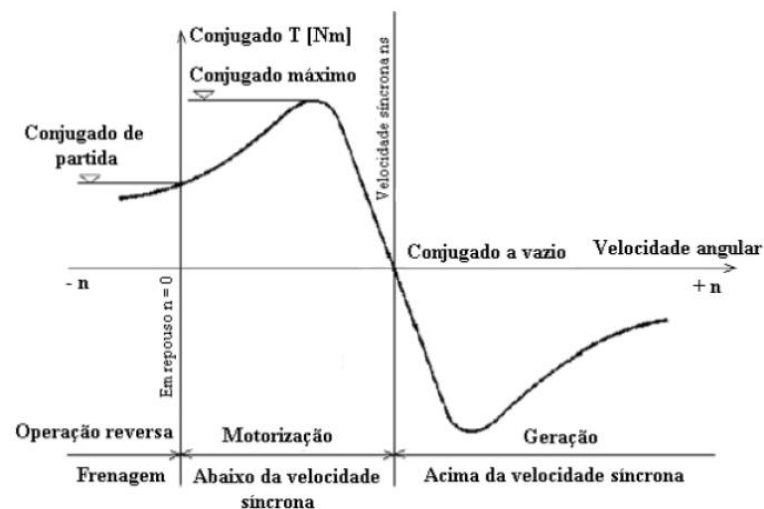
Em Chapman (2005) é visto que a tensão induzida nas barras do rotor ocasiona o surgimento de um campo magnético B_r , e a interação com campo magnético B_s produz um conjugado eletromecânico.

Conforme ocorre um aumento de carga na ponta do eixo da máquina, o escorregamento aumenta, a tensão induzida nas barras do rotor aumenta e a interação entre os campos magnéticos B_r e B_s aumenta. Já na condição sem carga na ponta do eixo, ocorre uma diminuição do escorregamento, a tensão induzida nas barras do rotor diminui e a interação entre os campos magnéticos B_r e B_s diminui. Essa situação está ilustrada na Figura 14.

δ = ângulo formado entre o campo magnético resultante B_{net} e o campo magnético do rotor B_r .

Com o valor do torque, é possível analisar os modos de operação da máquina de indução à medida que a velocidade do rotor é variada. A curva do Conjugado versus velocidade do rotor é demonstrada na Figura 15.

Figura 15 -Conjugado x Velocidade na máquina de indução



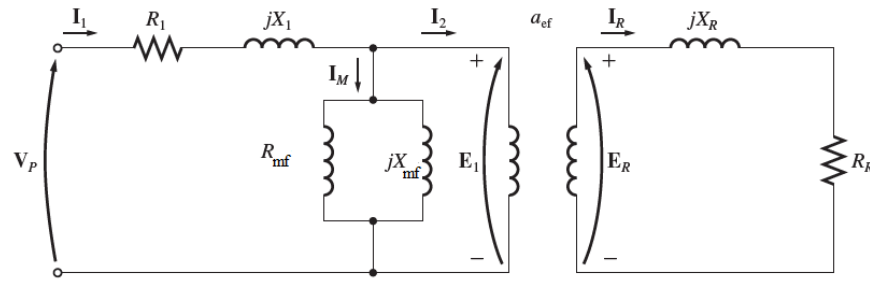
Fonte: Homrich (2013)

Segundo Chapallaz *et al* (1992), a máquina de indução operando na região abaixo da velocidade síncrona apresenta um torque positivo, configurando modo de operação motor. Já quando a máquina supera a velocidade síncrona apresenta um torque negativo, mostrando que a máquina atua como gerador.

3.3 O CIRCUITO EQUIVALENTE

Em Chapman (2005), é feita uma comparação entre o modo de operação do transformador e de um motor de indução, como os dois apresentam enrolamentos e baseiam suas operações em indução realizada entre dois circuitos essa comparação é possível. A Figura 16 ilustra o circuito do motor de indução.

Figura 16 -Circuito equivalente de motor de indução



Fonte: Chapman (2005)

Observando primeiramente o circuito estatórico, segundo Chapman (2005), a resistência do estator é denominada por R_1 , e a reatância do estator é dada por X_1 . As componentes do ramo magnetizante são resistência de cobre R_{mf} , e a reatância de magnetização X_{mf} , esses componentes serão obtidos no capítulo 6.

Agora observando o circuito rotórico, segundo Chapman (2005), entre o intervalo de motor parado e a velocidade síncrona, os valores de frequência e tensão induzida no rotor são diretamente proporcionais ao escorregamento do rotor. Na condição de rotor travado a tensão induzida e a frequência no rotor são as mais altas, denominando a tensão de rotor travado E_{r0} , e a frequência de rotor travado f_s , as Equações (14) e (15) demonstram a proporcionalidade do escorregamento com a tensão e frequência, respectivamente:

$$E_r = sE_{r0} \quad (14)$$

$$f_r = sf_s = \frac{sn_s}{60} \quad (15)$$

Onde:

E_r = tensão induzida no rotor (V);

E_{r0} = tensão de rotor travado (V);

s = escorregamento do motor;

f_s = frequência síncrona (Hz);

f_r = frequência induzida no rotor (Hz);

n_s = velocidade síncrona da máquina (RPM);

Já a resistência do rotor, segundo Chapman (2005), é uma constante, exceto pelo efeito do aquecimento, no entanto a reatância rotórica é afetada proporcionalmente ao escorregamento.

Em Chapman (2005), a reatância do rotor depende da indutância do rotor e da frequência da tensão e corrente do rotor. Considerando a indutância de rotor L_R , a reatância do rotor será obtida pela Equação (16):

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (16)$$

Onde:

X_R = reatância do rotor (Ω);

ω_r = frequência do rotor (rad/s);

L_R = indutância do rotor (Ω);

f_r = frequência induzida no rotor (Hz);

Substituindo o valor da Equação (15), na Equação (16), é obtido valor, dado pela Equação (17):

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi s f_s L_R \\ &= s(2\pi f_s L_R) \\ &= sX_{R0} \end{aligned} \quad (17)$$

Onde:

X_{R0} = reatância do rotor bloqueado (Ω);

X_R = reatância do rotor em (Ω);

ω_r = frequência do rotor (rad/s);

L_R = indutância do rotor(Ω);

f_r = frequência do rotor (Hz);

Com a finalidade de encontrar o valor da corrente no rotor, em Chapman (2005), foi elaborado um equacionamento a seguir obtido nas Equações (18), (19) e (20):

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad (18)$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}} \quad (19)$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (20)$$

Onde:

I_R = corrente no rotor (A);

R_R = resistência rotórica (Ω);

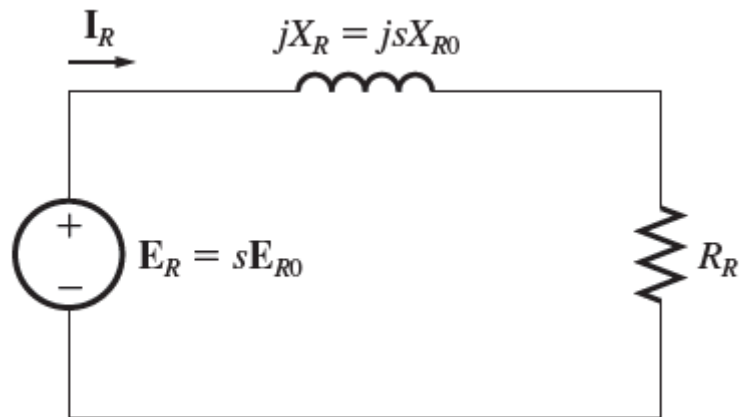
X_R = reatância no rotor (Ω);

X_{R0} = reatância com o rotor travado (Ω);

s = escorregamento do motor;

A Figura 17, ajuda a elucidar as Equações (18), (19) e (20).

Figura 17 - Circuito do rotor



Fonte: Chapman (2005)

Os efeitos decorridos no rotor devido a velocidade variável segundo Chapman, (2005), podem ser observados na Equação (20), logo a impedância equivalente do rotor pode ser calculada pela Equação (21):

$$Z_{R,eq} = R_R/s + jX_{R0} \quad (21)$$

Onde:

$Z_{R,eq}$ = Impedância equivalente do estator (Ω);

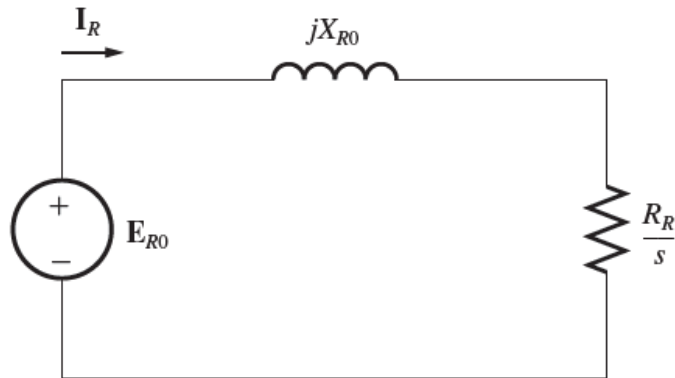
R_R = resistência rotórica(Ω);

X_{R0} = reatância com o rotor travado(Ω);

s = escorregamento do motor;

A Figura 18, ajuda a elucidar a equação (21).

Figura 18 - Circuito do rotor com os efeitos do escorregamento



Fonte: Chapman (2005)

A Figura 18, ilustra os efeitos da variação do escorregamento sobre o valor da impedância equivalente, em Chapman (2005), para ser obtido o circuito equivalente final por fase, é necessário que parte do modelo do rotor seja referida ao lado do estator.

Uma vez conhecida a relação de espiras entre o rotor e o estator, essa referência é possível e em Chapman (2005), o equacionamento é obtido.

Considerando a relação de espiras entre o rotor e o estator conhecida, e dada pelo valor a_{ef} , a tensão referida ao estator será dada pela Equação (22):

$$E_1 = E'_R = a_{ef} E_{R0} \quad (22)$$

Onde:

E_1 = tensão no estator (V);

E'_R = tensão rotor referida ao estator (V);

a_{ef} = relação de espiras entre o rotor e o estator;

E_{R0} = tensão do rotor bloqueado (V);

A corrente do rotor será dada pela Equação (23):

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}} \quad (23)$$

Onde:

I_2 = corrente do rotor (A);

I_R = corrente do estator referida ao rotor (A);

a_{ef} = relação de espiras entre o rotor e o estator;

A impedância do rotor será dada pela Equação (24):

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (24)$$

Onde:

Z_2 = impedância do rotor em (Ω);

a_{ef} = relação de espiras entre o rotor e o estator;

X_{R0} = reatância com o rotor travado (Ω);

R_R = resistência rotórica em (Ω);

s = escorregamento do motor;

E será adotado as definições das Equações (25) e (26):

$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad (25)$$

$$X_2 = a_{ef}^2 X_{R0} \quad (26)$$

Onde:

R_2 = resistência equivalente do rotor (Ω);

R_R = resistência do rotor (Ω);

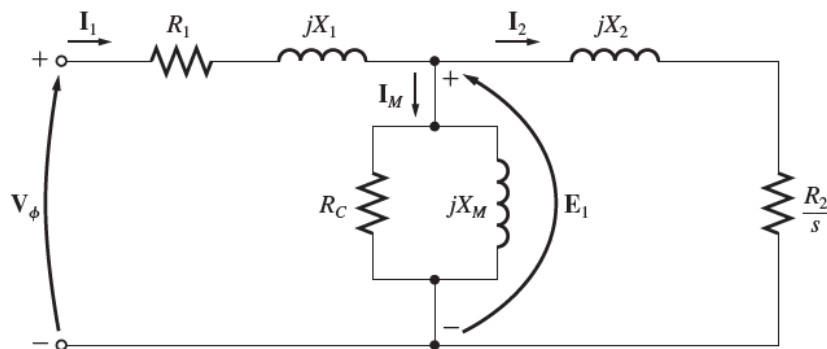
X_2 = reatância equivalente do rotor (Ω);

X_{R0} = reatância com o rotor travado (Ω);

a_{ef} = relação de espiras entre o rotor e o estator;

Com esse equacionamento formulado segundo Chapman (2005) o circuito equivalente da máquina de indução pode ser elaborado, como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Circuito equivalente por fase de um motor de indução



Fonte: Chapman (2005)

4 O GERADOR DE INDUÇÃO

Neste capítulo, será abordado a máquina de indução trifásica operando como gerador de indução.

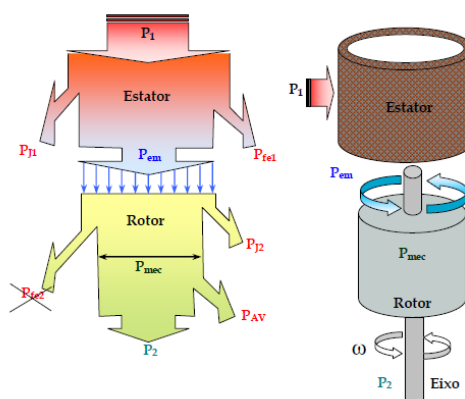
O capítulo está estruturado na seguinte forma, nas primeiras seções serão feitas as definições da máquina de indução como gerador, já nas seções adiante serão abordadas as limitações do gerador e na seção final foi elaborado um tutorial para conectar o gerador de indução à rede elétrica.

O gerador de indução pode fornecer energia operando de forma isolada (stand alone) ou interligado à rede elétrica, nesse trabalho foi focada a operação interligada à rede.

4.1 MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO GERADOR

Um motor de indução pode operar como gerador, dirigindo-o acima de sua velocidade síncrona. O fluxo de energia, no entanto, é reservado: um motor principal, como uma turbina eólica, fornece energia mecânica à máquina do eixo. As mesmas perdas do modo motor ocorrem, mas na operação do gerador elas devem ser subtraídas da potência de entrada mecânica. As mesmas fórmulas e relações desenvolvidas no modo motor se aplicam no modo gerador, mas o escorregamento s na operação supersíncrona torna-se negativo no sinal, assim como torque. Isso deve ser levado em consideração nos cálculos de engenharia, embora em discussões gerais com fabricantes o sinal negativo às vezes possa ser omitido (CHAPALLAZ, 1992).

Figura 20 -Fluxo de potência de uma máquina de indução operando como motor



Fonte: Reis; Rossi (2015a)

Onde:

P_1 - potência elétrica (W);

P_{fe1} - são as perdas no núcleo do estator (W);

P_{J1} - são as perdas joule no estator (W);

P_{em} - potência eletromagnética transferida do estator para o rotor (W);

P_{fe2} - são as perdas no núcleo do rotor (W);

$P_{A,V}$ - são as perdas por atrito e ventilação (W);

P_{J2} - são as perdas joule no rotor (W);

P_{mec} - potência mecânica total (W);

P_2 - é a potência disponível no eixo do motor (W).

A literatura de Chapman (2005) as perdas são apresentadas em quatro grupos distintos são eles:

I – Perdas elétricas ou no Cobre;

II – Perdas no núcleo;

III – Perdas mecânicas;

IV – Perdas diversas ou dispersão;

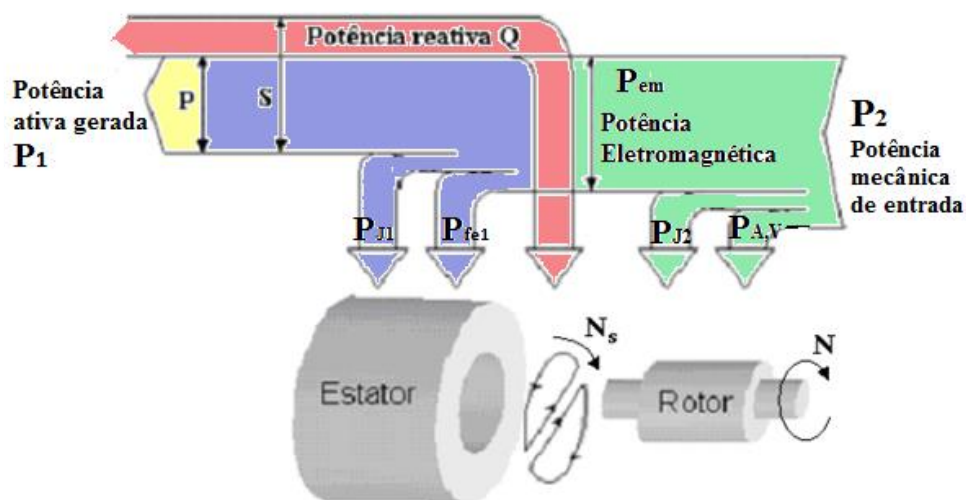
Perdas no Cobre: são perdas ocorridas devido ao aquecimento (efeito joule), que ocorrem no núcleo tanto do estator P_{J1} quanto do rotor P_{J2} . As perdas no núcleo do estator são devido a resistência do estator e do rotor devido à resistência rotórica;

Perdas no núcleo: são perdas que devido histerese e corrente de Foucault que ocorrem no ferro do motor, para o estator (P_{fe1}), e no rotor (P_{fe2}) Essas perdas variam com o quadrado do fluxo de densidade magnética para o estator e uma vez e meia a potência de rotação no campos magnéticos

Perdas mecânicas: são associadas aos efeitos mecânicos, os dois tipos básicos são atrito e ventilação ($P_{A,V}$). O atrito é a perda causada pelo atrito dos enrolamentos da máquina, já a ventilação são perdas causadas pelo atrito entre as partes móveis da máquina e o ar dentro da carcaça do motor, é estipulado que as perdas mecânicas variam conforme o cubo da velocidade de rotação da máquina.

Perdas diversas ou dispersão: são perdas que não devem ser colocadas em nenhuma das categorias acima. Não importa o quão cuidadosamente as perdas sejam contabilizadas, algumas perdas sempre passam sem serem incluídas no cálculo. Por isso essas perdas são agrupadas neste grupo, e por consenso não ultrapassam 1% da potência total da máquina.

Figura 21 - Fluxo de potência na máquina de indução no modo gerador



Fonte: Adaptado de Homrich (2013)

A potência reativa necessária para produzir um campo magnético, não pode ser gerada pelo motor primário (turbina) nem pelo próprio rotor de gaiola de esquilo (sem terminais do rotor). A máquina de indução pode, portanto, somente operar e fornecer energia ativa se estiver conectada a uma fonte externa de energia reativa. Quando conectada a uma rede com outras fontes de energia, energia reativa pode ser fornecida por geradores síncronos que trabalham em uma faixa superexcitada.(CHAPALLAZ *et al*, 1992)

4.2 LIMITAÇÕES DO GERADOR

Na obra de Chapallaz *et al* (1992), é abordado esse tópico, e como visto na seção anterior 4.1, a potência que a máquina de indução absorve no modo motor, não pode ser revertida em potência gerada no modo gerador.

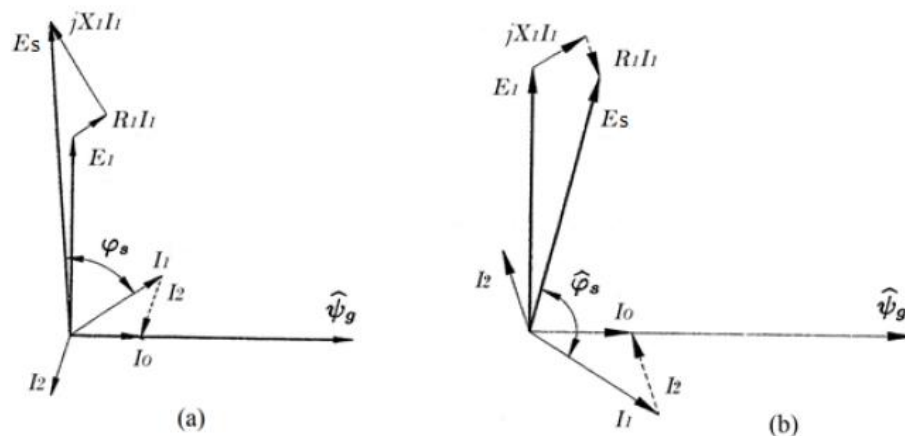
De forma teórica a potência mecânica de entrada poderia ser elevada com a finalidade de compensar as perdas e entregar uma potência elétrica mais alta, porém o fator limitante é a ocorrência de um sobreaquecimento na máquina causando sérios danos aos enrolamentos do gerador.

Fazendo uma comparação entre os fluxos de potência da máquina de indução, no modo motor Figura 20, e no modo gerador Figura 21. É observado que a potência eletromagnética P_{em} é maior no modo gerador do que no modo motor ainda que a potência aparente S seja a mesma em ambos os modos de operação. Isso ocorre, pois, a potência eletromagnética P_{em} ,

deve compensar as perdas no estator (P_{J1}, P_{fe1}), no modo gerador, mas não no modo motor. Portanto para a potência eletromagnética P_{em} , ser maior a corrente de magnetização que estabelece o campo magnético entre estator e rotor também será maior. O aumento da potência eletromagnética P_{em} , somente ocorrerá em perda na potência ativa gerada P_1 , uma vez que a potência aparente é limitada pela condição de sobrecarga (sobreaquecimento). Essa diminuição na potência ativa é observada pela queda no fator de potência $\cos\varphi$.

A ocorrência deste fato relatado acima, pode ser visto na Figura 22, onde no modo gerador a tensão induzida E_1 , deve ser maior que a tensão da rede E_s para suprir o aumento da magnetização da máquina, fazendo o fator de potência $\cos\varphi$ diminuir em relação ao modo motor.

Figura 22 - Diagramas fasoriais: (a) modo motor; (b) modo gerador



Fonte: Homrich (2013)

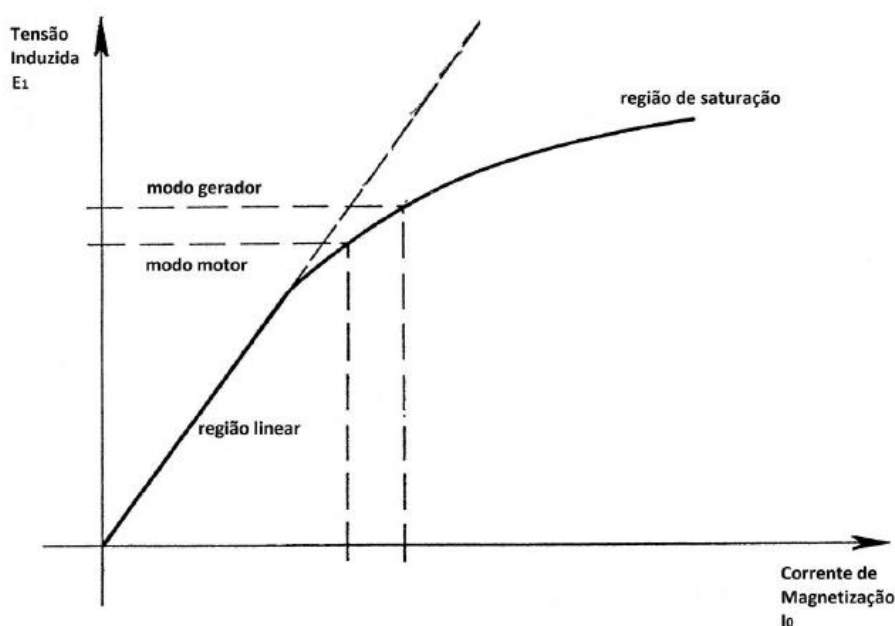
4.3 O EFEITO DA SATURAÇÃO

Um fator de potência decrescente na operação do gerador, quando comparado ao motor, torna-se ainda mais distinto devido ao efeito da saturação. O material de ferro do núcleo do estator e do rotor apresenta boa qualidade ferromagnética numa gama limitada, isto é, a indução apenas aumenta linearmente com a corrente de magnetização aplicada na bobina até um certo ponto (o joelho) de onde a curva começa a ficar plana. (CHAPALLAZ *et al*, 1992)

O aumento dos requisitos de magnetização na operação do gerador, como explicado acima, tende a mudar o ponto de operação para a faixa de saturação magnética para muitos motores de indução modernos. A fim de manter a tensão induzida E_1 no nível requerido (por exemplo E_1 menos a queda de tensão através do estator deve ainda estar perto da tensão

nominal da rede, veja a Figura 23), a corrente de magnetização e com isto a demanda de potência reativa do gerador de indução deve aumentar mais distante. O resultado é um fator de potência ruim e uma perda correspondente de energia ativa.(CHAPALLAZ *et al*, 1992)

Figura 23 - Efeito da saturação



Fonte: Homrich (2013)

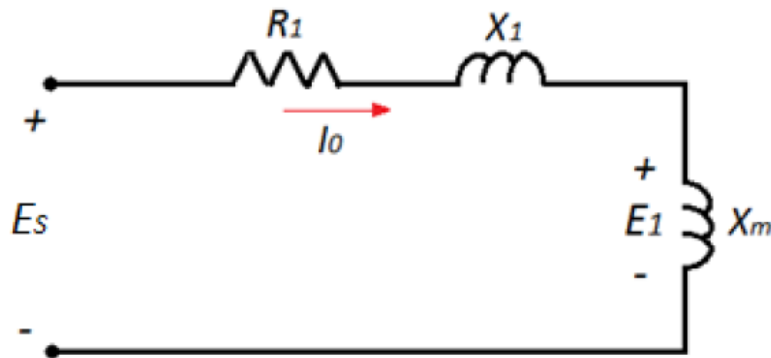
4.4 CARACTERÍSTICAS SEM CARGA

A curva de saturação sem carga da máquina é obtida na frequência nominal normal: 60Hz. A condição de operação sem carga é realizada usando um motor CC como inversor e uma fonte de tensão senoidal variável a 60Hz. A fonte de tensão é aplicada ao estator da máquina de indução enquanto seu rotor é acionado pelo motor de corrente contínua a uma velocidade constante correspondente à velocidade síncrona da máquina a 60Hz.

Costuma-se supor que a corrente de magnetização é a diferença entre a corrente do estator e a corrente do rotor referida ao estator. No presente caso, o deslizamento é muito pequeno (praticamente zero), o que implica que o ramo correspondente ao rotor no circuito equivalente pode ser considerado aberto. Logo, a corrente de ramificação magnetizante é essencialmente a corrente medida do estator sem carga.

Logo, na condição sem carga o circuito equivalente da máquina de indução será o circuito da Figura 24, já desconsideradas as perdas no núcleo(P_{fe1} , P_{fe2})(HOMRICH, 2013).

Figura 24 - Circuito para levantamento da curva de magnetização teórica



Fonte: Homrich (2013)

Em Homrich (2013), foi traçado o equacionamento para ser obtido a tensão RMS (E_1), no ramo de magnetização, calculada pela equação (27):

$$E_1 = X_m I_0 \quad (27)$$

Onde:

X_m = reatância de magnetização (Ω);

I_0 = corrente de magnetização (A);

E_1 = tensão no estator (V);

O valor da corrente de magnetização seguindo o equacionamento, depende da impedância equivalente para o escorregamento zero Z_{eq0} , é calculado pela equação (28).

$$I_0 = (E_s)/Z_{eq0} \quad (28)$$

Onde:

E_s = tensão de linha (V);

Z_{eq0} = impedância equivalente para o escorregamento zero (Ω);

I_0 = corrente de magnetização (A);

Já a impedância equivalente para escorregamento zero Z_{eq0} , é dado pela Equação (29):

$$Z_{eq0} = R_1 + j(X_1 X_m) \quad (29)$$

Onde:

Z_{eq0} = impedância equivalente para o escorregamento zero (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

R_1 = resistência do estator (Ω);

Usando um artifício matemático, é elevado ao quadrado os dois lados da equação, conforme mostrado na Equação (30):

$$Z_{eq0}^2 = R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \quad (30)$$

Onde:

Z_{eq0} = impedância equivalente para o escorregamento zero (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

R_1 = resistência do estator (Ω);

Agora o valor da reatância de magnetização X_m , é dado pela Equação (31):

$$X_m = \sqrt{(Z_{eq0}^2 - R_1^2)} - X_1 \quad (31)$$

Onde:

Z_{eq0} = impedância equivalente para o escorregamento zero (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

R_1 = resistência do estator (Ω);

E a tensão no estator E_1 é calculado pela Equação (32) ou (33):

$$E_1 = \left[\sqrt{(Z_{eq0}^2 - R_1^2)} - X_1 \right] I_0. \quad (32)$$

Onde:

Z_{eq0} = impedância equivalente para o escorregamento zero (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

R_1 = resistência do estator (Ω);

I_0 = corrente de magnetização (A);

Nessa equação, a máquina considerada foi conectada em delta, para uma máquina conectada em estrela a tensão terminal E_s deve ser dividida por $\sqrt{3}$, na Equação (33):

$$E_1 = \left[\sqrt{\left(\frac{E_s^2}{I_0^2} - R_1^2 \right)} - X_1 \right] I_0 \quad (33)$$

Onde:

Z_{eq0} = impedância equivalente para o escorregamento zero (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

R_1 = resistência do estator (Ω);

I_0 = corrente de magnetização (A);

4.5 OPERAÇÃO INTERLIGADA COM REDE

Durante a operação interligada com a rede com a frequência constante em 60Hz a máquina de indução poderá operar como motor, freio ou gerador apenas o valor do escorregamento definirá em qual modo de operação ela atuará.(HOMRICH, 2013)

O conjugado eletromagnético correspondente à potência transferida através do entreferro pode ser obtido a partir da Equação (34):

$$T_{mec} = \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (34)$$

Onde:

T_{mec} = o conjugado eletromagnético em (N.m);

P_{em} = potência eletromagnética que representa a potência transferida ao circuito do rotor em (W);

ω_s = velocidade angular síncrona (rad/s);

Já a potência eletromagnética é obtida pela Equação (35)

$$P_{em} = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \quad (35)$$

Onde:

P_{em} = potência eletromagnética (W);

n_{fases} = o número de fases;

I_2 = a corrente referida ao circuito do rotor (A);

R_2 = a resistência do rotor (Ω);

s = escorregamento;

As perdas joule associadas ao circuito do rotor P_{J2} são calculadas pela Equação (36):

$$P_{J2} = n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (36)$$

Onde:

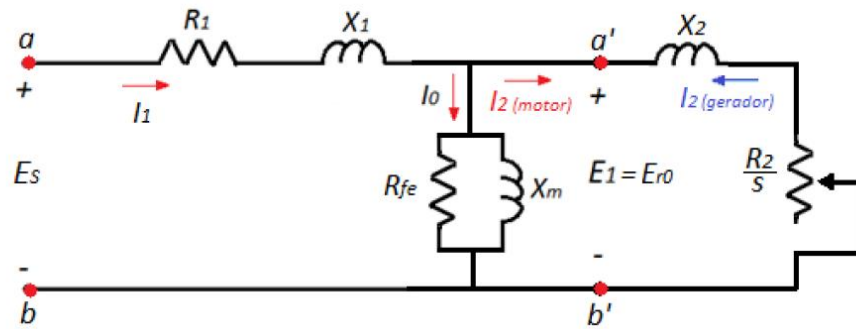
P_{J2} = perdas joule no rotor em (W);

n_{fases} = numero de fases da máquina;

I_2 = corrente no rotor em (A);

R_2 = resistência no rotor (Ω);

Figura 25 - Circuito equivalente monofásico da máquina de indução



Fonte: Homrich (2013)

Ainda em Homrich (2013), a potência mecânica P_{mec} é determinada pelo resultado da subtração da potência eletromagnética pela perda de potência joule no rotor, resultando nas Equações (37) e (38).

$$P_{mec} = P_{em} - P_{J2} = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) - n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (37)$$

$$P_{mec} = P_{em} - P_{J2} = n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (38)$$

Onde:

P_{mec} = potência mecânica total em (W);

P_{em} = potência eletromagnética transferida do estator para o rotor;

P_{J2} = perdas joule no rotor em (W);

n_{fases} = número de fases da máquina;

I_2 = corrente do rotor em (A);

R_2 = resistência do rotor em (Ω);

s = escorregamento da máquina;

Voltando à Equação (35), a parcela de potência mecânica desenvolvida P_{mec} e as perdas joule P_{J2} envolvidas no circuito do rotor serão as seguintes frações da potência de entreferro, calculadas pelas Equações (39) e (40):

$$P_{mec} = (1 - s)P_{em} \quad (39)$$

$$P_{J2} = sP_{em} \quad (40)$$

Onde:

P_{mec} = potência mecânica total (W);

P_{em} = potência eletromagnética transferida do estator para o rotor (W);

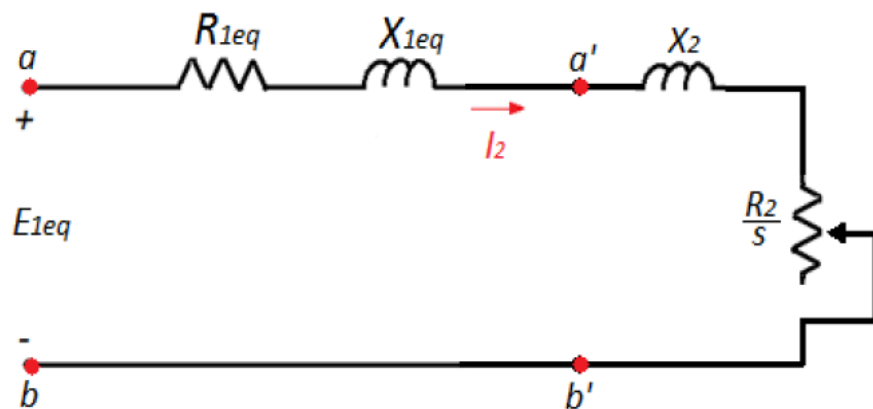
P_{J2} = perdas joule no rotor (W);

s = escorregamento da máquina;

4.6 CIRCUITO EQUIVALENTE POR THÉVENIN

Na obra de Chapman, (2005), é estruturado um modelo simplificado para o circuito equivalente da máquina de indução, através do teorema de Thévenin. Esse modelo simplificado tornará fácil a compreensão do circuito, e possibilita encontrar os valores de tensão equivalente e impedância do estator equivalente.

Figura 26 - Modelo do MIT após simplificação usando o teorema de Thévenin



Fonte: Homrich (2013)

Já em Homrich (2013), é definido a tensão equivalente E_{1eq} pelo teorema de Thévenin, com a remoção dos circuitos do rotor e a vista pelos terminais a' e b', é dado pela Equação (41):

$$E_{1eq} = \frac{(R_{fe}/X_m)E_s}{(R_1 + jX_1) + (R_{fe}/X_m)} \quad (41)$$

Onde:

E_{1eq} = tensão equivalente (V);

R_{fe} = resistência de magnetização (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

E_s = tensão na linha (V);

R_1 = resistência do estator (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

Também por Homrich (2013), é definido a impedância do estator equivalente Z_{1eq} , vista em direção à fonte, é calculado pela Equação (42)

$$Z_{1eq} = (R_1 + jX_1) // (R_{fe} // jX_m) = R_{1eq} + jX_{1eq} \quad (42)$$

Onde:

Z_{1eq} = impedância equivalente do estator (Ω);

R_{1eq} = resistência equivalente do estator (Ω);

X_{1eq} = reatância equivalente do estator (Ω);

R_1 = resistência do estator (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

R_{fe} = resistência de magnetização (Ω);

E a impedância equivalente entre os pontos a e b, pode ser calculada segundo Homrich, (2013), pela Equação (43):

$$Z_{ab} = (R_1 + jX_1) + [(\frac{R_2}{s} + jX_2) // (R_{fe} // jX_m)] \quad (43)$$

Onde:

Z_{ab} = impedância equivalente entre os pontos a e b (Ω);

R_1 = resistência do estator (Ω);

X_1 = reatância do estator (Ω);

R_2 = resistência no rotor (Ω);

X_2 = reatância do rotor (Ω);

X_m = reatância de magnetização (Ω);

R_{fe} = resistência de magnetização (Ω);

s =escorregamento da máquina;

4.7 CARACTERIZAÇÃO EM REGIME PERMANENTE EM MODO GERADOR

No trabalho de Homrich (2013), é abordado que a operação como motor da máquina de indução ocorre para escorregamentos entre zero e um ($1 \geq s \geq 0$), por isso o equacionamento apresentado a seguir valerá apenas quando a máquina de indução ultrapassa a velocidade síncrona e passa a operar como gerador.

Para determinar a corrente no rotor na operação como gerador, é dado pela Equação (44):

$$I_{2(gerador)} = -\frac{Z_m}{Z_m + Z_r} \left(\frac{E_s}{Z_{ab(gerador)}} \right) \quad (44)$$

Onde:

$I_{2(gerador)}$ = corrente no rotor no modo gerador (A)

Z_m = impedância do circuito de magnetização (Ω)

Z_r = impedância do circuito do rotor (Ω)

$Z_{ab(gerador)}$ = impedância equivalente do circuito com escorregamento negativo (Ω)

Já a tensão no estator no modo gerador segundo Homrich (2013), é dado pela Equação (45):

$$E_{1(gerador)} = \left(\frac{E_s}{Z_{ab(gerador)}} + I_{2(gerador)} \right) Z_m \quad (45)$$

Onde:

$E_{1(gerador)}$ = tensão do estator no modo gerador (V);

E_s = tensão do estator entre os pontos a e b (V);

$I_{2(gerador)}$ = corrente no rotor no modo gerador (A);

Z_m = impedância do circuito de magnetização (Ω);

$Z_{ab(gerador)}$ = impedância equivalente do circuito com escorregamento negativo (Ω);

Portanto segundo Homrich (2013), o conjugado eletromecânico da máquina de indução no modo gerador vem através da combinação das Equações (45), (36) e (35), resultando na Equação (46) e a potência mecânica pelas Equações (44), (35) e (39), resultando na Equação (47):

$$T_{mec(gerador)} = \frac{n_{fases}}{\omega_s} \left[(I_{2(gerador)})^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \right] \quad (46)$$

$$P_{mec(gerador)} = n_{fases} (1 - s) \left[(I_{2(gerador)})^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \right] \quad (47)$$

Onde:

$T_{mec(gerador)}$ = conjugado eletromecânico no modo gerador (N.m);

$P_{mec(gerador)}$ = potência mecânica no modo gerador (W);

n_{fases} = número de fases da máquina;

s =escorregamento da máquina;

$I_{2(gerador)}$ = corrente no rotor no modo gerador (A);

R_2 =resistência do rotor em (Ω);

4.8 TUTORIAL PARA CONEXÃO DO GERADOR A REDE

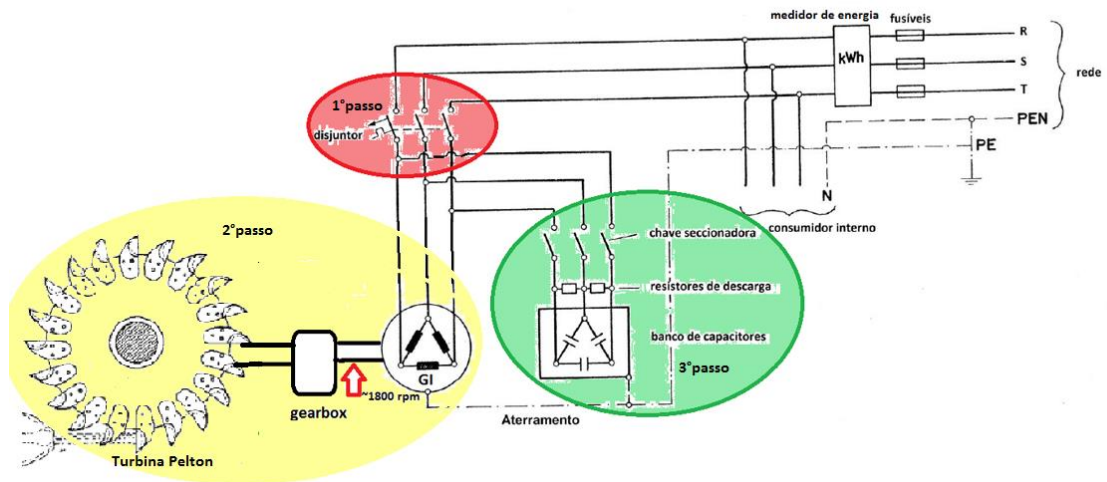
Em Chapallaz *et al* (1992), é definido um método para a conexão do gerador à rede, ao contrário do gerador síncrono o IMAG não necessita ser sincronizado com a tensão, frequência e ângulo de fase da rede. A seguir foi elaborado um tutorial com três passos para efetuar a conexão do gerador à rede:

1º passo: O disjuntor que conecta a rede elétrica ao gerador é fechado, nesse momento a máquina de indução opera como motor, pois a turbina tipo pelton ainda não atingiu a velocidade super-síncrona acima dos 1800 RPM.

2º passo: A turbina pelton é acelerada até obter a velocidade super-síncrona, nesse instante a máquina de indução passa a operar como gerador.

3º passo: Por fim a conexão com o banco de capacitores é realizada, visando a melhoria no fator de potência e o fornecimento de reativos para sustentação do campo magnético estático.

Figura 27 - Gerador de Indução interligado a rede



Fonte: Adaptado de Homrich (2013)

4.9 EQUILÍBRIO DA DEMANDA DE POTÊNCIA REATIVA

O equilíbrio da demanda de potência reativa é um tema discutido na obra de Chapallaz *et al* (1992), um banco de capacitores bem ajustado ao sistema de geração é capaz de melhorar o fator de potência, os capacitores formam com os enrolamentos do gerador de indução um circuito de ressonância, fazendo com que a potência reativa oscile apenas entre os capacitores do banco e o gerador de indução. Isto melhora a rede pois a corrente reativa não será despejada nela, e com efeito as perdas de transmissão são reduzidas.

O valor da capacitância requerida é dado pela Equação (48)

$$C_{fase} = \frac{\Delta Q}{3V_L^2(2\pi f)} \quad (48)$$

Onde:

V_L = Tensão de linha (quando capacitores estão conectados em delta), (V);

f = frequência da rede (Hz);

ΔQ = potência reativa a ser compensada (Var);

Segundo Homrich (2013), a potência reativa a ser compensada pode ser encontrada pela Equação (49)

$$\Delta Q = Q_{Potencia\ reativa\ antes\ da\ compensação} - Q_{Potencia\ reativa\ depois\ da\ compensação}$$

$$\Delta Q = P_{em}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (49)$$

Onde:

φ_1 - o ângulo entre a tensão e a corrente antes a compensação;

φ_2 - o ângulo entre tensão e a corrente após a compensação;

P_{em} – potência eletromagnética (W);

O fator de potência da máquina de indução, operando no modo motor é um dado de placa fornecido pelo fabricante, porém no modo gerador o mesmo deve ser encontrado. É fato conhecido que há uma queda no fator de potência na máquina de indução quando a mesma passa do modo motor para o modo gerador, sendo a principal causa o aumento no consumo de potência reativa para alimentar o campo, por isso características construtivas da máquina de indução como por exemplo o tipo da barra rotórica e a saturação magnética são importantes pois diminuem as perdas da máquina (HOMRICH, 2013).

5 REGULAÇÃO DE TENSÃO

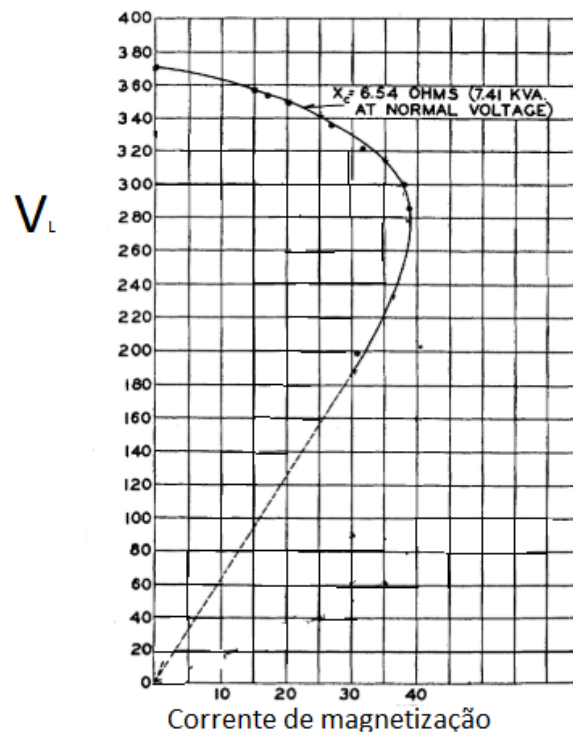
Neste capítulo, será desenvolvida uma abordagem sobre um dos maiores problemas do gerador de indução, que é o fato da tensão não se manter constante durante a variação da carga. Para solucionar esse problema será visto de forma sucinta adiante algumas técnicas de regulação de tensão, que serão apresentadas seguindo a lógica da menor para a maior complexidade.

5.1 MOTIVOS PARA REGULAÇÃO

Uma característica conhecida do gerador de indução é a sua má regulação de tensão quando há variação de carga. O gerador de indução com os capacitores conectados em seus terminais, quando desconectados da rede elétrica o campo estatórico continua a girar e a tensão terminal gerada pela auto excitação irá depender da velocidade que o campo girante estatórico se encontra, do valor de carga do capacitor e da carga que estava conectada. A tensão pode atingir valores perigosamente altos, atentando contra à vida humana e ocasionando danos ao isolamento do gerador de indução(WAGNER, 1939).

A Figura 28 ilustra o comportamento no caso de uma variação de carga, na qual fica evidente a regulação deficitária do gerador de indução

Figura 28 - Curva característica do comportamento da tensão em função do aumento de carga em um gerador de indução isolado



Fonte: Adaptado de Wagner (1939).

Onde:

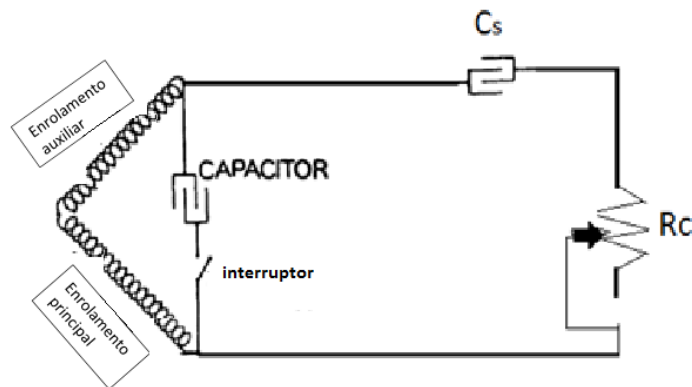
V_L = tensão gerada pela máquina de indução [V];

A Figura 28, demonstra que o gerador de indução ao tentar atender a demanda de carga crescente conectada aos seus terminais e fixando a velocidade rotórica, o gerador produzirá uma queda em sua frequência estatórica para consequentemente aumentar o escorregamento elevando dessa forma o conjugado para atender a carga crescente.(MARRA; POMILIO, 2000)

5.1.1 Regulação por capacitor em série

Consiste na inserção de um capacitor em série com a carga conforme mostra a Figura 29.

Figura 29 - Método do capacitor em série



Fonte: Adaptado de Potter; Basset (1935).

Onde:

Capacitor = capacitor para autoexcitação do gerador de indução [$\mu\text{F}/\text{fase}$].

Cs = capacitor série [$\mu\text{F}/\text{fase}$].

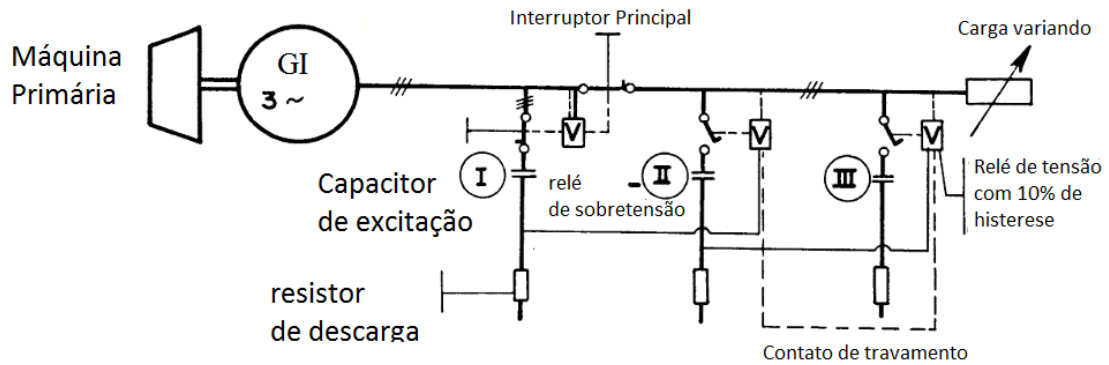
Rc = resistência da carga [Ω/fase].

Nesta arquitetura, a inclusão do capacitor em série fará com que a capacitância em relação aos enrolamentos do gerador aumente. Logo, quando houver um aumento na resistência da carga Rc deverá consequentemente ocorrer um aumento no capacitor série Cs.(HOMRICH, 2013)

5.1.2 Regulação por capacitores escalonados

Na literatura de Chapallaz *et al*, (1992), é demonstrado a necessidade de manter a tensão do gerador de indução a limites aceitáveis, isto se mostra ainda mais relevante quando cargas indutivas são conectadas ao sistema. Nesse cenário o controle de tensão no gerador de indução deve ser feito através de capacitores fornecendo a potência reativa necessária.

Figura 30 - Regulação por chaveamento escalonado de capacitores

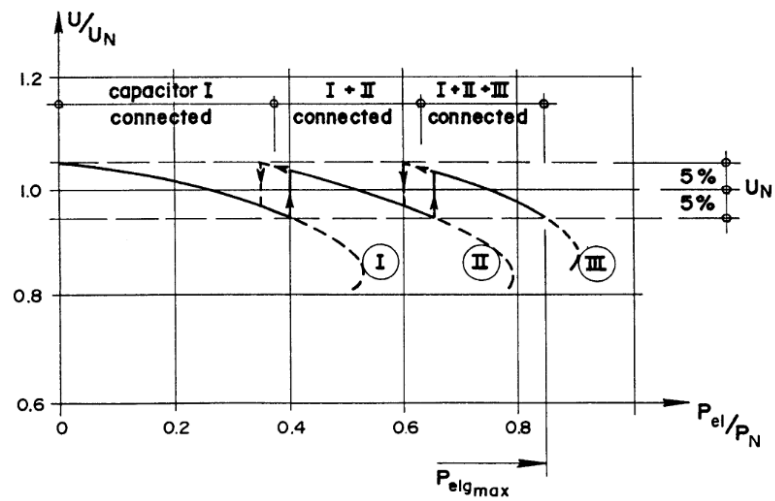


Fonte: Chapallaz *et al* (1992)

Na Figura 30, é observado o esquemático da regulação por chaveamento escalonado de capacitores. Antes da carga ser conectada o gerador de indução (GI), o capacitor I é conectado para estabelecer uma tensão nominal. Com o aumento da carga ocorre a queda de tensão nos terminais do gerador como mostrado por Wagner, (1939), para restabelecer a tensão a níveis aceitáveis capacitores II e III são conectados fornecendo potência reativa para o gerador de indução.

Os interruptores são comutados por relés eletrônicos de tensão, que por sua vez são atuados dentro de uma faixa de valor mínimo e máximo de tensão. Os relés utilizados no esquemático desenvolvido por Chapallaz *et al* (1992), e vistos na Figura 30 são relés com histerese de 10% que proporcionam uma variação na tensão de 5% na tensão nominal do GI.

Figura 31 - Resultados da regulação por chaveamento escalonado de capacitores

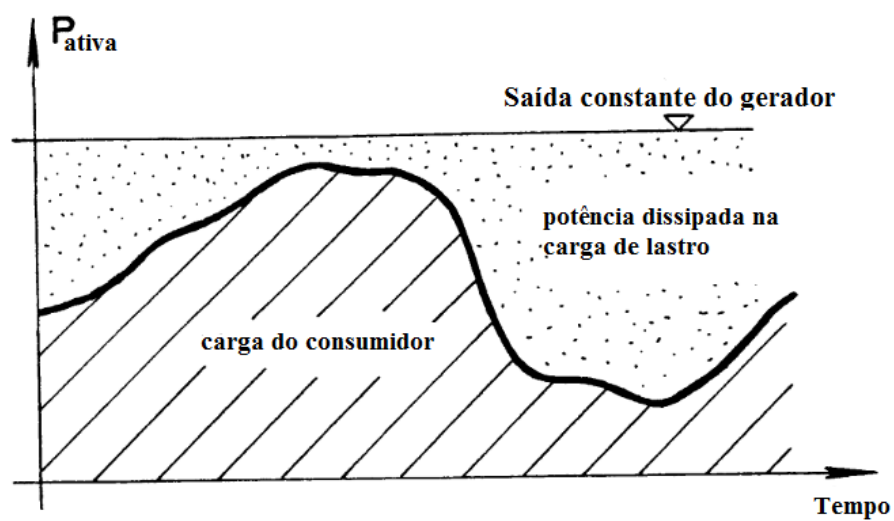


Fonte: Chapallaz *et al* (1992)

5.1.3 Regulação por controle de carga

Esse método, segundo Chapallaz *et al* (1992) tem a finalidade de manter constante a saída de potência ativa, do gerador de indução, para isso é inserida no sistema uma carga de lastro, cuja a função é equilibrar a quantidade de energia ativa nas eventuais flutuações do sistema. A Figura 32 ilustra esse raciocínio.

Figura 32 - Gráfico Potência ativa x Tempo



Fonte: Chapallaz *et al* (1992)

Ainda na literatura de Chapallaz *et al* (1992), um esquemático desse controle de carga é desenvolvido, basicamente consiste em quatro etapas, são elas:

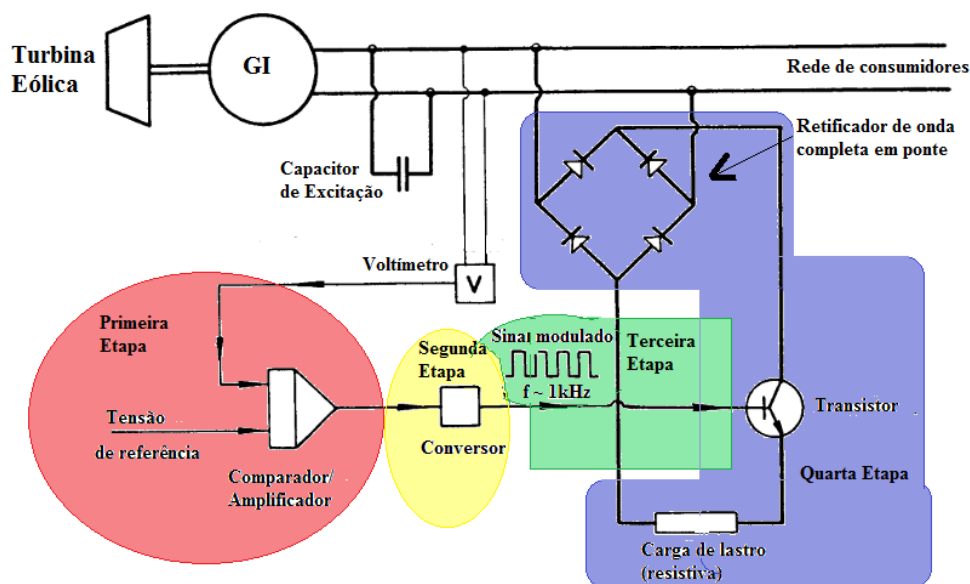
Primeira Etapa: Um comparador irá comparar a tensão gerada com a tensão nominal (valor de referência);

Segunda Etapa: Havendo uma diferença de tensão, o comparador enviará um sinal correspondendo a diferença de tensão detectada, para um conversor;

Terceira Etapa: Nesse conversor o sinal será modulado, para uma forma de onda retangular, como a largura de pulso deste sinal é proporcional a diferença de tensão, o conversor escolhido é o PWM (pulse width modulation);

Quarta Etapa: O sinal modulado, irá comutar um transistor, que nesse caso opera com um interruptor eletrônico, abrindo e fechando de acordo com a taxa de modulação do sinal. O circuito da carga de lastro ficará aberto durante o tempo do sinal modulado. Vale ressaltar que o transistor permitirá que a corrente siga apenas um sentido, portanto a corrente alternada de saída do gerador deverá ser retificada, com um retificador de onda completa composto por 4 diodos;

Figura 33 - Esquemático da regulação por controle de carga dividido em etapas

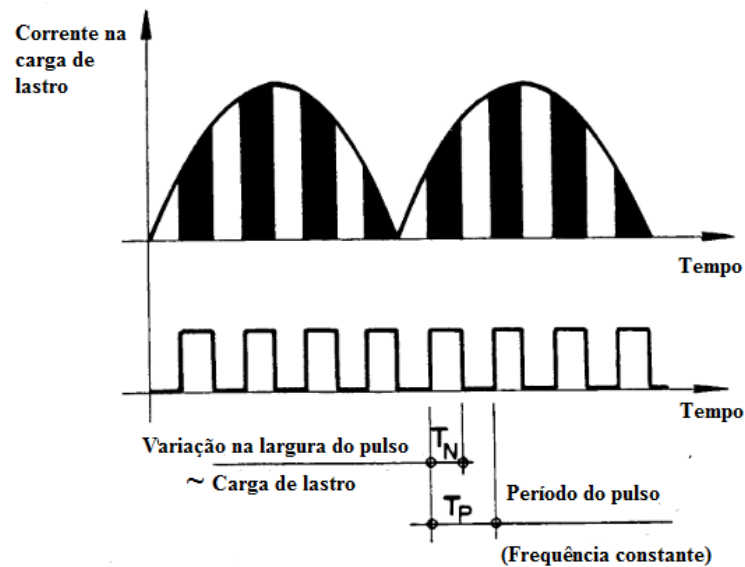


Fonte: Adaptado de Homrich (2013)

As figuras 34 e 35 a seguir ilustram o funcionamento da modulação PWM, com a carga de lastro, observe na Figura 35 que durante o instante em que há uma queda de tensão ao nível

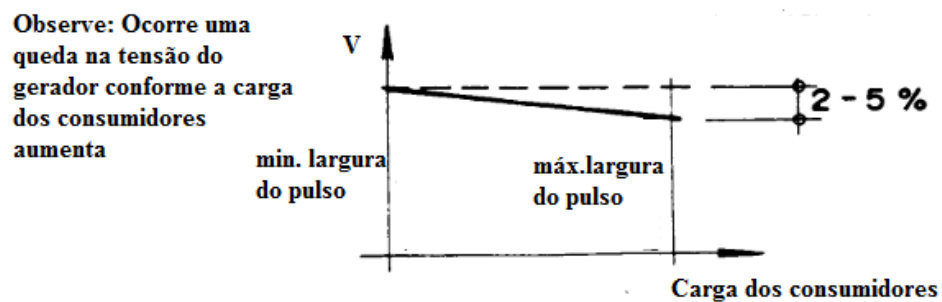
mínimo, o pulso terá a maior largura, que configura o fechamento do transistor para a corrente ir no sentido da carga de lastro.(CHAPALLAZ *et al*, 1992)

Figura 34 - Comparação da corrente na carga de lastro com variação PWM



Fonte: Homrich (2013).

Figura 35 - Gráfico da variação de tensão no gerador com a carga dos consumidores



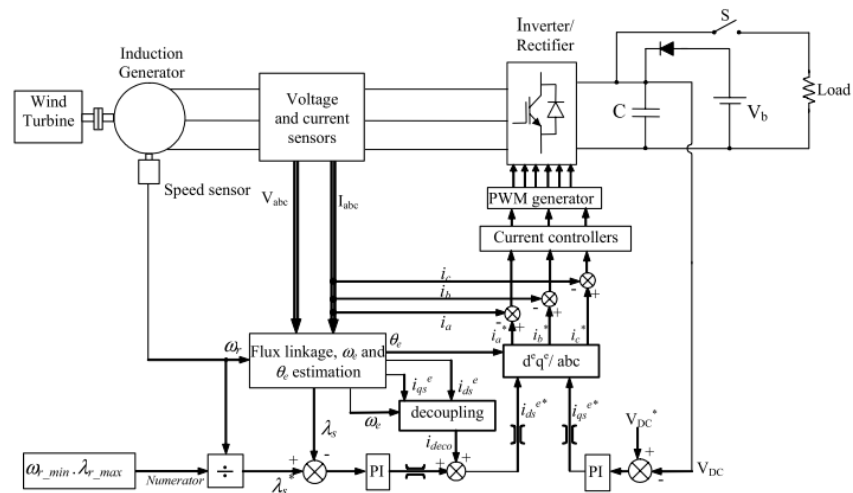
Fonte: Homrich, (2013).

5.1.4 Regulação por controle vetorial

No artigo de Seyoum; Grantham; Rahman (2003), é demonstrado a possibilidade de controlar a variação de tensão do gerador de indução através da técnica de controle vetorial.

Essa técnica é aplicada quando ocorrem variações na carga elétrica e na velocidade do rotor dentro de faixas pré-definidas, e basicamente consiste em variar o fluxo (estator e rotor) do gerador de indução quando a velocidade do rotor é variada. Uma carga DC é conectada direto ao capacitor DC e uma carga AC poderá ser alimentada por um inversor do lado da carga, que fornecerá frequência e tensão constantes. A Figura 36 ilustra esse método.

Figura 36 - Interconexão de controle vetorial orientada ao estator



Fonte: Seyoum; Grantham; Rahman (2003).

6 MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão feitas a modelagem e as simulações da máquina de indução. Para a modelagem do circuito ser feita, os parâmetros do circuito devem ser levantados, para isso se faz necessário alguns ensaios em laboratório, são eles:

Ensaio a vazio;

Ensaio com rotor bloqueado;

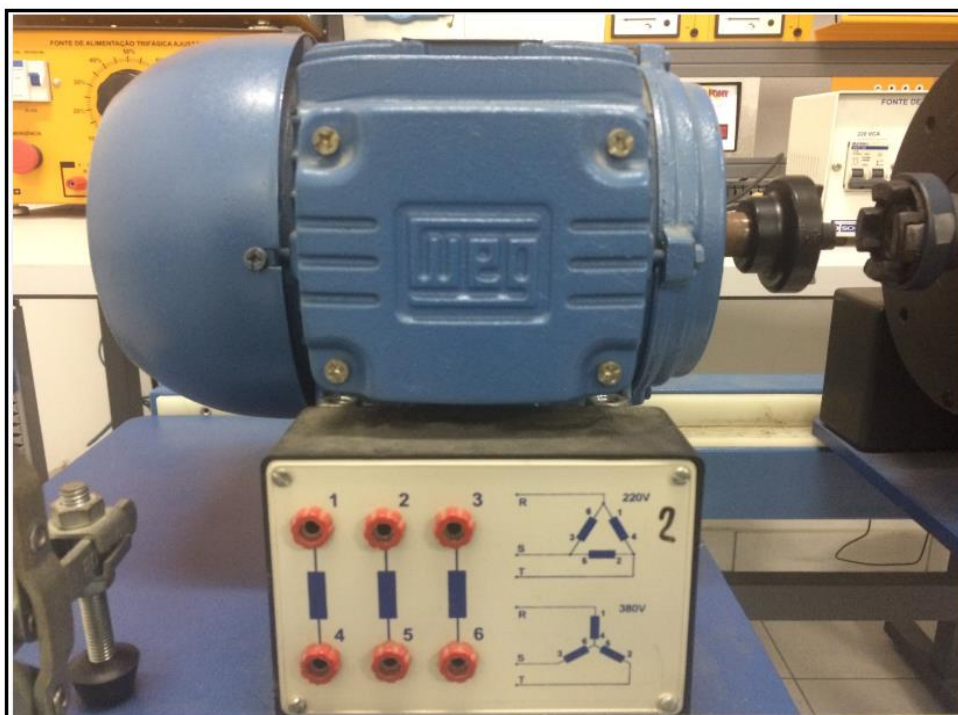
Ensaio a velocidade síncrona;

Após o levantamento dos parâmetros da máquina, será realizado a simulação no Matlab, que fornecerá as curvas de operação da máquina de indução.

6.1 MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS

Os ensaios realizados em laboratório foram desenvolvidos utilizando a máquina de indução WEG. Segue a imagem na Figura 37 com os dados apresentados no Quadro 2 com seus dados de placa. A foto da Figura 37 destaca a placa do motor adotado nas simulações.

Figura 37 - Motor de indução WEG, modelo W22 - IR2, 4 pólos, 0,75kW



Fonte: do autor

Quadro 2 - Dados de placa do motor utilizado para os ensaios

DADOS DE PLACA DA MÁQUINA					
1 CV	0,75 Kw		60 HZ		1720 rpm
Ip/In. 7,2	ISOL.B	CAT. N	REG. S1	IP. 55	F.S. 1,15
RENDIMENTO. 79,5			COS ϕ 0,82		
 W2 U2 V2 U1 V1 W1 R S T L1 L2 L3 220 V -			 W2 U2 V2 U1 V1 W1 L1 L2 L3 380 V		

Fonte: do autor

Fotografia 1 - Dados de placa do motor

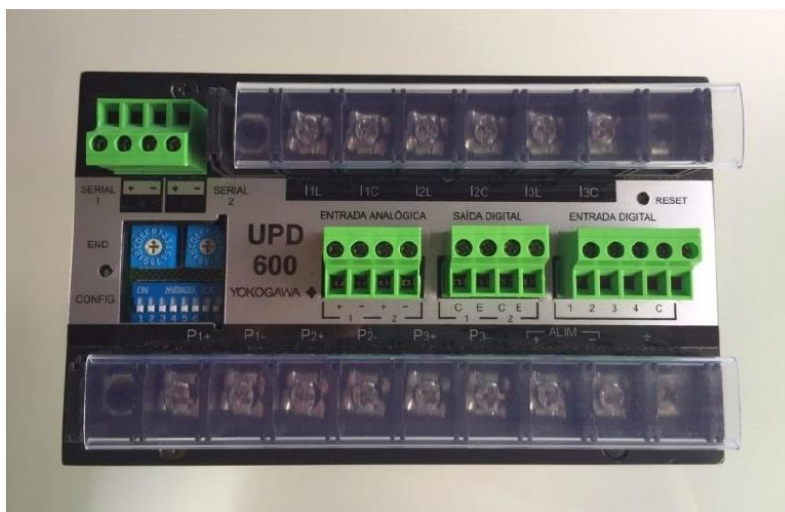


Fonte: do autor

Os instrumentos listados a seguir, foram utilizados nas medições elétricas e de velocidade na operação da máquina de indução.

Medidor digital de tensão, corrente, potências: ativa e reativa, ilustrado na Fotografia 2.

Fotografia 2 - Medidor de grandezas elétricas Yokogawa



Fonte: do autor

Fabricante: Yokogawa

Tipo: Digital Power Meter

Modelo: UPD 600

Resolução: 16 bits

Tacômetro.

Fotografia 3 -Tâcometro utilizado



Fonte: do autor

Fabricante: Instrutemp

Faixas: 0.5 a 19999RPM (contato)

Precisão: $\text{RPM} \pm(0.05\% \text{Leit.} + 1 \text{Díg})$

Resolução: 0.1 RPM

Multímetro digital

Fotografia 4 - Multímetro digital utilizado



Fonte: do autor

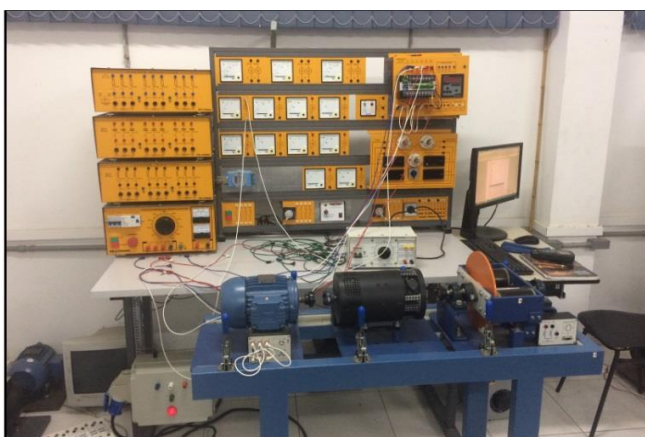
Fabricante: Minipa

Modelo: 1100

Resolução: $300 \mu\Omega$ (escala 300 ohms)

Bancada de ensaios montada é mostrada na Fotografia 5.

Fotografia 5 - Bancada para os ensaios montada



Fonte: do autor

6.2 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ESTATÓRICA

Na máquina de indução deste ensaio as bobinas do estator foram fechadas em delta. A medição da resistência (R_{med}) é definida através da aferição das resistências ($r_{1\Delta f}$) referentes a duas das fases ligadas em série e conectadas em paralelo com a terceira (REIS; ROSSI, 2015).

O cálculo do valor das resistências por fase, é fornecido através das equações (50) e (51):

$$R_{med} = (r_{1\Delta f} + r_{1\Delta f}) // r_{1\Delta f} \quad (50)$$

$$r_{1\Delta f} = \frac{3}{2} R_{med} \quad (51)$$

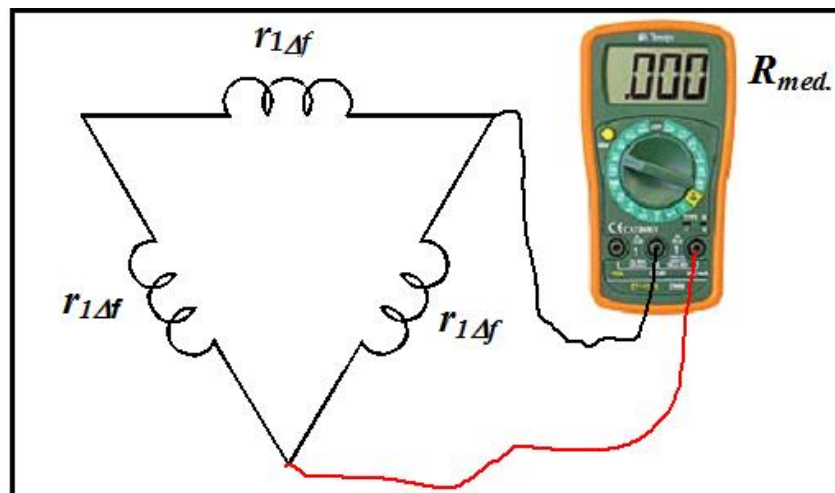
Onde:

R_{med} = resistência estatórica medida em (Ω);

$r_{1\Delta f}$ = resistência estatórica por fase em (Ω);

A Figura 38 ilustra a medição da resistência estatórica para a conexão em delta das bobinas do estator

Figura 38 - Medição da resistência estatórica para conexão delta



Fonte: Reis; Rossi (2015a)

O valor da resistência (R_{med}), é encontrado através três medidas da resistência uma em cada enrolamento. E o valor (R_{med}) é obtido, através da média dos valores encontrados nas 3 fases (HOMRICH, 2013). Os resultados estão a seguir:

Tabela 1 - Medidas de resistência do estator

	R1 (Ω)
Enrolamento U1 - U2	5,52
Enrolamento V1 - V2	5,53
Enrolamento W1 - W2	5,6
Média	5,55

Fonte: do autor

6.3 ENSAIO A VAZIO

Durante a operação em vazio da máquina de indução, apenas a massa do rotor e o ventilador da máquina compõem a carga mecânica da máquina. Desse modo a componente ativa da corrente em vazio que é referente às perdas por histerese e correntes parasitas, terá um aumento referente a esta carga mecânica do rotor e ventilador.

A operação em vazio servirá para serem levantados os parâmetros do ramo magnetizante da máquina de indução, para isso é necessário encontrar o valor das perdas em vazio (REIS; ROSSI, 2015a).

A perda em vazio é mostrada na Equação (52):

$$P_0 = P_H + P_F + P_J + P_{AV} \quad (52)$$

Onde:

P_0 = Perdas em vazio em (W);

P_H = Perdas por histerese em (W);

P_J = Perdas joule no motor em (W);

P_{AV} = Perdas por atrito e ventilação em (W);

Com o valor da corrente em vazio é possível obter as perdas joule no estator através da Equação (53):

$$P_{Jo,1} = 3r_{1\Delta f} I_{1f}^2 \quad (53)$$

Onde:

$P_{Jo,1}$ = Perdas joule no estator em (W);

I_{1f} = corrente no estator por fase em (A);

$r_{1\Delta f}$ = resistência estatórica por fase (A);

6.3.1 Determinação dos parâmetros do ramo magnetizante

A corrente em vazio encontrada no ensaio, deve ser decomposta em duas componentes. A primeira componente é a responsável pelas perdas no núcleo e é denominada de componente wattada (I_p), já a segunda componente é responsável por estabelecer o fluxo magnético na máquina e é denominada de componente dewattada (I_q).

Para decompor a corrente em vazio, é necessário encontrar o ângulo de fator de potência em vazio (φ_0) (REIS; ROSSI, 2015a).

O fator de potência em vazio é fornecido pela Equação (54):

$$\cos(\varphi_0) = \frac{P_o}{\sqrt{3} V_{o(L)} I_{o(L)}} \quad (54)$$

Onde:

φ_0 = ângulo do fator de potência em vazio (graus);

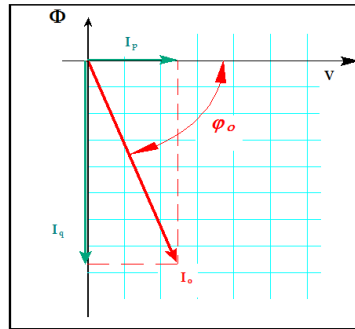
P_o = Perdas em vazio (W);

$V_{o(L)}$ = tensão de linha em vazio (V);

$I_{o(L)}$ = corrente de linha em vazio (A);

A Figura 39 ilustra a decomposição da corrente em vazio em função do ângulo do fator de potência em vazio.

Figura 39 - Decomposição da corrente em vazio do motor de indução trifásico



Fonte: Reis; Rossi (2015a)

Os cálculos dos parâmetros do ramo magnetizante segundo Reis; Rossi, (2015), são elaborados a seguir.

A impedância do ramo magnetizante é fornecida pela Equação (55):

$$Z_{mf} = \frac{V_{of}}{I_{of}} \quad (55)$$

Onde:

Z_{mf} = impedância do ramo magnetizante em (Ω);

V_{of} = tensão de fase em vazio (V);

I_{of} = corrente de fase em vazio (A);

Já a resistência do ramo magnetizante no modelo paralelo, é dado pela Equação (67):

$$R_{mpf} = \frac{P_{fe(f)}}{I_{p(f)}^2} \quad (56)$$

Onde:

R_{mpf} = resistência do ramo magnetizante modelo paralelo por fase (Ω);

$I_{p(f)} \Rightarrow$ é a componente wattada da corrente por fase, responsável pelas perdas no núcleo (A);

$P_{fe(f)} \Rightarrow$ são as perdas no ferro (histerese e Foucault) por fase (W).

A reatância do ramo magnetizante para o modelo paralelo, será dado pela Equação (68):

$$X_{mf} = \frac{V_{of}}{I_{qf}} \quad (57)$$

Onde:

X_{mf} = reatância do ramo magnetizante modelo paralelo por fase (Ω);

V_{of} = tensão de fase em vazio (V);

$I_{q(f)}$ = é a componente de wattada da corrente, por fase, responsável pelo estabelecimento do fluxo magnético girante (A);

A tabela 2 contém os valores de todas as medidas realizadas no ensaio.

Tabela 2 - Resultados do ensaio a vazio

Ensaio a vazio				
Vo [V]	Io [A]	F. P	Nr (RPM)	Po (W)
212,5	1,73	0,12	1798	84
202,9	1,6	0,12	1797	70
183	1,41	0,13	1797	62
157	1,2	0,14	1797	48
131	0,99	0,17	1796	38
89	0,7	0,23	1794	25

Fonte: do autor

Onde:

Vo = tensão em vazio (V);

Io = corrente em vazio (A);

F. P = fator de potência;

Nr = velocidade do rotor (RPM);

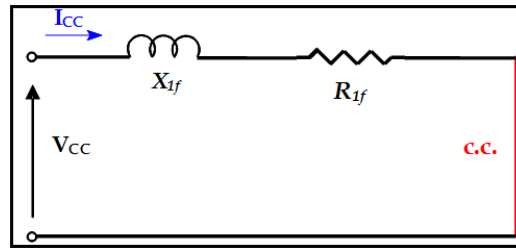
Po = potência em vazio (W);

6.4 ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO

Este ensaio permite o levantamento dos parâmetros do rotor e também fornece a perda Joule nominal. Durante este ensaio é efetuado o bloqueio do eixo do motor, a tensão aplicada nos enrolamentos do motor deve ser em torno de 10% do valor nominal, assim as perdas magnéticas serão mínimas, e possibilitará o estabelecimento da corrente nominal nos enrolamentos do motor. Neste cenário ocorrem exclusivamente as perdas Joule nominais (REIS; ROSSI, 2015a).

Para efetuar os cálculos dos parâmetros da dispersão da máquina, circuito equivalente definido pelo ensaio em curto circuito, permite uma melhor visualização dos aspectos e está ilustrado na Figura 40.

Figura 40 - Circuito equivalente do ensaio em curto circuito



Fonte: Reis; Rossi (2015a)

Os cálculos dos fatores de dispersão segundo Reis; Rossi, (2015a), são representados a seguir.

A impedância do MIT para o circuito referido ao estator, pode ser calculado pelas Equações(58) ou (59):

$$Z_{1f} = \sqrt{(R_{1f}^2 + X_{1f}^2)} \quad (58)$$

$$Z_{1f} = \frac{V_{f(cc)}}{I_{f(cc)}} \quad (59)$$

Onde:

Z_{1f} = impedância referida ao estator por fase (Ω);

R_{1f} = resistência total referida ao estator por fase (Ω);

X_{1f} = reatância total referida ao estator por fase (Ω);

$V_{f(cc)}$ = tensão de curto circuito por fase (V);

$I_{f(cc)}$ = corrente de curto circuito por fase (A);

Já a resistência total referida ao estator é fornecido pela Equação (60):

$$R_{1f} = r_{1\Delta f} + r'_{2f} \quad (60)$$

Onde:

R_{1f} = resistência total referida ao estator (Ω);

$r_{1\Delta f}$ = resistência estatórica por fase (Ω);

r'_{2f} = resistência rotórica por fase referida ao estator (Ω);

E a reatância de dispersão referida ao estator do motor é dada pela Equação (61):

$$X_{1f} = \sqrt{(Z_{1f}^2 - R_{1f}^2)} \quad (61)$$

Onde:

X_{1f} = reatância de dispersão referida ao estator do motor (Ω);

Z_{1f} = impedância referida ao estator por fase (Ω);

R_{1f} = resistência total referida ao estator (Ω);

Para obter-se as reatâncias do estator (x_{1f}) e do rotor (x_{2f}), recorre-se às recomendações constantes na norma IEEE St112 – 1984 (IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators), que estabelece:

Para motores categoria A, D e tipo rotor bobinado, utiliza-se a Equação (62):

$$\frac{X_{1f}}{X_{2f}} = 1 \quad (62)$$

Para motores categoria N, utiliza-se à Equação (63);

$$\frac{X_{1f}}{X_{2f}} = 0,67 \quad (63)$$

Para motores categoria C, utiliza-se à Equação (64);

$$\frac{X_{1f}}{X_{2f}} = 0,43 \quad (64)$$

Uma alternativa a ser utilizada para o caso de não se obter a informação sobre a categoria do motor sob ensaio é utilizarem-se as Equações (65), (66) e (67).

$$\frac{r_{1f}}{r_{2f}} = \frac{x_{1f}}{x_{2f}} \quad (65)$$

$$\frac{r_{1f} + r_{2f}}{r_{2f}} = \frac{x_{1f} + x_{2f}}{x_{2f}} \Rightarrow \frac{R_{1f}}{r_{2f}} = \frac{X_{1f}}{x_{2f}}$$

$$x_{2f} = \frac{X_{1f}}{R_{1f}} r_{2f} \quad (66)$$

$$x_{1f} = X_{1f} - x_{2f} \quad (67)$$

Para classificação dos motores segue:

Conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma (ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1), e são as seguintes:

Categoria N Conjugado de partida normal, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores.

Categoria H Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc.
 Categoria D Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; alto escorregamento (+ de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada.
 (WEG, 2016, p.26)

E a tabela 3 mostra o resultado deste ensaio com rotor bloqueado.

Tabela 3 - Resultados do ensaio a rotor bloqueado

Rotor Bloqueado			
V _{cc} [V]	I _{cc} [A]	F.P	P _{cc} [W]
37	3,01	0,7388	142,61

Fonte: do autor

Onde:

V_{cc} = tensão de curto circuito (V);

I_{cc} = corrente de curto circuito (A);

F.P = fator de potência em curto circuito;

P_{cc} = potência de curto circuito (W);

6.5 ENSAIO A VELOCIDADE SÍNCRONA

O objetivo deste ensaio é desacoplar a impedância do rotor, do circuito equivalente ao rotor, com essa impedância desacoplada não há potência transferida no entreferro da máquina, logo a potência ativa medida, será as somas das perdas ôhmicas estatóricas e as perdas do núcleo do estator.

Para realizar este ensaio, através de uma máquina primária imprime-se a velocidade síncrona no eixo do rotor da máquina de indução.(HOMRICH, 2013).

Os resultados obtidos pelo ensaio são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios a velocidade síncrona

VELOCIDADE SÍNCRONA		
TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (RPM)
210	1,7	1796
210	1,7	1800

Fonte: do autor

6.6 PARÂMETROS DO MODELO

As tabelas a seguir mostram os valores das reatâncias por fase.

Tabela 5 - Resultados dos cálculos de reatância do circuito equivalente

X1 (Ω)	X2 (Ω)	Xmf (Ω)
7,6	6,75	218,5

Fonte: do autor

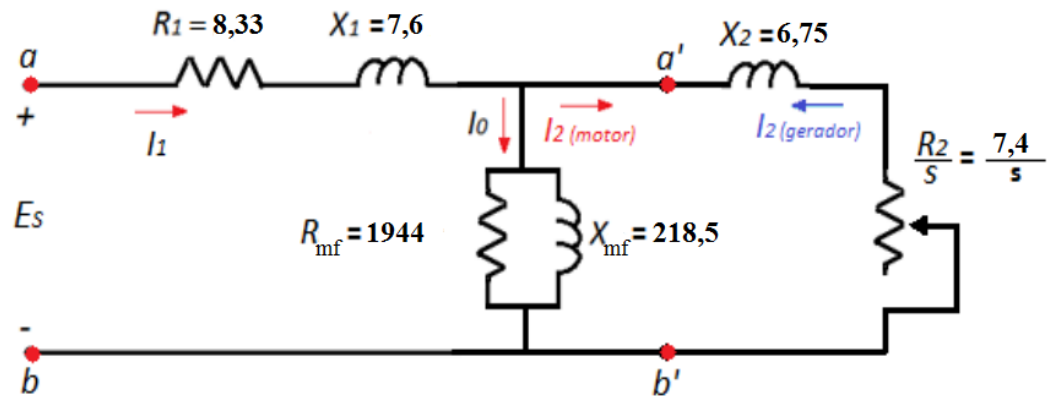
Tabela 6 - Resultados dos cálculos para as resistências do circuito equivalente

R2 (Ω)	Rmf (Ω)
7,4	1944

Fonte: do autor

A Figura 41 é o modelo encontrado para representar a máquina WEG utilizada nos ensaios.

Figura 41 - Circuito equivalente da máquina WEG



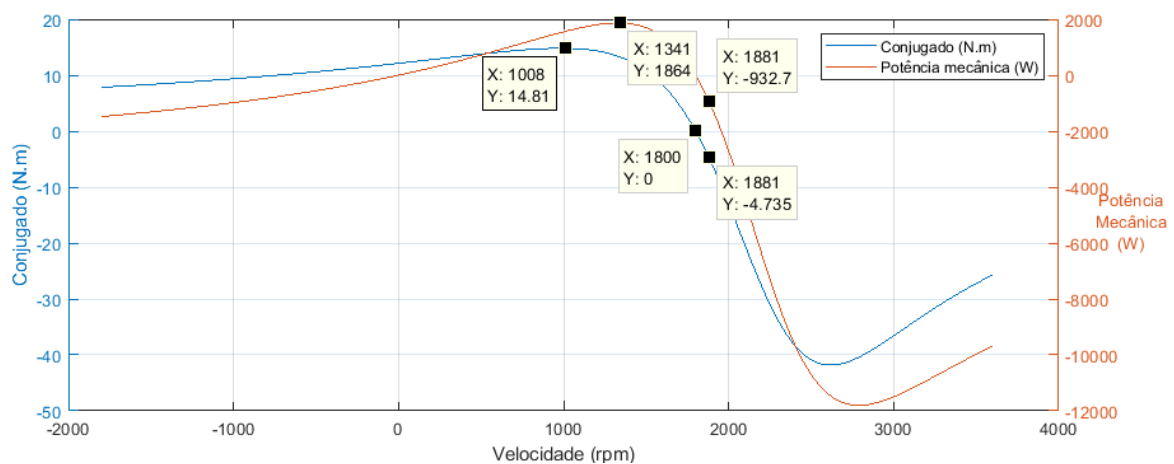
Fonte: Adaptado de Homrich (2013)

6.7 SIMULAÇÕES

As simulações permitem uma visão mais ampla da operação da máquina de indução. Através dos parâmetros levantados da máquina de indução, conforme mostra a Figura 42, é implementado um código no MatLab, que fornecerá as curvas de operação da máquina de indução. Esse código compreende as duas formas de operação da máquina de indução, abaixo dos 1800 RPM de velocidade o código trata a máquina como motor, e acima dos 1800 RPM entende-se a máquina como gerador(HOMRICH, 2013).

O código em MatLab é fornecido no **Anexo 1**

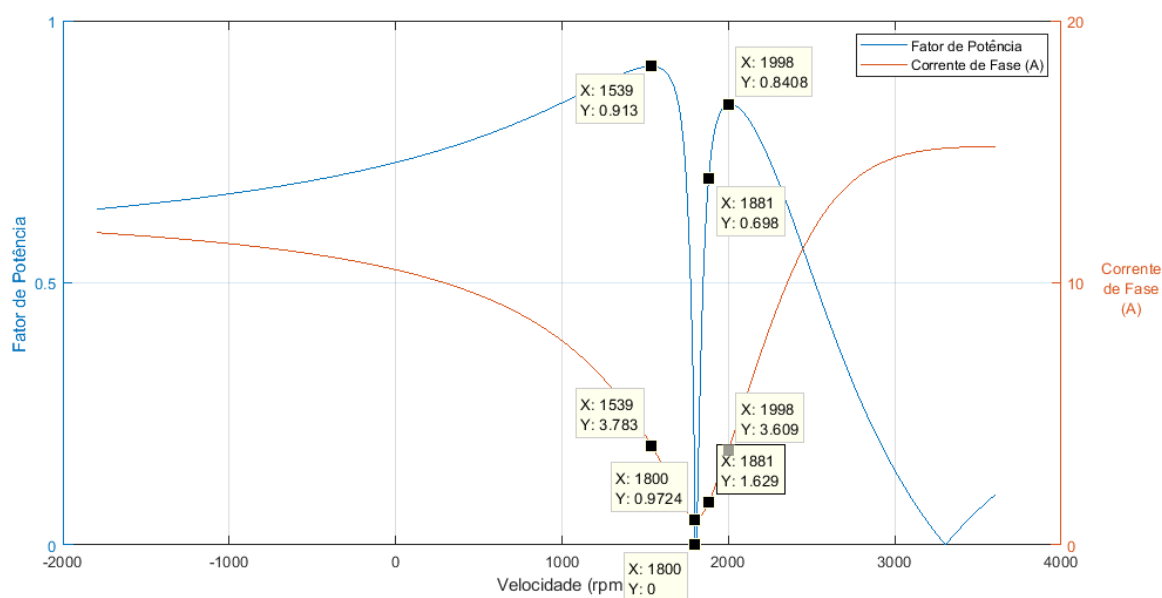
Figura 42 - Gráfico da simulação para conjugado e potência mecânica



Fonte: do autor

No gráfico da Figura 42, deve-se atentar a região de transição da operação entre modo motor e modo gerador da máquina de indução, em 1800 RPM, tem-se o mínimo conjugado (N.m) e o mínimo da potência no eixo (W), o que confirma que a máquina está na velocidade síncrona, pois o campo magnético do rotor e do estator estão em sincronia, logo não há força magnética. Na sequência, antes de 2000 RPM tem-se o máximo do conjugado e o máximo da potência no eixo, porém agora no modo gerador, nota-se que aumentando a velocidade muito acima dos 1800 RPM, não é obtido um efeito positivo pois o conjugado e a potência no eixo tendem a diminuir.

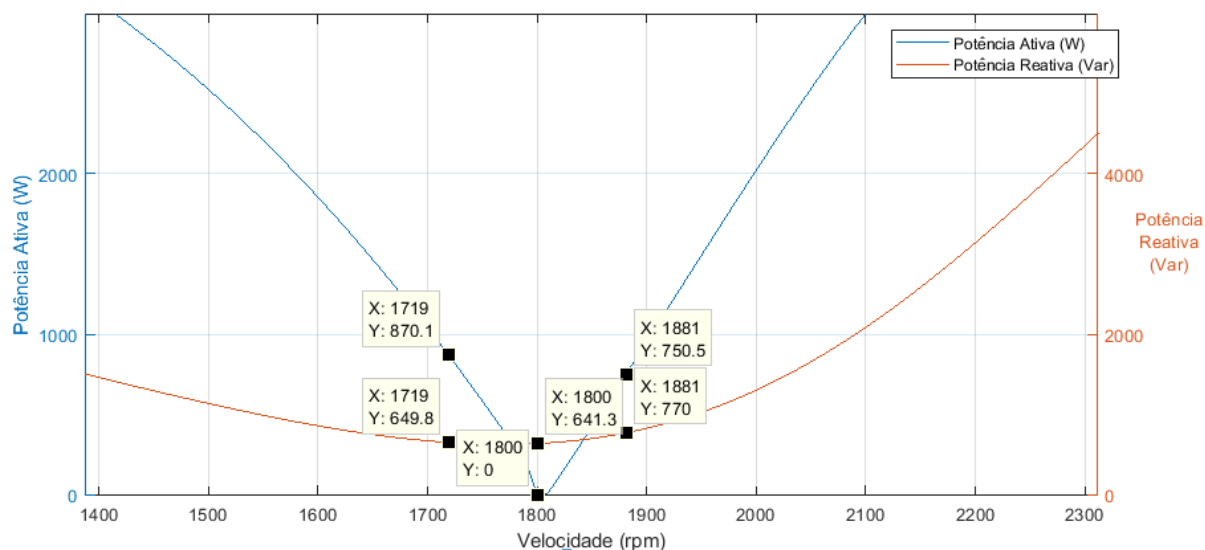
Figura 43 - Gráfico da simulação para fator de potência e corrente de fase



Fonte: do autor

Já no gráfico da Figura 43, é observado como o fator de potência e a corrente de fase se comportam durante a transição do modo motor para o modo gerador na região próxima a 1800 RPM. Antes de chegar a 1800 RPM, o fator de potência chega ao seu valor máximo próximo à 0,93 e a corrente de fase começa a decair, porém a corrente de fase não chega a zero, pois o campo magnético estatórico deve ser mantido, no entanto o fator de potência chega ao seu valor mais baixo, zero em 1800. Já acima dos 1800 RPM é obtido o máximo do fator de potência, e também tem-se o máximo da corrente de fase que será encontrado na máquina de indução operando agora como gerador

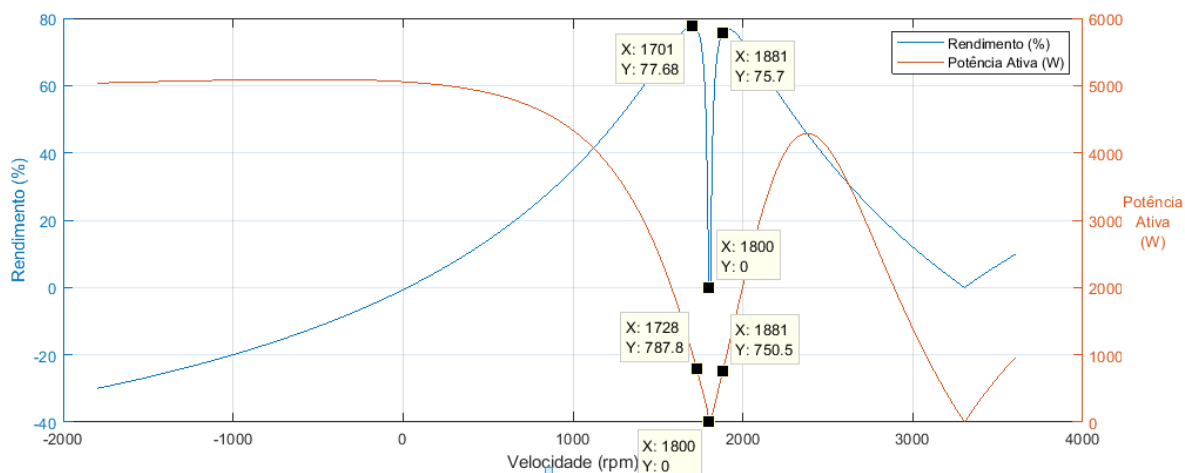
Figura 44 - Gráfico da simulação da potência ativa e a potência reativa



Fonte: do autor

Já no gráfico da Figura 44, é observado a potência ativa e a potência reativa, percebe-se que em 1719 RPM, a potência ativa atinge o máximo valor na operação como modo motor, já a potência reativa atinge o mínimo em 1800 RPM, nessa região a máquina está apenas com perdas por atrito e ventilação e energia para manter o campo magnético no estator. Acima dos 1800 RPM a potência reativa começa a crescer, e a potência ativa também cresce chegando no valor máximo em 1881 RPM, logo após essa velocidade, a potência ativa continua crescendo, porém, a máquina já atingiu o valor nominal de corrente permitida nos enrolamentos, após isso torna-se danosa a operação em modo gerador dessa máquina.

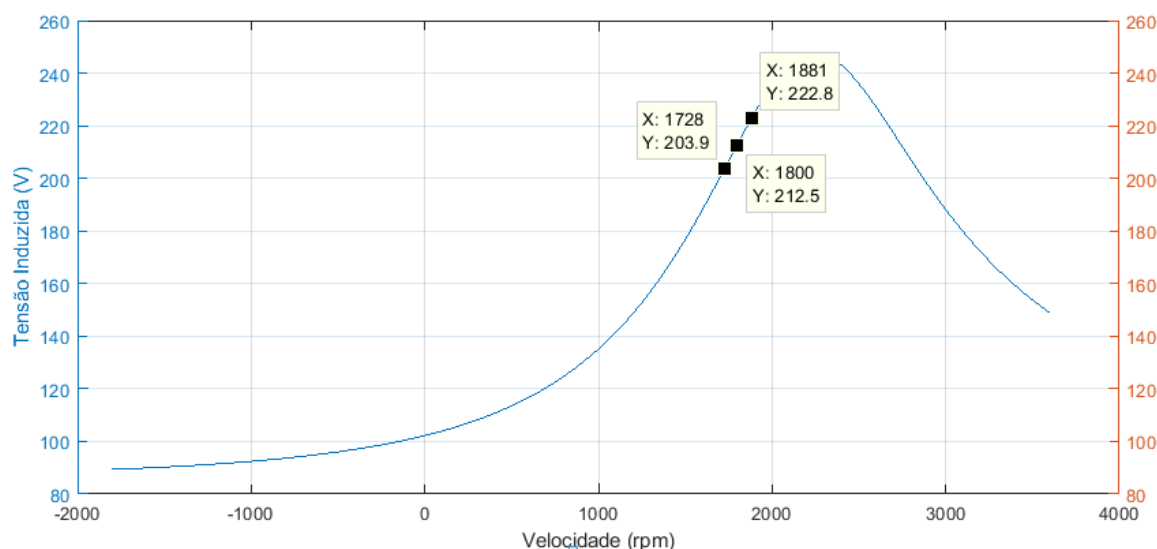
Figura 45 - Gráfico da simulação do rendimento e potência ativa



Fonte: do autor

Já no gráfico da Figura 45, é observado o rendimento do motor e a potência ativa gerada em Watts no eixo do motor. Próximo aos 1800 RPM é verificado que o comportamento das curvas está se alterando ao passar de motor para gerador. Nota-se também que no modo gerador, ou seja, acima dos 1800 RPM, a potência ativa e o rendimento atingem picos menores em relação à operação no modo motor. Isso se deve ao fato já relatado anteriormente no capítulo (4.2 – Limitações do gerador).

Figura 46 - Gráfico da tensão induzida em relação a velocidade



Fonte: do autor

Neste gráfico da Figura 46, nota-se o máximo de tensão atingido, 222,8 V em 1881 RPM, pois acima disso a máquina extrapola a corrente nominal.

6.8 RESULTADOS E ANÁLISES

Na transição entre a operação do modo motor para o modo gerador nas simulações obtém-se os seguintes resultados:

Tabela 7 - Resultados do ensaio comparado com as simulações

Velocidade (rpm)	Tensão		Corrente	
	Valor medido	Valor Teórico	Valor medido	Valor Teórico
1796	210	211,8	1,7	0,9961
1800	210	212,5	1,7	0,972
1810	210	214,1	1,8	0,972
1822	210	215,2	2	0,9974
1830	210	216,3	2,2	1,042
1834	210	217,4	2,4	1,105
1844	210	218,5	2,6	1,1846

Fonte: do autor

A partir dos dados da tabela 7, são evidenciadas diferenças entre os valores obtidos nas simulações, valores teóricos, e nos ensaios práticos do laboratório, valores medidos. Por exemplo em 1834 RPM, o valor teórico da corrente I_1 , na figura 42 é de 1,105 A/ fase, e o valor medido é de 2,4 A/fase, isso mostra que a máquina de indução está operando na região de saturação, ou seja o ramo de magnetização está drenando muita corrente para alimentar o campo magnético, responsável por manter a potência eletromagnética que deve ser transferida do rotor para as bobinas do estator (HOMRICH, 2013).

7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados deste trabalho pode-se concluir que o gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo não é uma máquina ideal para geração de eletricidade em larga escala, comparado com os geradores síncronos que apresentam estabilidade maior na geração, mantendo tensão e corrente constantes por uma faixa maior de velocidades do gerador eólico. Porém, o motor de indução com rotor em gaiola de esquilo, objeto de estudo neste trabalho, apresenta capacidade de geração adequada para pequenas propriedades rurais, pois é um motor que apresenta baixo custo frente a outros modelos, e possibilita uma geração aceitável para acionar máquinas que não tenham uma eletrônica embarcada muito sensível a flutuações na tensão.

Caso o projeto seja geração em larga escala e disponha de mais recursos, pode-se avaliar o uso do gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo em conjunto com um controle vetorial como mostrado neste trabalho, dessa forma o controle atua variando o fluxo entre o estator e o rotor da máquina.

Enfim, tudo deve ser dimensionado e analisado durante a elaboração do projeto, o mercado apresenta uma vasta gama de técnicas e produtos, a fim de contribuir na execução e operação dos projetos eólicos.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se avaliar os resultados da inserção de um sistema restaurador de tensão, chamados de DVR (Dynamic Voltage Restorer), que consiste basicamente de um transformador em série com uma carga sensível.

Outro método que poderia ser avaliado seria o Flywheel, que consiste na inserção de uma máquina síncrona montada no mesmo eixo de um volante de inércia. Para que a energia elétrica seja transformada em energia cinética, a máquina síncrona funciona como um motor síncrono. Assim ele transforma energia elétrica em mecânica, acelerando o eixo juntamente com o volante de inércia. Esse processo continua até que se atinja a velocidade final desejada.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **O nascimento da eólica no Brasil**. São Paulo, SP, 24 ago 2018a. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor>. Acesso em: 03 out. 2019.
- ABEEÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2018** São Paulo, SP, 2018b. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf. Acesso em: 08 out. 2019.
- ABEEÓLICA. **Energia eólica os bons ventos do Brasil. 7** São Paulo, SP, 2019. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/07/Infoventopt.pdf>. Acesso em: 06 out. 2019.
- ACKERMANN, T. **Wind power in power systems**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. 677 p.
- BASSETT, E. D.; POTTER, F. M. Capacitive excitation for induction generators. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York. v. 54, p. 540-545, October 1935.
- CHAPALLAZ, J.-M. E. A. **Manual on induction motors used as generators**. MHPG Serie. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1992. 213 p.
- CHAPMAN, S. J. **Electric machinery fundamentals**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 773 p.
- HOMRICH, Guilherme. **Regulação de tensão em geradores de indução**. Orientador: Ály Ferreira Flores Filho. 2013. 118 f. Dissertação (Graduado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE St112- 1984** (IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators). New York: IEEE, 1984.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: theory, design and application**. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltda., 2009. 569 p.
- MARRA, E. G.; POMILIO, J. A. Induction-generator-based system providing regulated voltage with constant frequency. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 47, p. 410-415, August 2000.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. PARTICIPAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS EÓLICOS NOS LEILÕES DE ENERGIA NO BRASIL. **Evolução dos projetos cadastrados e suas características técnicas**. Brasília, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro 2018. p. 1-48.
- OWEN, E. L.; GRIFFITH, G. R. Induction generator applications for petroleum and chemical plants. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. IA-19, p. 1003-1013, December 1983.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. Orientador: Antônio Carlos Ferreira. 2005. 165 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

REIS, Luiz. Octávio Mattos dos. **Lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica e biogás**. Orientador: Galdenoro Botura Júnior. 2002. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Julio Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2002.

REIS, L. O. M. D.; ROSSI, R. **Circuito equivalente, diagrama fasorial, operação a vazio e com rotor bloqueado**. Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015a.

REIS, L. O. M. D.; ROSSI, R. **Estudo do fluxo magnético nos motores de indução trifásico - Estatores**. Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015b.

REIS, L. O. M. D.; ROSSI, R. **Partes componentes e características principais das máquinas assíncronas**. Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015c.

SEYOUM, D.; GRANTHAM, C.; RAHMAN, M. F. Inverter supplied voltage control system for an isolated induction generator driven by a wind turbine. *In: CONFERENCE RECORD - IAS ANNUAL MEETING (IEEE Industry Applications Society)*, 2003. **Proceedings[...]**. Salt Lake City, UT, USA, 2003.

SILVA, S. R. **Curso de especialização em energia eólica: tecnologia em aerogeradores**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis, 2013.

WAGNER, C. F. Self-excitation of induction motors. New York: **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v. 58, p. 47-51, February, 1939.

WEG. **Motores elétricos: guia de especificação**. Jaraguá do Sul, SC, 2016. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 03 out. 2019.

ANEXO A - Rotina de programação no Matlab para simulação do gerador

Rotina utilizada para geração dos gráficos das Figuras 42, 43, 44, 45, 46, lembrando que todos os resultados obtidos são uma função em variação da velocidade, sendo que para valores acima de 1800 RPM, o código abaixo passa a considerar as equações do modo gerador. O código foi retirado de (HOMRICH, 2013), com mudanças nos parâmetros da máquina para a máquina utilizada nos ensaios em laboratório.

```
clear
%Parâmetros da máquina
Vt=220;
nf=3;
polos=4;
fe=60;
%
R1=8,33;
X1=7,6;
X2=6,75;
Rmf=1944;
Xmf=218,5;
R2=7,4;
%Cálculo da velocidade sincrona
omegas=4*pi*fe/polos;
ns=120*fe/polos;
%Thevenin (analise modo motor)
Z1eq=(j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))*(R1+j*X1)/(R1+j*X1+(j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf)));
R1eq= real(Z1eq);
X1eq= imag(Z1eq);
Vteq= abs(Vt*(j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))/(R1+j*X1+(j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))));
%laço de escorregamento
s = [-1:0.005:2];
for n=1:601
    %Velocidade mecânica
    rpm(n)= ns*(1-s(n));
    %Corrente do equivalente
    I2 = abs(Vteq/(Z1eq+j*X2+R2/s(n)));
    %Conjugado e Potencia mecanica (modo motor)
    Tmec(n)= nf*I2^2*R2/(s(n)*omegas);
```

```
Pmec(n)= nf*I2^2*R2*(1-s(n))/s(n);
```

```
%Impedancia Equivalente do motor
```

```
Zgap= ((j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf)*(j*X2+R2/s(n)))/((j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))+ (j*X2+R2/s(n))));
```

```
Zab= Zgap+(R1+j*X1);
```

```
Ztot= abs(Zgap+(R1+j*X1));
```

```
Rmaq = real(Zab);
```

```
Xmaq = imag(Zab);
```

```
%Corrente de fase (modo motor)
```

```
I1 = Vt/Zab;
```

```
If(n)= Vt/Ztot;
```

```
I1a= real(I1);
```

```
I1r =imag(I1);
```

```
%Potencia ativa e reativa (modo motor)
```

```
Pat(n)= abs(3*Vt*I1a);
```

```
Preat(n)= abs(3*Vt*I1r);
```

```
%Rendimento motor
```

```
rend(n)= ((nf*I2^2*R2*(1-s(n))/s(n))-(58.83-25.17))/abs(3*Vt*I1a)*100;
```

```
%Fator de potencia
```

```
FP(n)= abs(Rmaq/sqrt(Rmaq^2+Xmaq^2));
```

```
FPc = (Rmaq/sqrt(Rmaq^2+Xmaq^2));
```

```
%Tensão Induzida(interna) e corrente de fase(modo gerador)
```

```
I2g= abs(-I1*((j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))/((j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))+((R2/s(n))+j*X2))));
```

```
IR = (-I1*((j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))/((j*Xmf*Rmf/(Rmf+j*Xmf))+((R2/s(n))+j*X2))));
```

```
I0 = I1+IR;
```

```
E1(n) = abs(I0*j*Xmf);
```

```
%Demais equações no modo gerador
```

```
if s(n)<0
```

```
    Tmec(n)=(nf*I2g^2*R2/(s(n)*omegas));
```

```
    Pmec(n)=(nf*I2g^2*R2*(1-s(n))/s(n));
```

```
    rend(n)=abs((nf*Vt*I1a))/(abs(nf*I2g^2*R2*(1-s(n))/s(n))+(58.83))*100;
```

end

```
if s(n)==0
    I2=0;
    I2g=0;
    Tmec(n)=0;
    FP(n)=0;
    Pat(n)=0;
    If(n)= abs(Vt/(R1+j*X1+j*Xmf));
    E1(n)=abs(j*Xmf*(Vt/(R1+j*X1+j*Xmf)));
    Preat(n)=3*abs(imag((Vt^2)/(R1+j*X1+j*Xmf)));
    rend(n)=0;
end
```

end

```
figure
plotyy(rpm,Tmec,rpm,Pmec);grid on
```

```
figure
plotyy(rpm,FP,rpm,If);grid on
```

```
figure
plotyy(rpm,Pat,rpm,Preat);grid on
```

```
figure
plotyy(rpm,rend,rpm,Pat);grid on
```

```
figure
plotyy(rpm,E1,rpm,E1);grid on
```

Fonte: Homrich (2013).