

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO**

**DIRETRIZES ANALÍTICAS PARA PROJETO DE  
GERADORES DE INDUÇÃO DE ROTOR TIPO GAIOLA DE  
ESQUILO**

Porto Alegre

2014

**CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO**

**DIRETRIZES ANALÍTICAS PARA PROJETO DE  
GERADORES DE INDUÇÃO DE ROTOR TIPO GAIOLA DE  
ESQUILO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia – Dispositivos Eletromagnéticos

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho**

Porto Alegre

2014

CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO

**DIRETRIZES ANALÍTICAS PARA PROJETO DE  
GERADORES DE INDUÇÃO DE ROTOR TIPO GAIOLA DE  
ESQUILO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela University of Cardiff– País de Gales, Reino Unido.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Felix Alberto Farret, UFSM

Doutor pela Universidade de Londres – Londres, Inglaterra

Prof. Dr. Carlos Guilherme da Costa Neves, UNIPAMPA

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Profa. Dra. Marília Amaral da Silveira, ULBRA

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella, UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2014.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a memória de minha avó Elvira Paixão Cardoso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela oportunidade evolutiva e aos momentos dessa caminhada que representam o maior presente divino a mim concebido.

Agradeço a todos os professores do LMEAE, Prof. Roberto Homrich, Prof. Luís Tiarajú dos Reis Loureiro e Prof.<sup>a</sup> Gladis Bordin, pela dedicação em passar seus conhecimentos e permitir “que me apoiasse em seus ombros para olhar mais adiante”.

Ao Prof. Ály Ferreira Flores Filho, eu agradeço pela bela, justa e verdadeira orientação. Seus conhecimentos a mim passados extrapolam o mundo científico.

Ao técnico Júlio Moreira, pela competência e auxílio à construção do protótipo.

Ao meu amigo Tainan Caballero, pela ajuda nos ensaios experimentais.

À empresa Voges e ao Eng<sup>o</sup> Itamar Zorrer, pelos serviços essenciais na construção do protótipo e pela excelente parceria desenvolvida para concretização deste estudo.

Outros agradecimentos especiais, eu dedico aos amigos e colegas que me acompanharam durante essa caminhada: Evandro Goltz, Guilherme Homrich, Igor Pasa, Nolvi Francisco Baggio Filho, Paulo Eckert, Valdirene Verdum e Velington Neumann.

E por fim, um agradecimento mais que especial para minha família: meus pais, Luiz Carlos Azevedo do Nascimento e Sônia Maria Cardoso do Nascimento; minha irmã, Luziana Cardoso do Nascimento; e a minha namorada, Tatiane de Paula Ferreira, a quem nada disso seria possível sem seus apoios, orações e amor dedicados.

## RESUMO

Comumente, as máquinas de indução são projetadas para atuarem como motores. Assim, a presente tese objetiva estudar, analisar e construir um protótipo de máquina de indução concebida para atuar, exclusivamente, como gerador de indução, ou seja, impulsionada acima da velocidade síncrona. As características operacionais ideais em regime permanente são elaboradas tentando diretrizes de projeto. Concomitantemente, o estudo apresenta e investiga modelagens analíticas obtidas por parâmetros concentrados e, também, modelagens numéricas realizadas pelo método dos elementos finitos. Para isto, um gerador de indução trifásico de 2,2 kW tem o rotor do tipo gaiola de esquilo com ranhuras assimétricas projetado e prototipado. O protótipo do gerador de indução visa melhores características de desempenho como o fator de potência e menores perdas, por exemplo, que uma máquina de indução de mesma potência projetada para atuar como motor, mas funcionando como gerador interligado à rede em regime permanente. Os resultados analíticos, numéricos e experimentais em regime permanente do protótipo do gerador de indução e de um motor de indução de mesma potência, mas funcionando como gerador interligado à rede, são apresentados e comparados. Os resultados experimentais obtidos mostram valores nominais de 0,77 e 83,04% de fator de potência e rendimento, respectivamente, para o funcionamento da máquina convencional no ponto de operação próximo ao valor de corrente nominal. Para a máquina de indução projetada como gerador, os valores nominais de 0,82 e 81,35% de fator de potência e rendimento, respectivamente, foram obtidos no ponto de operação próximo ao valor de corrente nominal.

**Palavras-chave: Engenharia Elétrica. Gerador de Indução com Rotor do Tipo Gaiola de Esquilo, Gerador de Indução, Geração Distribuída, Geração Alternativa de Energia Elétrica, Método dos Elementos Finitos.**

## ABSTRACT

Commonly, induction machines are designed to act as motors. Thus, the present thesis aims to study, analyze and build a prototype of an induction machine designed to work exclusively as induction generator, i.e. driven above synchronous speed. The optimal steady state operating characteristics are elaborated by bringing design guidelines. Concomitantly, this study investigates and presents analytical modeling obtained by lumped parameters and also numerical modeling carried out by the finite element method. Thus, a three-phase squirrel cage induction generator of 2.2 kW with asymmetric rotor slots has designed and prototyped. The prototype of the induction generator aims best performance characteristics such as power factor, for example, than an induction machine of the same power designed to act as a motor, but functioning as generator parallel with the grid. Analytical, numerical and experimental results in steady state operation of the induction generator prototype and of an induction motor of the same power, but functioning as generator parallel with the grid, are presented and compared. The experimental results show nominal values 0.77 and 83.04% of power factor and efficiency, respectively, for the conventional machine in the operating point close to the value of rated current. For the induction machine designed as a generator, the nominal values 0.82 and 81.35% of power factor and efficiency, respectively, were obtained in the operating point close to the value of rated current.

**Keywords: Squirrel Cage Induction Generator, Induction Generator, Distributed Generation, Alternative Power Generation, the Finite Element Method.**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>24</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	25
1.2	OBJETIVOS.....	27
1.3	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS .....	28
<b>2</b>	<b>GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR GAIOLA DE ESQUILO</b> .....	<b>29</b>
2.1	REVISÃO DE LITERATURA.....	29
2.1.1	Sistemas de Geração com Gerador de Indução.....	30
2.1.2	Diretrizes de Projeto para Geradores de Indução .....	33
2.1.3	Características em Regime Permanente .....	36
2.2	OPERAÇÃO COM ESCORREGAMENTO NEGATIVO.....	39
2.3	PERDAS NO GERADOR DE INDUÇÃO .....	44
2.3.1	Perdas Joule.....	45
2.3.1.1	Perdas no Estator e no Rotor .....	46
2.3.1.2	Efeito Pelicular .....	49
2.3.2	Perdas no Núcleo Ferromagnético .....	51
2.3.2.1	Perdas por Histerese .....	52
2.3.2.2	Perdas por Correntes Parasitas .....	54
2.3.2.3	Perdas Excedentes .....	57
2.3.3	Perdas Rotacionais por Atrito e Ventilação .....	59
2.3.4	Perdas Suplementares .....	59
2.3.4.1	Perdas Devido ao Fluxo de Dispersão nas Ranhuras do Estator .....	60
2.3.4.2	Perdas Zig-Zag .....	62
2.3.4.3	Perdas na Superfície do Estator e do Rotor.....	64
2.3.4.4	Perdas Devido ao Fluxo de Dispersão Faixa de Fase.....	66
2.3.4.5	Perdas no Núcleo Devido à Inclinação das Barras .....	67
2.3.4.6	Perdas nas Cabeceiras de Bobina e Anéis de Curto Circuito .....	68
2.4	RENDIMENTO NO GERADOR DE INDUÇÃO .....	70
<b>3</b>	<b>MODELAGEM DA MÁQUINA DE INDUÇÃO ORIGINAL</b> .....	<b>75</b>
3.1	MODELAGEM NUMÉRICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	77
3.1.1	Construção do Modelo Numérico 2D .....	79
3.1.2	Resultados Numéricos para Densidade de Fluxo Magnético .....	81
3.1.3	Resultados Numéricos para Máquina de Indução Original Operando como Gerador Interligado a Rede em Regime Permanente.....	90
3.2	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO.....	95
3.2.1	Ensaio a Vazio .....	97
3.2.2	Ensaio a Rotor Bloqueado.....	99
3.2.3	Ensaio à Velocidade Síncrona.....	100
3.2.4	Medida da Resistência do Estator.....	101
3.2.5	Cálculo dos Parâmetros Concentrados.....	101
3.2.6	Resultados Analíticos Adquiridos a partir do Circuito Equivalente Monofásico. ....	109



3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS E MODELO ADOTADO PARA PROJETO .....	112
<b>4 PROTÓTIPO DE GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR DO TIPO GAIOLA DE ESQUILO COM RANHURAS ASSIMÉTRICAS .....</b>	<b>117</b>
4.1 MODELO NUMÉRICO 2D DO GERADOR DE INDUÇÃO .....	119
4.1.1 Análise Paramétrica Dimensional da Ranhura Assimétrica do Rotor .....	120
4.1.2 Densidade de Fluxo Magnético no Gerador de Indução e o Efeito do Sentido de Rotação.....	127
4.1.3 Resultados Numéricos para o Gerador de Indução Operando Interligado à Rede em Regime Permanente .....	132
4.2 RESULTADOS ANALÍTICOS ADQUIRIDOS A PARTIR DO CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO .....	136
4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS .....	140
<b>5 ENSAIOS.....</b>	<b>147</b>
5.1 ENSAIOS DE MEDIÇÕES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS E POTÊNCIAS TRIFÁSICAS.....	148
5.2 ENSAIOS DE MEDIÇÕES DE CONJUGADO, POTÊNCIA MECÂNICA E RENDIMENTO .....	152
5.3 ENSAIOS DE MEDIÇÕES DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO E CORRENTE... 158	
5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	163
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>168</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>172</b>
<b>ANEXO I: CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO ORIGINAL .....</b>	<b>177</b>
<b>APÊNDICE A: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ROTINA PARA A MÁQUINA DE INDUÇÃO PROJETADA PARA ATUAR COMO GERADOR INTERLIGADO À REDE (GERADOR DE INDUÇÃO).....</b>	<b>182</b>
<b>APÊNDICE B: ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FERROMAGNÉTICO DO ROTOR .....</b>	<b>186</b>
<b>APÊNDICE C: INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES REALIZADAS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>196</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Evolução do motor trifásico (relação peso/potência) (WEG, 2014).....	25
Figura 2 Tensões no gerador de indução (CHAPALLAZ, 1992).....	30
Figura 3 Fluxo de Potência na MIG (CHAPALLAZ, 1992).....	31
Figura 4 Gerador de indução rotor gaiola de esquilo (SCIG) conectado diretamente a rede (FOLLY, SHEETEKETA, 2009). .....	32
Figura 5 Gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) conectado a rede de distribuição (FOLLY, SHEETEKETA, 2009). .....	33
Figura 6 Gerador de indução conectado a rede com conversor <i>back-to-back</i> (FOLLY, SHEETEKETA, 2009).....	33
Figura 7 Regiões de operação e saturação na máquina de indução (SAWETSAKULANOND, HOTHONGKHAM, KINNARES, 2008). .....	35
Figura 8 Conjugado versus velocidade da máquina de indução (SANTOS, 2003).....	39
Figura 9 Fasores da tensão induzida $E_2$ no entreferro: (a) escorregamento positivo e (b) escorregamento negativo (CHAPALLAZ, 1992).....	40
Figura 10 Circuito equivalente por fase de um motor de indução (FITZGERALD, 2003). ....	42
Figura 11 Custo do motor e custo das perdas em cinco anos (motores de indução trifásicos de quatro polos) (COGO, JÚNIOR, PONZETTO 1998). .....	45
Figura 12 Relação entre a Resistência CA e CC em função da ordem harmônica para cabos de seção de 2,5 mm <sup>2</sup> , 50 mm <sup>2</sup> , 95 mm <sup>2</sup> e 240 mm <sup>2</sup> (ANDRADE, 2009). .....	51
Figura 13 Exemplo da estrutura de domínios em dois grãos vizinhos (LANDGRAF, 2002). ..	52
Figura 14 Representação do ciclo de histerese e seus domínios magnéticos (OLIVEIRA, 2013). .....	53
Figura 15 Distribuição das correntes induzidas em lâminas ferromagnéticas (KOTHARI, NAGRATH, 2010). .....	54
Figura 16 Efeito das correntes parasitas na curva de histereses (ANDRADE, 2009). .....	55
Figura 17 Efeito da espessura das chapas e diferentes valores de resistividades em relação aos valores de perdas para o valor de densidade de fluxo de 1,5T e frequência de 60 Hz (SANTOS, 2005). .....	56
Figura 18 Fluxo de dispersão nas ranhuras do estator (PYRHÖHEN, JOKINEN, HRABOVCOVÁ, 2008) (OLIVEIRA, 2013).....	61
Figura 19 Fluxo de dispersão zig-zag (CHAPMAN, 2010) (OLIVEIRA, 2013).....	62
Figura 20 Influência da relação entre o número de ranhuras e as perdas zig-zag (ANDRADE, 2009). .....	64
Figura 21 Pulsações na densidade de fluxo magnético na região do entreferro (MECROW, 1989). .....	65
Figura 22 Partes finais do condutor do estator e do rotor (OLIVEIRA, 2013). .....	69
Figura 23 Máquina de indução original: motor de indução trifásico Voges, modelo VTOP 90L, quatro polos, 2,2 kW.....	76
Figura 24 Desenho do modelo numérico axissimétrico da máquina de indução original com simetria de 180°. .....	80

Figura 25 Desenho com a malha em destaque do modelo numérico da máquina de indução original. ....	81
Figura 26 Linhas traçadas ao longo da geometria da máquina de indução original no modelo por elementos finitos: (a) dentes do estator, (b) entreferro e (c) dentes do rotor. ...	82
Figura 27 Curva BH do material ferromagnético fornecido pela VOGES. ....	83
Figura 28 Curva de Perdas do material ferromagnético fornecido pela VOGES. ....	84
Figura 29 Mapa da densidade de fluxo magnético na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min). ....	85
Figura 30 Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do estator na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min). ....	85
Figura 31 Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do entreferro na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min). ....	86
Figura 32 Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do rotor na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min). ....	86
Figura 33 Mapa da densidade de fluxo magnético na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min). ....	87
Figura 34 Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do estator na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min). ....	88
Figura 35 Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do entreferro na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min). ....	88
Figura 36 Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do rotor na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min). ....	89
Figura 37 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Conjugado e potência mecânica versus velocidade. ....	93
Figura 38 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade. ....	94
Figura 39 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade. ....	94
Figura 40 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Rendimento e potência ativa versus velocidade. ....	95
Figura 41 Conexão realizada nos ensaios a vazio. ....	98
Figura 42 Montagem do ensaio a rotor bloqueado. ....	99
Figura 43 Ensaio a velocidade síncrona (BOLDEA, NASAR, 2002). ....	100
Figura 44 Curva das perdas rotacionais e suplementares estimada para a máquina de indução original. ....	108
Figura 45 Circuito equivalente resultante da máquina de indução original. ....	108
Figura 46 Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado e potência mecânica versus velocidade. ....	110
Figura 47 Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade. ....	110
Figura 48 Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade. ....	111

Figura 49	Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Rendimento e potência ativa versus velocidade. ....	111
Figura 50	Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado versus velocidade. ....	113
Figura 51	Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz versus velocidade. ....	113
Figura 52	Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Fator de potência versus velocidade.....	114
Figura 53	Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência ativa versus velocidade.....	114
Figura 54	Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência reativa versus velocidade.....	115
Figura 55	Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Rendimento versus velocidade.....	115
Figura 56	Layout e variáveis dimensionais das ranhuras do rotor das máquinas de indução estudadas: (a) ranhura da máquina de indução original; (b) ranhura assimétrica projetada para operação como gerador. ....	118
Figura 57	Desenho do modelo numérico axissimétrico do gerador de indução projetado com simetria de 180°. ....	119
Figura 58	Desenho com a malha em destaque do modelo numérico do gerador de indução projetado.....	120
Figura 59	Fluxograma adotado para a parametrização das variáveis dimensionais da ranhura assimétrica. ....	122
Figura 60	Máquina de eletroerosão a fio.....	126
Figura 61	Confecção das lâminas do pacote do rotor: (a) lâminas cortadas em processo de secagem e (b) detalhes da lâmina cortada. ....	126
Figura 62	Protótipo do rotor do gerador de indução: (a) rotor com tampa e ventilador e (b) vista a partir da ponta do eixo. ....	126
Figura 63	Linhas traçadas ao longo da geometria do gerador de indução projetado no modelo por elementos finitos: (a) dentes do estator, (b) entreferro e (c) dentes do rotor. .	127
Figura 64	Mapa da densidade de fluxo magnético no gerador de indução projetado operando com valor de corrente nominal no sentido horário (1886r/min).....	128
Figura 65	Mapa da densidade de fluxo magnético no gerador de indução projetado operando com valor de corrente nominal no sentido anti-horário (1886r/min). ....	128
Figura 66	Pontos de operação da densidade de fluxo magnético sobrepostos na curva BH referentes à máquina de indução original operando como gerador e ao gerador de indução projetado.....	130
Figura 67	Resultados numéricos para a forma de onda da corrente de fase do gerador de indução projetado.....	131
Figura 68	Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Conjugado e potência mecânica versus velocidade. ....	134
Figura 69	Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade. ....	135
Figura 70	Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade. ....	135
Figura 71	Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Rendimento e potência ativa versus velocidade. ....	136
Figura 72	Circuito equivalente do gerador de indução projetado.....	137
Figura 73	Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Conjugado e potência mecânica versus velocidade. ....	138

Figura 74	Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade. ....	139
Figura 75	Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Potência ativa e potência reativa versus velocidade. ....	139
Figura 76	Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Rendimento e potência ativa versus velocidade. ....	140
Figura 77	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Conjugado versus corrente. ....	142
Figura 78	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência mecânica versus corrente. ....	143
Figura 79	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Rendimento versus corrente. ....	143
Figura 80	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Fator de potência versus corrente. ....	144
Figura 81	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência ativa versus corrente. ....	144
Figura 82	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência reativa versus corrente. ....	145
Figura 83	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Corrente versus velocidade. ....	145
Figura 84	Realização dos ensaios campo. ....	147
Figura 85	Layout dos elementos do wattímetro para medições internas na ligação delta. ....	148
Figura 86	Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade. ....	150
Figura 87	Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade. ....	150
Figura 88	Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade. ....	151
Figura 89	Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Potência ativa e potência reativa versus velocidade. ....	152
Figura 90	Ilustração da bancada utilizada para medição de conjugado. ....	153
Figura 91	Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado versus velocidade. ....	154
Figura 92	Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência mecânica versus velocidade. ....	155
Figura 93	Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Rendimento versus velocidade. ....	155
Figura 94	Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Conjugado versus velocidade. ....	157
Figura 95	Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Potência mecânica versus velocidade. ....	157

Figura 96 Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Rendimento versus velocidade.....	158
Figura 97 Resultados experimentais da taxa de distorção harmônica de tensão da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado no ponto de operação nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação. ....	162
Figura 98 Resultados experimentais da taxa de distorção harmônica de corrente da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado no ponto de operação nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação. ....	162
Figura 99 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência ativa versus corrente.....	164
Figura 100 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência reativa versus corrente.....	164
Figura 101 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Fator de potência versus corrente.....	165
Figura 102 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Conjugado versus corrente. ....	165
Figura 103 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência mecânica versus corrente.....	166
Figura 104 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Rendimento versus corrente. ....	166
Figura 105 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Corrente versus velocidade. ....	167

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Objetivos para projetos de geradores de indução interligado à rede. ....	36
Tabela 2	Temperatura por classe de isolamento (NBR 7094, 2003). ....	48
Tabela 3	Dados e informações da máquina de indução original fornecidas pela VOGES. ....	76
Tabela 4	Valores máximos de induções resultantes das simulações por elementos finitos nas linhas traçadas para a máquina de indução operando como motor e gerador na velocidade de operação nominal. ....	89
Tabela 5	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	92
Tabela 6	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, perdas totais e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	92
Tabela 7	Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Perdas Joule, perdas no núcleo e perdas rotacionais. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	93
Tabela 8	Relação dos instrumentos utilizados nos ensaios. ....	97
Tabela 9	Resultados do ensaio a vazio para a máquina de indução original. ....	99
Tabela 10	Resultados do ensaio a rotor bloqueado para a máquina de indução original. ....	100
Tabela 11	Resultados do ensaio à velocidade síncrona para a máquina de indução original. ....	100
Tabela 12	Medidas da resistência do estator. ....	101
Tabela 13	Perdas rotacionais, perdas no ferro e perdas suplementares para a máquina de indução original. ....	102
Tabela 14	Parâmetros calculados para reatância a vazio, reatância a rotor bloqueado e resistência a rotor bloqueado para a máquina de indução original. ....	103
Tabela 15	Parâmetros de reatâncias e resistências calculados para a máquina de indução original. ....	105
Tabela 16	Perdas no núcleo do estator para a máquina de indução original. ....	105
Tabela 17	Resistência representativa das perdas magnéticas do núcleo do estator para a máquina de indução original. ....	107
Tabela 18	Perdas rotacionais e perdas suplementares para a máquina de indução original. .	107
Tabela 19	Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	109
Tabela 20	Resultados paramétricos para a variável Bs1 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em azul destaca as dimensões iniciais e a linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Bs1. ....	123

Tabela 21	Resultados paramétricos para a variável Bs2 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Bs2. ....	123
Tabela 22	Resultados paramétricos para a variável Hs2 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Hs2. ....	124
Tabela 23	Resultados paramétricos para a variável Bs0 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Bs0. ....	124
Tabela 24	Valores dimensionais das ranhuras do rotor das máquinas de indução estudadas.	125
Tabela 25	Valores eficaz médio de indução máxima resultantes das simulações por elementos finitos nas linhas traçadas para a máquina de indução original operando como gerador e para o gerador de indução projetado, ambos operando em regime permanente na velocidade nominal. ....	129
Tabela 26	Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	133
Tabela 27	Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, perdas totais e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	133
Tabela 28	Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Perdas Joule, perdas no núcleo e perdas rotacionais. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	134
Tabela 29	Resultados analíticos do gerador de indução projetado operando interligado à rede. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	138
Tabela 30	Parâmetros do circuito equivalente monofásico da máquina de indução original e do protótipo do gerador de indução. ....	141
Tabela 31	Dados do motor CC utilizado como máquina primária. ....	147
Tabela 32	Dados do conversor CA/CC para acionamento da máquina CC. ....	147
Tabela 33	Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Tensão de fase eficaz, corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	149
Tabela 34	Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Tensão de fase eficaz, corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	151
Tabela 35	Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado, potência mecânica e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	154
Tabela 36	Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Conjugado, potência mecânica e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal. ....	156
Tabela 37	Resultados experimentais da distorção harmônica total de tensão e corrente da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução no ponto de operação de corrente nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação. ....	160



Tabela 38 Resultados experimentais da distorção harmônica individual (até a 30ª ordem) de tensão e corrente da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução no ponto de operação de corrente nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação.....	161
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

FMM: Força magnetomotriz

GI: Gerador de indução

LMEAE: Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia

MIT: Máquina de indução trifásica

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$S_{\text{área}}$	Área do material
$V_0$	Campo coercitivo em excesso no processo de magnetização do material
$G$	Coefficiente de atrito do movimento das paredes dos domínios
$k_m$	Coefficiente de efeito pelicular para rotor de barras na frequência da faixa de fase
$C_{s1}$	Coefficiente de perdas magnéticas no estator
$C_{s2}$	Coefficiente de perdas magnéticas no rotor
$V_1$	Componente fundamental
$V_h$	Componente harmônica de ordem $h$
$l$	Comprimento do material
$L_{\text{núcleo}}$	Comprimento longitudinal do núcleo
$l_{tf}$	Comprimento total de um fio do enrolamento
$l_c$	Comprimento transversal do núcleo
$T_{mec}$	Conjugado eletromagnético
$T_{mec(s<0)}$	Conjugado eletromagnético gerador
$I_0$	Corrente à vazio do estator
$I_{\text{fase}}$	Corrente de fase

$I_{f1}$	Corrente de fase do estator
$I_{1,vz}$	Corrente referida ao ensaio a vazio
$I_{1,bl}$	Corrente referida ao ensaio a rotor bloqueado
$I_{vs}$	Corrente referida ao ensaio à velocidade síncrona
$I$	Corrente no condutor
$I_2$	Corrente no rotor
$I_{2(s<0)}$	Corrente referida ao circuito do rotor para operação com escorregamento negativo
$B_{max}$	Densidade de fluxo máximo
$B_{topo}$	Densidade do fluxo de dispersão no topo da ranhura
$B_g$	Densidade de fluxo magnético no entreferro
$d_{fi}$	Diâmetro de um fio do enrolamento com isolamento
$d_{fni}$	Diâmetro de um fio do enrolamento sem isolamento
$D_{B1}$	Diâmetro do centro da bobina do estator
$D_{B2}$	Diâmetro do centro da bobina do rotor
$D_i$	Diâmetro do entreferro
$D_{1ext}$	Diâmetro externo do estator
$Y_1, Y_2$	Distância axial entre o centro das correntes periféricas do estator e do rotor
$A$	Distância entre o centro da bobina do estator e as correntes periféricas do rotor
$TDH$	Distorção harmônica total
$W_h$	Energia histerética

$s$	Escorregamento
$e$	Espessura da lâmina
$K_2$	Fator das perdas causadas pela circulação de correntes entre os fios do enrolamento
$K_1$	Fator das perdas causadas pelo efeito pelicular
$k_{2m\pm 1}$	Fator de distribuição dos enrolamentos do estator
$k_1$	Fator de distribuição dos enrolamentos do estator para a harmônica fundamental
$FP$	Fator de potência
$f$	Frequência
$f$	Frequência máxima
$\omega$	Frequência angular
$Z_{ab}$	Impedância entre os terminais $a$ e $b$
$L$	Indutância do condutor
$m_v$	Massa específica do material ferromagnético
$n_{fases}$	Número de fases
$p$	Número de pares de polos
$Q_s$	Número de ranhuras do estator
$Q_s \text{ por pólo}$	Número de ranhuras por polo do estator
$N_{espiras}$	Número efetivo de espiras no enrolamento por fase
$\lambda_1$	Passo das ranhuras do estator
$P_{sup 1}$	Perdas adicionais devidas ao fluxo de dispersão nos enrolamentos do estator

$P_{exc}$	Perdas excedentes
$P_{núcleo}$	Perdas magnéticas no núcleo
$P_{rot}$	Perdas mecânicas rotacionais
$P_{superfície\ do\ estator}$	Perdas na superfície do estator
$P_{superfície\ do\ rotor}$	Perdas na superfície do rotor
$P_{alumínio}$	Perdas no alumínio do rotor
$P_{cobre}$	Perdas no cobre do estator
$P_{núcleo(estator)}$	Perdas no núcleo do estator
$P_p$	Perdas por correntes parasitas
$P_{J1}$	Perdas por efeito Joule no estator
$P_{J2}$	Perdas por efeito Joule no rotor
$P_{supZZZ}$	Perdas resistivas no rotor devido ao fluxo de dispersão que cruza o entreferro (zig-zag)
$P_{inclinação\ das\ barras}$	Perdas suplementares devido à inclinação das barras do rotor
$P_{faixa\ de\ fase}$	Perdas suplementares devido ao fluxo de dispersão de faixa de fase
$P_{partes\ finais}$	Perdas suplementares nas partes finais da máquina de indução
$P_{perdas}$	Perdas totais
$S$	Potência aparente
$P_{ativa}$	Potência ativa
$P_{bl}$	Potência ativa referida ao ensaio a rotor bloqueado
$P_{vz}$	Potência ativa referida ao ensaio a vazio
$P_{vs}$	Potência ativa referida ao ensaio à velocidade síncrona

$P_{entrada}$	Potência de entrada da máquina de indução
$P_{saída}$	Potência de saída da máquina de indução
$P_{mec(s<0)}$	Potência mecânica de origem eletromagnética no gerador de indução
$P_{mec}$	Potência mecânica de origem eletromagnética
$P_g$	Potência envolvida no entreferro
$P_{h(Steinmentz)}$	Potência histerética
$P(t)$	Potência instantânea
$P_{eixo}$	Potência mecânica no eixo
$Q$	Potência reativa
$Q_{bl}$	Potência reativa referida ao ensaio a rotor bloqueado
$Q_{vz}$	Potência reativa referida ao ensaio a vazio
$\xi$	Razão de inclinação para um passo de ranhura do estator
$X_1$	Reatância de dispersão do estator
$X_2$	Reatância de dispersão do rotor
$X_m$	Reatância de magnetização
$X_{bl}$	Reatância referida ao ensaio a rotor bloqueado
$X_{vz}$	Reatância referida ao ensaio a vazio
$k_s$	Relação do efeito pelicular para as barras do rotor na frequência da ranhura do estator
$\eta$	Rendimento
$R_t$	Resistência a frio
$R_T$	Resistência a quente

$R_{AC}$	Resistência de corrente alternada
$R_{cc}$	Resistência de fase do estator corrigida para temperatura ambiente especificada
$R_{2b}$	Resistência do rotor referido ao estator
$R_1$	Resistência elétrica do enrolamento do estator
$R$	Resistência elétrica do material
$R_2$	Resistência elétrica do enrolamento do rotor
$R_{bl}$	Resistência referida ao ensaio a rotor bloqueado
$R_{fe}$	Resistência do ramo de excitação referente às perdas do núcleo ferromagnético
$\rho$	Resistividade do material
$n$	Rotação do rotor
$n_s$	Rotação síncrona
$P_{rot+sup}$	Soma das perdas rotacionais e perdas suplementares
$P_{rot+fe+sup}$	Soma das perdas rotacionais, perdas no ferro e perdas suplementares
$\theta_T$	Temperatura medida correspondente a $R_T$
$\theta_t$	Temperatura medida correspondente a $R_t$
$V$	Tensão
$V_{fase}$	Tensão de fase
$E_2$	Tensão induzida através do entreferro
$E_{2(s<0)}$	Tensão induzida através do entreferro no gerador de indução
$\omega_s$	Velocidade angular síncrona



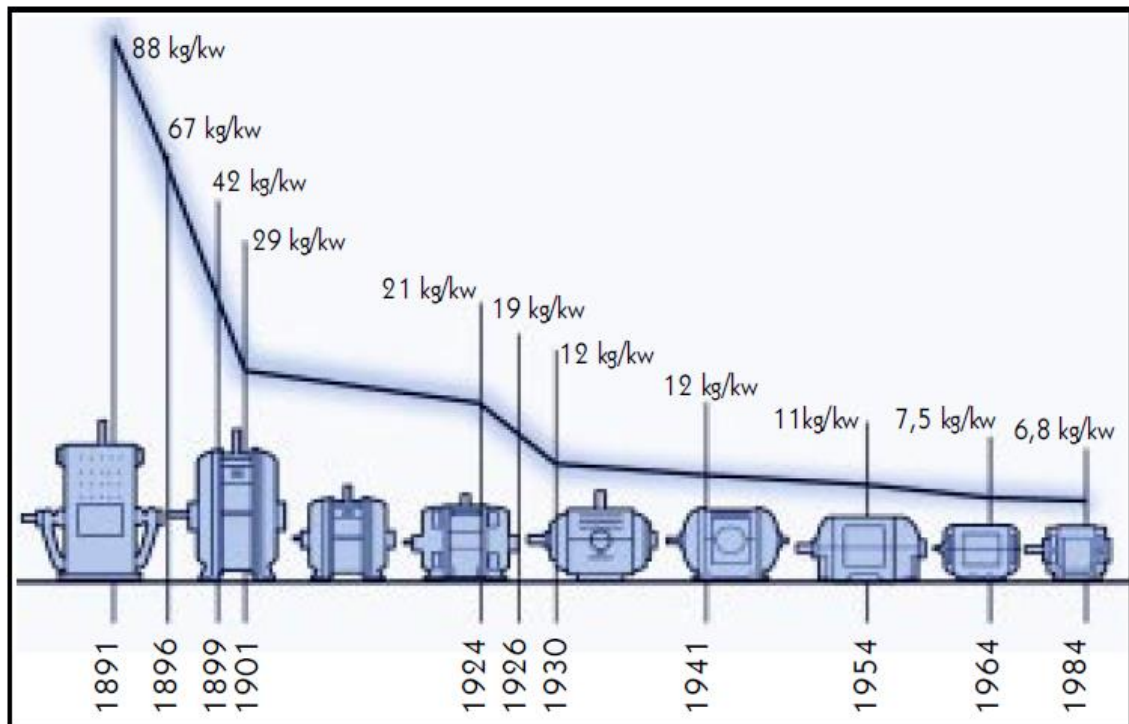
## 1 INTRODUÇÃO

A consciência de que fontes de energia são finitas e limitadas na Terra e as disputas internacionais sobre o meio ambiente, segurança global, e a qualidade de vida criaram uma oportunidade para novas usinas mais eficientes e menos poluentes, com tecnologias avançadas de controle, robustez e modularidade (SIMÕES, FARRET, 2008). A geração de energia a partir de gás natural e do aproveitamento do potencial eólico de certa região constitui exemplo de forma de geração de energia elétrica a partir de recursos naturais, ditos ainda como alternativos ao próprio sistema hidráulico, nuclear ou térmico tradicionais.

Dentro desse universo de possibilidades e pesquisas têm-se a constante busca por viabilidade econômica e baixo impacto ambiental. Contudo, não se pode falar nisso sem se mencionar qual dispositivo eletromagnético será utilizado para a conversão de energia mecânica em energia elétrica e, mais especificamente, dos aspectos que tal dispositivo representará no sistema a ser implantado, avaliando questões de eficiência, consumo próprio de energia reativa, perdas, rendimento em condições de operação e custo econômico de aquisição e manutenção (NASCIMENTO, 2012).

No Brasil, estima-se que a máquina de indução trifásica corresponda a 90% dos motores elétricos em uso na indústria (ANDRADE, 2009). Dada essa preponderância, em função de seu impacto na redução de custos, o rendimento é considerado um dos principais parâmetros a ser observado. No entanto, no início de seu desenvolvimento, a maior preocupação dos fabricantes de máquinas elétricas era em relação à redução de seu tamanho e custo (CUNHA, 2012). Dessa forma ao longo do tempo, foi-se reduzindo o custo de fabricação, com menos ferro, menos cobre, além de melhores materiais e técnicas de construção (GARCIA, 2003). A Figura 1 apresenta a evolução da máquina de indução trifásica do fabricante AEG (4 kW e 2 polos) através da redução na relação peso/potência ao

longo do tempo, este fato esta correlacionado com o avanço da tecnologia do material isolante dos enrolamentos.



**Figura 1** Evolução do motor trifásico (relação peso/potência) (WEG, 2014).

Com a maior estabilidade da relação peso/potência, foram intensificados os estudos e aprimoramentos para a melhora do rendimento em máquinas elétricas, tornando-o requisito imprescindível na discussão entre fabricantes e usuários. Nesse contexto é que se justificam os estudos feitos com máquinas de indução, quando da utilização destes dispositivos como geradores de energia elétrica, uma vez que podem apresentar viabilidade econômica e resultados satisfatórios dos pontos de vista elétrico e mecânico (NASCIMENTO, 2012).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O emprego da máquina de indução como gerador de energia elétrica não é um fato novo. A bibliografia clássica apresenta o assunto de uma forma em geral muito vaga, ressaltando, entretanto, a maior característica destas máquinas que é a possibilidade da

geração de energia elétrica com velocidade variável. A aplicação destas máquinas em conjunto com turbinas eólicas e mesmo hidráulicas é um exemplo típico desta possibilidade. Assim, a abordagem de aplicação com geração baseada em velocidade variável pode ser mais atraente, pois se pode buscar operar no máximo rendimento para todas as faixas de velocidade do vento e de vazão de água (SENJYU *et al.*, 2012).

Desde 1930, há estudos sobre as máquinas de indução como gerador (BOLDEA, NASAR, 2002). Quando comparado com o gerador síncrono, utilizado em centrais hidrelétricas, o gerador de indução possui várias e importantes vantagens, onde se destaca o já citado custo reduzido e a robustez. Como desvantagem, para fins limitantes, cita-se o baixo fator de potência como característica intrínseca de geradores de indução. O gerador de indução pode ser uma opção viável técnica e economicamente para potências de até 100 kVA, de acordo com (CHAPALLAZ, 1992), o que acaba por englobar um grande sistema de geração de energia a partir de pequenas centrais hidroelétricas (PCH), centrais a gás natural, à biomassa e eólicas, todas com um futuro promissor. Devido à qualidade dessas pesquisas desenvolvidas, chega-se a resultados interessantes sobre o assunto. Um exemplo é o fato do rendimento de uma máquina de indução na função como gerador apresentar um rendimento muito próximo ao que apresenta na função de motor (SANTOS, 2003).

Mas é necessário lembrar que o foco usual no projeto da máquina de indução, especialmente a que emprega o rotor tipo gaiola de esquilo, está no seu uso como motor dado que é a sua principal aplicação. Desta forma, características como corrente e conjugado de partida entre outros, que são próprios dessa aplicação, são especialmente consideradas no projeto da máquina inclusive com definições normativas. No caso do gerador de indução, isso não ocorre, o que indica que se pode tratar do projeto de tal máquina com foco na sua utilização como gerador de forma específica e diferenciado do projeto como motor.

## 1.2 OBJETIVOS

Cercado dessas evidências é que se apresenta o estudo para o projeto de máquinas de indução com rotor tipo gaiola com foco na sua operação como geradores. É um trabalho que está sendo realizado no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamento e Energia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a empresa VOGES Metalurgia Ltda. Os resultados deste estudo são aqui apresentados, tratando do desenvolvimento, do estudo, da análise, da simulação, da construção e dos testes destes dispositivos eletromagnéticos, visando os seguintes elementos contextuais:

1. Propor, descrever e compor diretrizes operacionais e construtivas de projeto de rotores do tipo gaiola de esquilo para máquinas de indução operarem como geradores interligados à rede de distribuição.
2. Estudar uma proposta viável de máquina de indução projetada para operar como gerador interligado à rede.
3. Modelar analiticamente o comportamento em regime permanente das máquinas de indução propostas, analisando as características obtidas por parâmetros concentrados (circuito equivalente).
4. Simular pelo método dos elementos finitos o comportamento em regime permanente desses geradores de indução, analisando as mesmas questões envolvidas na modelagem analítica e questões ligadas à distribuição da densidade de fluxo magnético na sua estrutura.
5. Projetar e construir um gerador de indução, ou seja, uma máquina de indução adequada para a operação de geração, definindo-se suas características de topologia e operacionalidade, ainda que em estágio físico de protótipo.
6. Validar e corroborar os resultados obtidos com a modelagem analítica e a simulação por elementos finitos.

7. Extrair conclusões a cerca dos resultados e do estudo apresentado.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS**

Visando atingir os objetivos propostos, esta tese está dividida em seis capítulos, a saber:

Capítulo 1 – apresenta motivação e os objetivos deste trabalho;

Capítulo 2 – visão geral da máquina de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo operando como gerador interligado à rede, apresentando questões inerentes às perdas e características operacionais;

Capítulo 3 – modelagem de uma máquina de indução original concebida para funcionar como motor, mas operando como gerador interligado à rede, posteriormente, os resultados obtidos dos modelos serviram como base para o desenvolvimento do protótipo do gerador de indução;

Capítulo 4 – modelagem de uma máquina de indução concebida para funcionar, exclusivamente, como gerador de indução interligado à rede;

Capítulo 5 – apresentam os resultados dos ensaios de campo realizados na máquina de indução original e do protótipo do gerador de indução, logo, os resultados destes ensaios são comparados e discutidos;

Capítulo 6 – é a síntese dos objetivos deste trabalho, apresentam-se os resultados e as conclusões, mostrando, mesmo que parcialmente, as contribuições que possam ser utilizadas de uma forma mais ampla pela sociedade no quesito de estudo e projeto de geradores de indução.

## **2 GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR GAIOLA DE ESQUILO**

A tecnologia de geração com máquinas de indução operando como geradores (MIG), foi utilizada desde o início do século 20, até que foi abandonada e quase desapareceu nos anos 60. Na década de 70, o aumento do preço do petróleo e o elevado custo da energia elétrica, aliados a importantes objetivos como o uso racional de energia, trouxe de volta à cena a MIG. Mais recentemente, com a generalização do uso da eletrônica de potência e uso de melhores materiais magnéticos, simplificou-se a implementação desses geradores, permitindo que novos tipos de acionamentos de baixo custo consigam fornecer potência reativa e inserir a geração à rede (FARRET, SIMÕES, 2006).

Atribuído ao contínuo aumento da necessidade de energia, é difícil atender a crescente demanda por exploração de energia a partir de fontes convencionais, como o carvão, petróleo, gás e grandes centrais hidrelétricas localizadas distantes dos pontos de consumo. Como consequência, uma maior ênfase está sendo dada para aproveitar a energia a partir de fontes não convencionais, como eólica, biogás e pequenas hidrelétricas (SAWETSAKULANOND, HOTHONGKHAM, KINNARES, 2008).

### **2.1 REVISÃO DE LITERATURA**

Com os altos custos da energia elétrica, já citado, o uso racional e o reaproveitamento de energia implementados por muitos processos de recuperação de calor e outras formas similares tornaram-se importantes metas. Nos últimos anos, uma maior ênfase nas fontes de energias renováveis tem causado um grande interesse no desenvolvimento e uso de fontes alternativas de energia, como a eólica e micro-usinas hidrelétricas (SAWETSAKULANOND, HOTHONGKHAM, KINNARES, 2008).

### 2.1.1 Sistemas de Geração com Gerador de Indução

As máquinas de indução são normalmente projetadas para funcionar como motor. Assim, quando em funcionamento no modo de geração, a parte real da corrente no circuito do rotor assume um valor oposto ao obtido na operação como motor. A tensão induzida  $E_2$  é aumentada para contrabalancear as perdas nos enrolamentos do estator (CHAPALLAZ, 1992). A Figura 2 mostra as tensões referentes ao circuito equivalente para a máquina de indução operando como gerador.

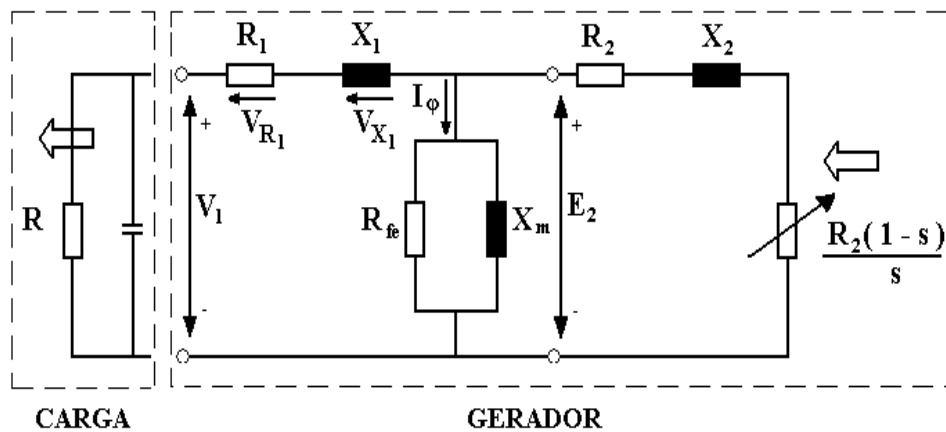


Figura 2 Tensões no gerador de indução (CHAPALLAZ, 1992).

Em sistemas de geração com MIG, uma máquina primária fornece a potência mecânica necessária para acelerar a máquina de indução acima da velocidade síncrona. Assim, a MIG pode operar e fornecer potência ativa, se conectado a uma fonte externa de potência reativa (CHAPALLAZ, 1992). A potência reativa necessária para magnetização não pode ser obtida pela máquina primária nem pelo rotor tipo gaiola de esquilo. Para sistemas de velocidade variável com MIG conectado a uma rede de distribuição, ou seja, com valores de tensão e frequência impostas pela rede, usualmente, conversores de potência são dimensionados a fim de fornecer a potência reativa necessária. A Figura 3 mostra o fluxo de

potência de uma MIG. Assim, as perdas são atribuídas da seguinte forma (FITZGERALD, 2003):

- Perdas mecânicas (rotacionais)  $P_{rot}$  - Incluem todas as perdas rotacionais tais como atrito em rolamentos e perdas devido à ventilação forçada ou resfriamento.
- Perdas no núcleo  $P_{fe}$  - Perdas por histerese, correntes de Foucault e anomalias devido a variações de densidade de fluxo magnético.
- Perdas por efeito Joule  $P_{J1}$  e  $P_{J2}$  - Estas perdas são devido às resistências ôhmicas do estator e rotor, respectivamente.

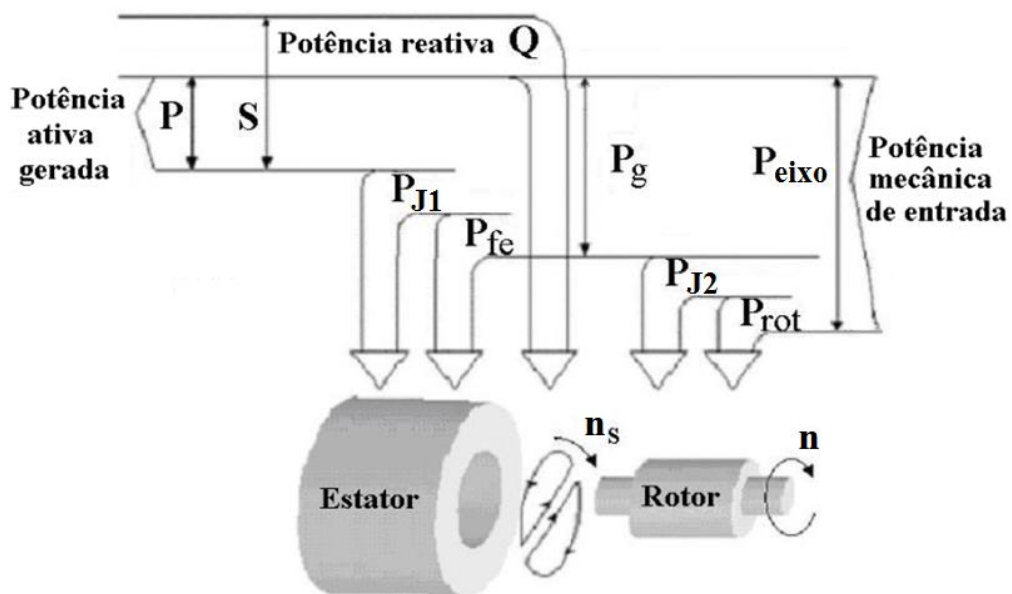
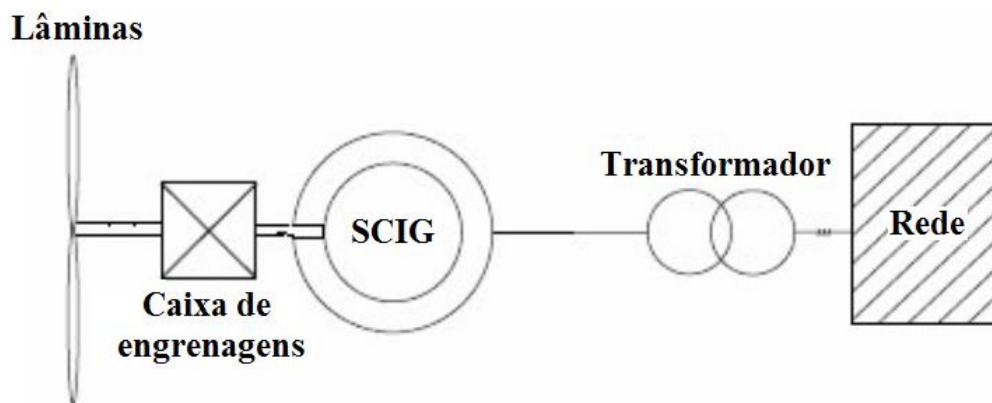


Figura 3 Fluxo de Potência na MIG (CHAPALLAZ, 1992).

Atualmente, as máquinas mais utilizadas em sistemas de geração de velocidade variável são geradores de indução duplamente alimentados, geradores de indução do tipo rotor gaiola de esquilo e geradores síncronos de ímãs permanentes. Nos três casos, uma das formas de ligação à rede mais popular é a utilização de conversores de tensão *back-to-back*, principalmente devido à sua flexibilidade e propriedades de isolamento.



A geração eólica é um exemplo que utiliza conversores *back-to-back*. Existem quatro tipos de configurações: 1) uma turbina eólica de velocidade fixa com gerador de indução com rotor gaiola de esquilo (SCIG) conectado diretamente à rede através de um transformador; 2) um gerador de indução com rotor bobinado ligado à rede com controle da resistência do rotor; 3) uma turbina eólica de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado (DFIG), com conversor *back-to-back* (no rotor); e 4) uma turbina de velocidade variável com gerador de indução do tipo rotor gaiola de esquilo ou gerador síncrono ligado à rede através de um conversor. As configurações 3 e 4 têm uma maior eficiência energética, porque podem extrair a energia com a velocidade do vento variável e converter para energia elétrica com alto rendimento pelo conversor (SUEBKINORN, NEAMMANEE, 2011). Isso significa que podem controlar com velocidades variáveis, movendo o ponto de operação do coeficiente de potência da turbina eólica para o ponto ótimo. As Figuras 4, 5 e 6 mostram as três topologias mais utilizadas.



**Figura 4 Gerador de indução rotor gaiola de esquilo (SCIG) conectado diretamente a rede (FOLLY, SHEETEKETA, 2009).**

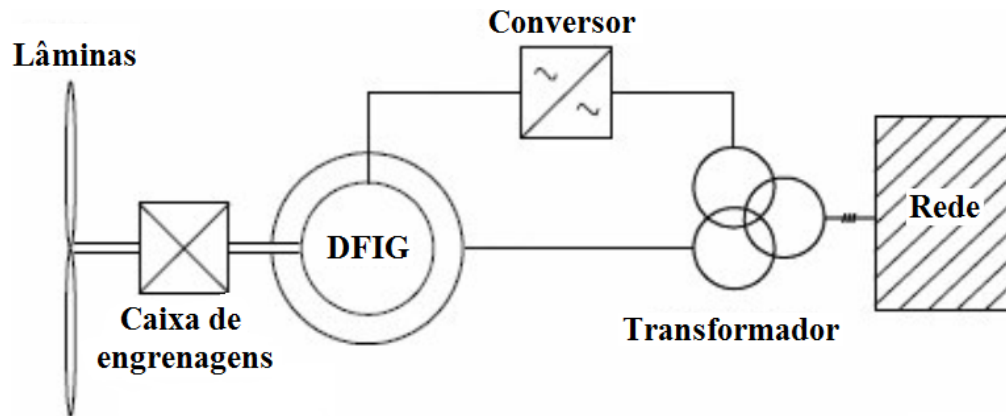


Figura 5 Gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) conectado a rede de distribuição (FOLLY, SHEETEKETA, 2009).

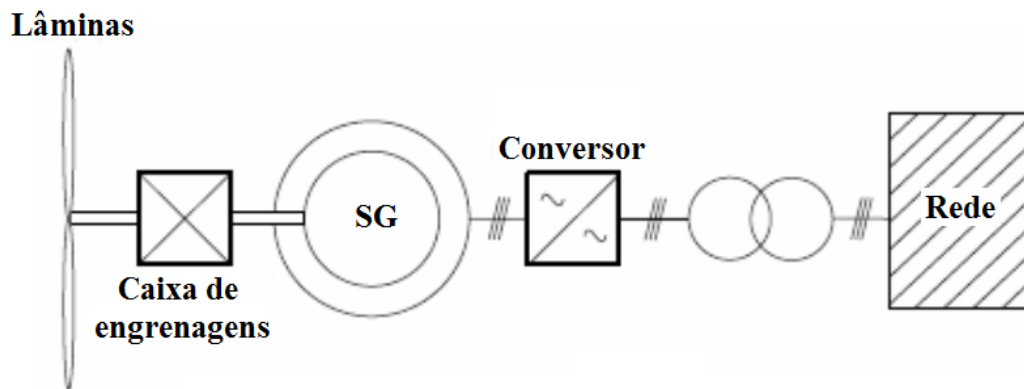


Figura 6 Gerador de indução conectado a rede com conversor *back-to-back* (FOLLY, SHEETEKETA, 2009).

### 2.1.2 Diretrizes de Projeto para Geradores de Indução

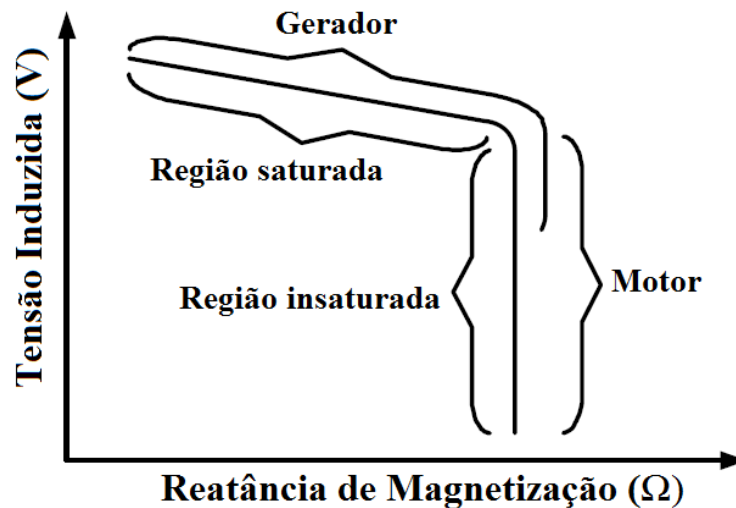
Na literatura, encontram-se diversos trabalhos sobre diretrizes de projeto de máquinas de indução, sendo a maioria referente à concepção de motores de indução. De acordo com (LIUZZI *et al.*, 2003), o projeto de motores elétricos requer uma atenção especial na escolha dos objetivos, que geralmente referem-se a recursos econômicos ou de desempenho. Assim, destacam-se quatro objetivos que podem afetar o projeto de motores de indução trifásicos, conforme descritos a seguir:

- custo de fabricação (custo do material ativo);

- rendimento nominal (maximizar);
- fator de potência (maximizar);
- corrente de partida (minimizar).

Logo, diretrizes de projeto para geradores de indução diferenciam-se das utilizadas para motores de indução, conforme listadas anteriormente. Uma delas está no fato de que geradores não necessitam de conjugado de partida porque são acelerados por máquinas primárias até a velocidade nominal de geração.

Outra questão abordada refere-se ao uso de motores de indução como gerador interligado à rede, ou seja, impulsionados a velocidade sobressíncrona, pois se tem um fato importante relacionado à saturação do material do núcleo ferromagnético. Conforme (SAWETSAKULANOND, HOTHONGKHAM, KINNARES, 2008), ao se considerar a região de operação como mostra a Figura 7, uma máquina atuando como um motor de indução funciona usualmente apenas na região insaturada (linear), diferentemente quando atua como gerador que opera em duas regiões, ou seja, insaturada (linear) e saturada (não linear). Logo, um dos principais efeitos da saturação do núcleo ferromagnético é o aumento da corrente de magnetização e, conseqüentemente, da potência reativa necessária para o motor de indução funcionar como gerador, diminuindo, assim, o valor de fator de potência nominal. Portanto, é necessário um projeto adequado para geradores de indução.



**Figura 7** Regiões de operação e saturação na máquina de indução (SAWETSAKULANOND, HOTHONGKHAM, KINNARES, 2008).

Uma referência bibliográfica que aborda diretrizes de projeto para geradores de indução operando interligado à rede, embora este não tenha concebido um gerador com este propósito, encontra-se em (SAWETSAKULANOND, HOTHONGKHAM, KINNARES, 2008). De acordo com os testes e análises realizados neste estudo, salientam-se as seguintes características desejáveis para geradores de indução:

- alto rendimento – o gerador de indução operando interligado à rede deve apresentar baixo valor das perdas principais (perdas Joule e ferromagnéticas);
- baixos valores de capacitores conectados em paralelo com o gerador interligado à rede – significa o dimensionamento do banco de capacitores para a compensação da potência reativa;
- a potência ativa fornecida pelo gerador de indução interligado à rede deve apresentar uma forma de onda senoidal – refere-se à qualidade da energia gerada. Para isto, é necessário reduzir harmônicos associados com enrolamentos e ranhuras.

Através do estudo das diretrizes encontradas na literatura, observaram-se diretrizes com objetivos conflitantes. Neste contexto, questões geométricas de projeto afetam diversas

características de desempenho, sendo por muitas vezes recomendado o emprego de otimização multiobjectivo, como relata a referência (LIUZZI *et al.*, 2003). Entretanto, como não é o foco deste estudo desenvolver e aplicar algoritmos de otimização, utilizou-se análises paramétricas para definir a melhor escolha, quando necessário. Assim, os objetivos para projetos de geradores de indução propostas neste trabalho são apresentadas na Tabela 1. Salienta-se que os valores de fator de potência e rendimento tem maior importância que os valores da área de secção da ranhura e da taxa de distorção harmônica nas escolhas realizadas nas análises paramétricas.

**Tabela 1 Objetivos para projetos de geradores de indução interligado à rede.**

Variável	Unidade	Tipo
Rendimento	%	Maior-é-melhor
Fator de Potência	(sem unidade)	Maior-é-melhor
Área da Secção da Ranhura	mm <sup>2</sup>	Menor-é-melhor
Taxa de distorção harmônica	%	Menor-é-melhor

### 2.1.3 Características em Regime Permanente

Em máquinas de indução trifásicas, as tensões aplicadas no enrolamento do estator estabelecem correntes através das bobinas do mesmo. Estas correntes criam campos magnéticos alternados que, somados a cada instante, dão origem a um campo magnético resultante cuja orientação gira em torno de um eixo, formando assim o campo girante da máquina (CHAPALLAZ, 1992) (SANTOS, 2003) (FITZGERALD, 2003). A velocidade síncrona do campo girante da máquina é determinada pela Equação (1).

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

Onde,

$n_s$  – velocidade síncrona, [r/min];

$f$  – frequência, [Hz];

$p$  – número de pares de polos.

Para que haja força eletromotriz induzida no rotor, é necessário que as barras ou enrolamentos do rotor cortem as linhas de fluxo magnético do campo girante. Isto apenas ocorre se houver um movimento relativo entre o rotor e o campo girante. Na operação como motor, a rotação do rotor  $n$  é sempre menor que a do campo girante  $n_s$ . A diferença entre a velocidade do campo girante, velocidade síncrona e a do rotor, chama-se deslizamento das rotações, ou escorregamento de rotação, ou escorregamento de fase ou ainda simplesmente escorregamento (CHAPALLAZ, 1992) (FITZGERALD, 2003). Prefere-se apresentar o escorregamento  $s$  correspondente a uma determinada rotação  $n$  em r/min como uma fração da velocidade síncrona  $n_s$ , também em r/min, conforme mostra a Equação (2).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Onde,

$s$  – escorregamento;

$n_s$  – rotação síncrona, [r/min];

$n$  – rotação do rotor, [r/min].

Na máquina de indução, o campo girante da armadura e o rotor têm velocidades diferentes; observam-se, então, três possibilidades segundo as quais ela pode funcionar (SANTOS, 2003):

- a) Se a velocidade do seu rotor for menor que a do campo girante, mas no mesmo sentido, a máquina assíncrona se comporta como motor, fornecendo potência mecânica em seu eixo.
- b) Quando a velocidade do rotor for maior do que a síncrona, ela se transforma em gerador de energia elétrica; neste caso, uma outra máquina deve ser ligada ao seu eixo e desta forma transferir-lhe energia mecânica que será convertida em energia elétrica nos terminais do estator.
- c) Se o campo girante da armadura e do rotor tiverem sentidos de rotação diferentes, a máquina está na região de frenagem; o conjugado motor de origem elétrica e que atua sobre o eixo é o conjugado resistente.

A Figura 8 apresenta a curva de conjugado versus velocidade angular para a máquina de indução e mostra as faixas de operação.

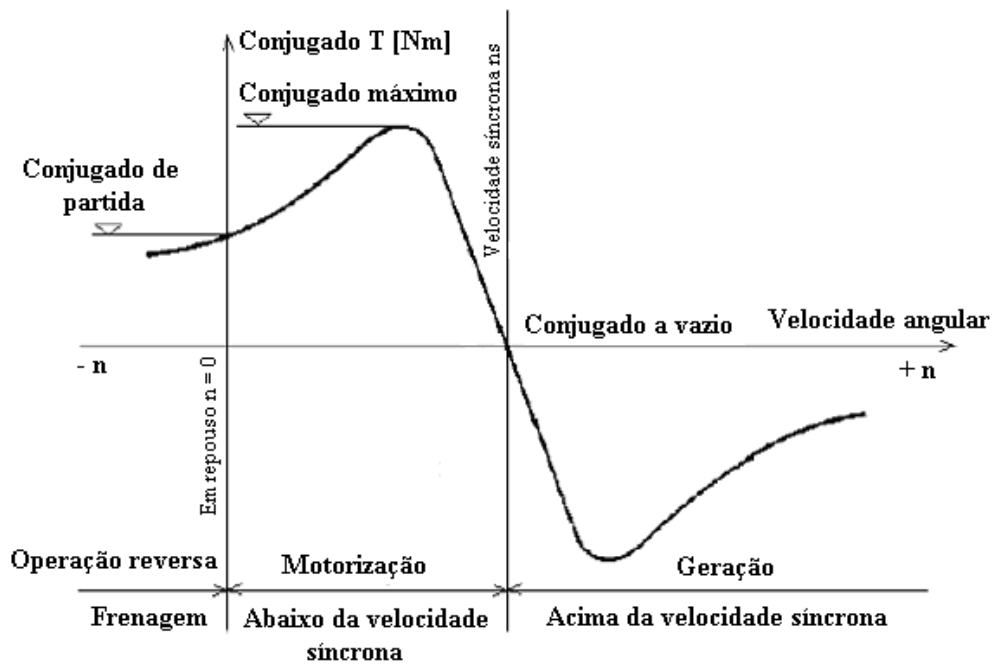
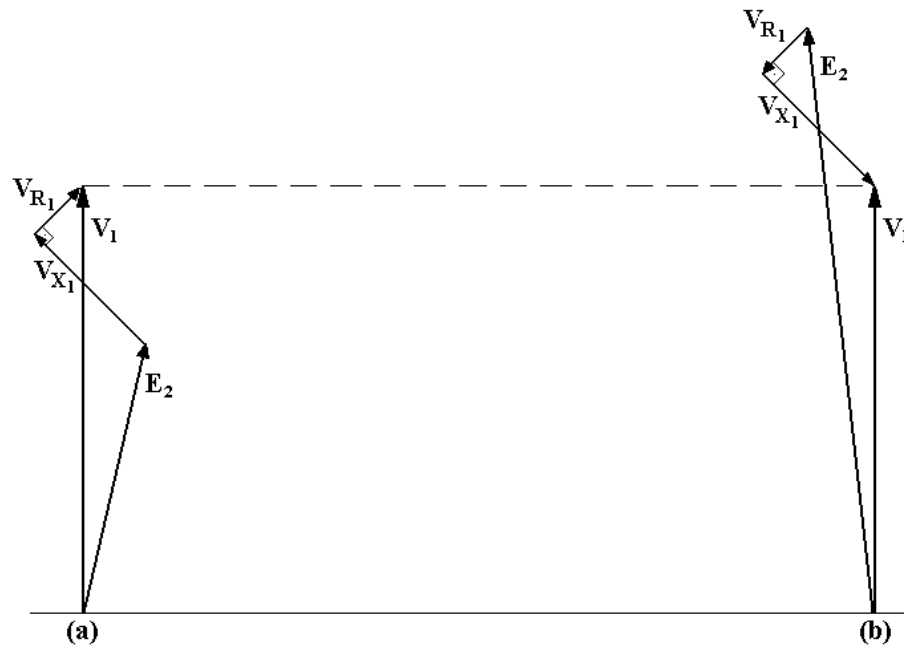


Figura 8 Conjugado versus velocidade da máquina de indução (SANTOS, 2003).

## 2.2 OPERAÇÃO COM ESCORREGAMENTO NEGATIVO

Para a máquina de indução funcionar como gerador interligado à rede, ela precisa atingir velocidade sobressíncrona, ou seja, operar com escorregamento negativo. Essa faixa de operação caracteriza-se pelo fornecimento de potência mecânica através de uma máquina primária. O valor da tensão induzida através do entreferro  $E_2$  é menor que a tensão nos terminais  $V_1$  do motor de indução. Entretanto, como gerador, a tensão induzida  $E_2$  terá que ser maior que  $V_1$  para manter o mesmo valor de tensão nos terminais. A Figura 9 ilustra os fasores resultantes da tensão induzida.





**Figura 9** Fasores da tensão induzida  $E_2$  no entreferro: (a) escorregamento positivo e (b) escorregamento negativo (CHAPALLAZ, 1992).

Conforme aumenta a velocidade sobressíncrona, a potência ativa gerada irá aumentar também. Por definição, o valor da corrente no estator não deve ultrapassar o valor nominal informado pelos dados de placa da máquina, evitando danos aos enrolamentos. Sendo assim, após suprir a parcela de potência envolvida em perdas (enrolamentos e núcleo), potência ativa passa a ser entregue à carga ou rede conectada nos terminais da máquina.

O conhecimento dos parâmetros do circuito equivalente por fase possibilita a determinação de várias características das máquinas de indução em regime permanente. Algumas destas características são as variações de corrente, o conjugado máximo e de partida, velocidade e perdas. Como na máquina de indução os parâmetros do circuito elétrico equivalente são considerados constantes, apenas a faixa de escorregamento difere os modos de operação (frenagem, motorização e geração), o circuito equivalente monofásico mostra-se útil na análise das mais variadas aplicações. Na prática, porém, essa constância dos parâmetros pode não se manter devido ao efeito térmico sobre as resistências, por exemplo.

O conjugado eletromagnético correspondente à potência envolvida no entreferro pode ser obtido a partir da Equação (3) (FITZGERALD, 2003).

$$T_{mec} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (3)$$

Onde,

$T_{mec}$  – conjugado eletromagnético, [Nm];

$P_g$  – potência envolvida no entreferro da máquina, [W];

$\omega_s$  – velocidade angular síncrona, [rad/s].

Observando o circuito equivalente da Figura 10, afirma-se que a potência envolvida no entreferro da máquina na operação com escorregamento negativo é determinada pela Equação (4).

$$P_g = n_{fases} I_{2(s<0)}^2 \left( \frac{R_2}{s} \right) \quad (4)$$

Onde,

$n_{fases}$  – número de fases;

$I_{2(s<0)}$  – corrente referida ao circuito do rotor para operação com escorregamento negativo [A];

$R_2$  – resistência do rotor [ $\Omega$ ].

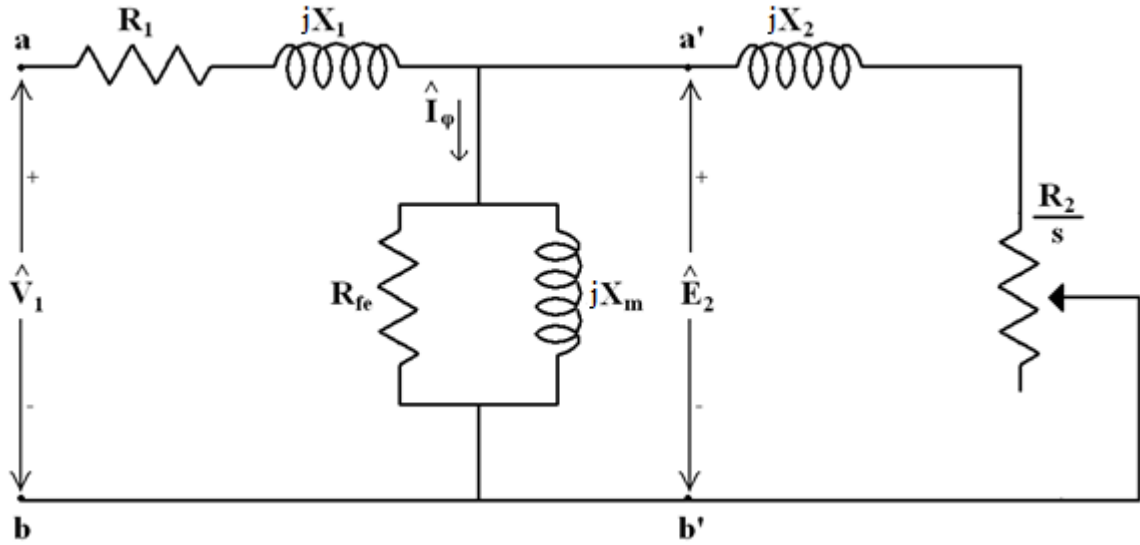


Figura 10 Circuito equivalente por fase de um motor de indução (FITZGERALD, 2003).

A componente de excitação  $\hat{I}_\phi$  é a corrente de excitação no estator que é necessária para criar o fluxo magnético de entreferro, sendo uma função da tensão induzida  $\hat{E}_2$  (FITZGERALD, 2003).

As perdas ôhmicas associadas ao circuito do rotor  $P_{J2}$  são calculadas pela Equação (5).

$$P_{J2} = n_{fases} I_{2(s<0)}^2 R_2 \quad (5)$$

A potência eletromagnética  $P_{mec(s<0)}$  pode ser determinada pelo resultado da soma da dissipação de potência no rotor com a potência no entreferro, conforme mostra a Equação (6).

$$\begin{aligned} (-1)P_{mec(s<0)} &= |P_g| + P_{J2} = \left| n_{fases} I_2^2 \left( \frac{R_2}{s} \right) \right| + n_{fases} I_2^2 R_2 \\ (-1)P_{mec(s<0)} &= |P_g| + P_{J2} = n_{fases} I_2^2 R_2 \left( \frac{1+|s|}{|s|} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Voltando à Equação (3), a potência eletromagnética  $P_{mec(s<0)}$  e as perdas ôhmicas  $P_{J2}$  envolvidas no circuito do rotor serão as seguintes frações da potência de entreferro:

$$P_{mec(s<0)} = (1 + |s|)P_g \quad (7)$$

$$P_{J2} = sP_g \quad (8)$$

A tensão induzida no gerador de indução  $\hat{E}_{2(s<0)}$  é maior que na operação como motor. Sendo assim, de acordo com a Figura 9, a tensão induzida  $\hat{E}_{2(s<0)}$  é a soma da tensão nos terminais  $\hat{V}_1$  mais a queda de tensão no estator ( $\hat{V}_{R1} + \hat{V}_{X1}$ ). Uma formulação para o conjugado com escorregamento negativo pode ser realizado a partir da determinação da tensão induzida  $\hat{E}_{2(s<0)}$ , da corrente  $\hat{I}_{2(s<0)}$  e do conhecimento da impedância  $Z_{ab}$  referente ao circuito equivalente monofásico:

$$\hat{E}_{2(s<0)} = \hat{V}_1 + (\hat{V}_{R1} + \hat{V}_{X1}) = \left( \hat{V}_1 + \frac{(R_1 + jX_1)\hat{V}_1}{Z_{ab}} \right) \quad (9)$$

$$\hat{I}_{2(s<0)} = \frac{\hat{E}_{2(s<0)}}{R_2/s + jX_2} \quad (10)$$

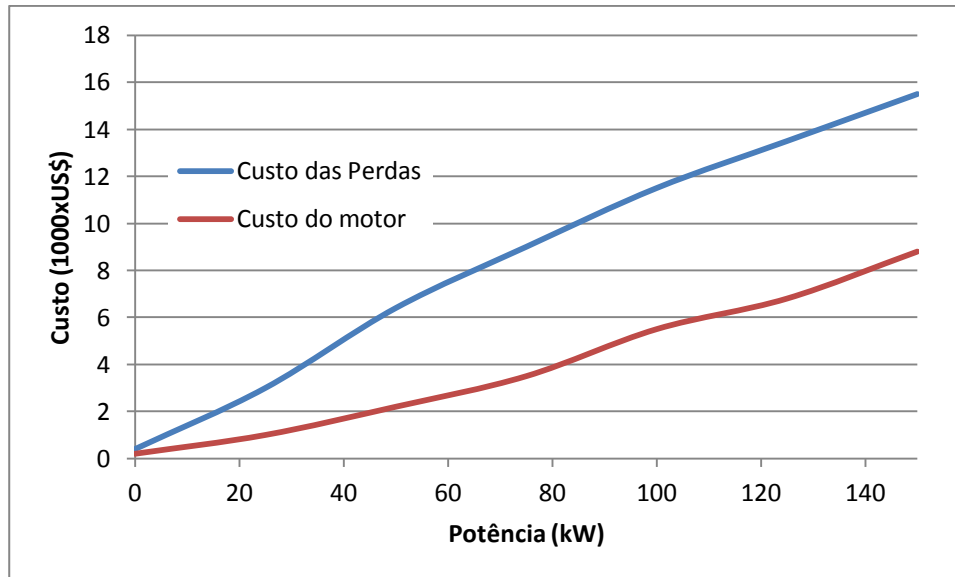
Logo, o conjugado eletromagnético gerador pode ser calculado com a combinação das Equações (3), (9) e (10), e a potência eletromagnética do gerador de indução pelas Equações (7), (9) e (10):

$$T_{mec(s<0)} = \frac{n_{fases}}{\omega_s} \left[ \left( \frac{\hat{E}_{2(s<0)}}{R_2/s + X_2} \right)^2 \left( \frac{R_2}{s} \right) \right] \quad (11)$$

$$P_{mec(s<0)} = n_{fases} (1-s) \left[ \left( \frac{\hat{E}_{2(s<0)}}{R_2/s + X_2} \right)^2 \left( \frac{R_2}{s} \right) \right] \quad (12)$$

### 2.3 PERDAS NO GERADOR DE INDUÇÃO

As máquinas de indução trifásicas (MIT), mesmo sendo consideradas máquinas eficientes, apresentam várias formas de perdas que, em geral, se denotam em perdas fixas, que não dependem da carga, e variáveis, as quais dependem da carga (ELETROBRÁS, 2009). Ao longo da vida útil da MIT, as perdas tendem a assumir um valor maior do que o custo de aquisição da máquina, salientando a importância do emprego de máquinas elétricas com alto rendimento. A Figura 11 mostra o custo e as perdas após cinco anos de aquisição da MIT.



**Figura 11** Custo do motor e custo das perdas em cinco anos (motores de indução trifásicos de quatro polos) (COGO, JÚNIOR, PONZETTO 1998).

De acordo com o princípio da conservação de energia, compreende-se que a potência útil de uma máquina é menor que a potência cedida a ela ou de entrada e, sempre, haverá alguma parcela de perda associada ao processo de conversão eletromecânica de energia. Assim, a razão da potência de saída pela potência de entrada, conhecida como o rendimento de uma máquina elétrica, é definida conforme a Equação (13).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (13)$$

### 2.3.1 Perdas Joule

As perdas Joule referem-se às parcelas de perdas dos condutores localizados no estator e no rotor. Estimadas entre 25% e 40% das perdas totais de um motor trifásico em condições nominais, as perdas com maior significância encontram-se nos condutores do estator, sendo dependentes da seção dos condutores e do comprimento das bobinas (OLIVEIRA, 2013). No

gerador de indução, a parcela de perdas Joule assume um valor de porcentagem menor em relação às perdas totais, devido ao acréscimo das perdas rotacionais que são proporcionais ao cubo da velocidade, logo, estas perdas são maiores na operação como gerador (velocidade sobre síncrona), e as perdas ferromagnéticas, sendo esta última parcela dependente do nível de saturação magnética do núcleo.

### **2.3.1.1 Perdas no Estator e no Rotor**

Normalmente, os condutores do estator são de fios de cobre. Conforme o valor da tensão aplicado na MIT e dentre outros fatores, os fios podem ser de seção circular, formando os condutores definidos como enrolamentos randômicos. Outra constituição, conhecida como bobinas pré-formadas, utilizam fios de seção retangulares. Também relacionado com o valor da tensão, os condutores podem ser esmaltados (baixa tensão) ou cobertos com camadas de mica (média e alta tensão) que proporcionam o aumento da isolação. Referente ao rotor (barras e anéis), as perdas Joule representam entre 15% e 25% das perdas totais de um motor de indução trifásico e de um gerador de indução trifásico não saturado, dependentes, principalmente, do material constituinte das barras, do comprimento e de sua seção. Comumente, as barras do rotor são de cobre ou de alumínio com as extremidades curto circuitadas (anéis de curto circuito) (OLIVEIRA, 2013). No gerador de indução, a parcela de perdas Joule no rotor assume um valor de porcentagem menor em relação às perdas totais, devido ao acréscimo das perdas rotacionais, proporcionais à velocidade, e as perdas ferromagnéticas, dependente do nível de saturação magnética do núcleo do rotor.

Relacionada com as perdas Joule, a resistividade do condutor varia conforme o material constituinte, sendo o valor da resistência dependente da geometria. A expressão (14) define-a.

$$R = \frac{\rho l}{S_{\text{área}}} \quad (14)$$

Onde,

$R$  - resistência do material, [ $\Omega$ ];

$\rho$  - resistividade do material, [ $\Omega\text{m}$ ];

$l$  - comprimento do material, [m];

$S_{\text{área}}$  - área do material, [ $\text{m}^2$ ].

O cálculo das perdas Joule do estator, de acordo com as normas técnicas, é realizado conforme mostra a Equação (15).

$$P_{J1} = 3I_{f1}^2 R_{cc} \quad (15)$$

Onde,

$P_{J1}$  – perdas Joule referente ao estator, [W];

$I_{f1}$  – corrente de fase do estator, [A];

$R_{cc}$  – resistência de fase do estator corrigida para temperatura ambiente especificada, [ $\Omega$ ].

A medição da resistência  $R_{cc}$ , de acordo com a norma (IEEE-112, IEC), é realizada com a máquina desligada e com os enrolamentos em temperatura ambiente. Em função do valor da resistência variar em função da temperatura, o valor medido é adequado de acordo com a Equação (16).



$$\frac{R_T}{R_t} = \frac{k + \theta_T}{k + \theta_t} \quad (16)$$

Onde,

$R_T$  - resistência referente à operação em regime permanente, [ $\Omega$ ];

$R_t$  - resistência referente à máquina em repouso e à temperatura ambiente, [ $\Omega$ ];

$\theta_T$  - temperatura medida correspondente a  $R_T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$\theta_t$  - temperatura medida correspondente a  $R_t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$k$  - 234,5 para enrolamentos de cobre, e 225 para enrolamentos de alumínio.

No caso de haver impossibilidade da medição da temperatura do enrolamento da máquina, por exemplo, para máquinas em operação e apresentando defeitos nos sensores de temperatura instalados nos enrolamentos do estator, a resistência medida deve ser corrigida baseando-se na Tabela de temperatura de operação por classe de isolamento, como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2 Temperatura por classe de isolamento (NBR 7094, 2003).**

Classe de Isolamento	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
A	60
B	80
F	105
H	125

Experimentalmente mais difícil, a medição das perdas Joule referente ao rotor gaiola de esquilo é mais engenhosa para ser estabelecida devido à inexistência de acesso direto para medição da corrente e da resistência requeridas para o cálculo da potência dissipada. Analiticamente, as perdas no rotor do gerador de indução são obtidas a partir do

conhecimento da potência do entreferro  $P_g$  e do escorregamento  $s$  da máquina de acordo com a Equação (17).

$$P_{J2} = |s|P_g = P_{mec(s<0)} - P_g \quad (17)$$

Onde,

$P_{J2}$  – perdas Joule no rotor, [W];

$s$  – escorregamento;

$P_g$  – potência envolvida no entreferro, [W];

$P_{mec(s<0)}$  – potência eletromagnética, [W].

### 2.3.1.2 Efeito Pelicular

O efeito pelicular relaciona a conformidade da densidade de corrente alternada ser maior nas periferias do condutor. À medida que a frequência no condutor aumenta, este efeito torna-se mais significativo, ao ponto de não conduzir corrente no centro do condutor. Assim, ocorrem variações na impedância indutiva e, conseqüentemente, na distribuição da densidade de corrente na seção dos condutores. Esta distribuição não uniforme da corrente faz com que a resistência em corrente alternada torne-se maior. Dessa forma, quanto maior a seção transversal do condutor e, ou, a frequência, maior é a influência do efeito pelicular sobre a resistência do condutor (ANDRADE, 2009) (IVANOV, 1982).

O valor da corrente em um condutor é definido através da Equação (18) (SAWHNEY, 2006).

$$I = \frac{V}{\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}} \quad (18)$$

Onde,

$I$  – corrente no condutor, [A];

$V$  – tensão, [V];

$R$  – resistência elétrica do material condutor, [ $\Omega$ ];

$\omega$  – frequência angular, [rad/s];

$L$  – indutância do condutor, [H/m].

O efeito pelicular em sua forma mais simples, ou seja, considerando um condutor puramente resistivo, é influenciado exclusivamente pela frequência da corrente de acordo com a Equação (19). Graficamente, esta Equação esta representada na Figura 12 (ANDRADE, 2009).

$$R_{AC} = R_{CC} k \sqrt{f} \quad (19)$$

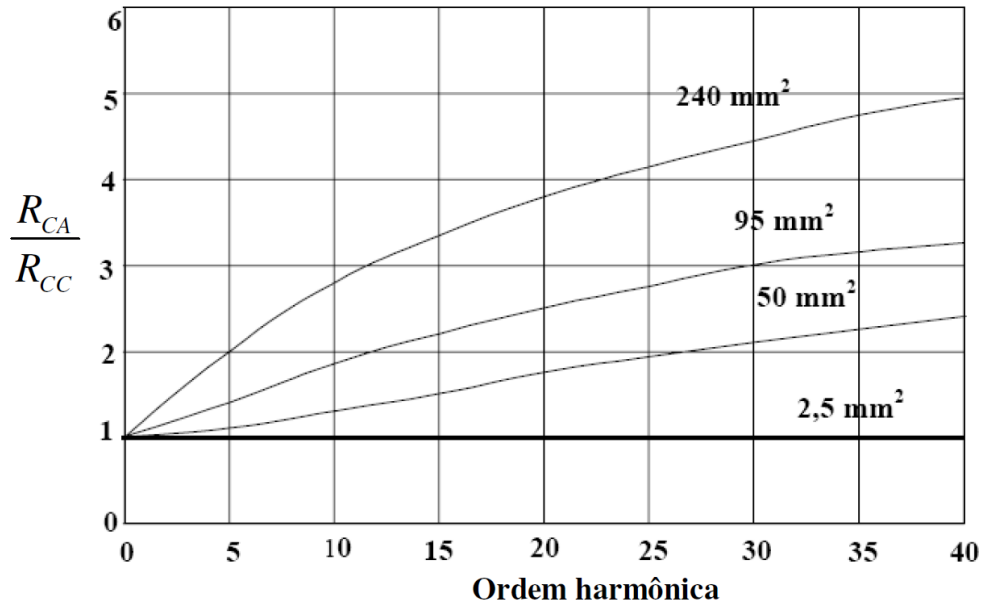
Onde,

$R_{AC}$  – Resistência de corrente alternada, [ $\Omega$ ];

$R_{CC}$  – Resistência de corrente contínua, [ $\Omega$ ];

$k$  – fator do condutor, depende da seção;

$f$  – frequência, [MHz].



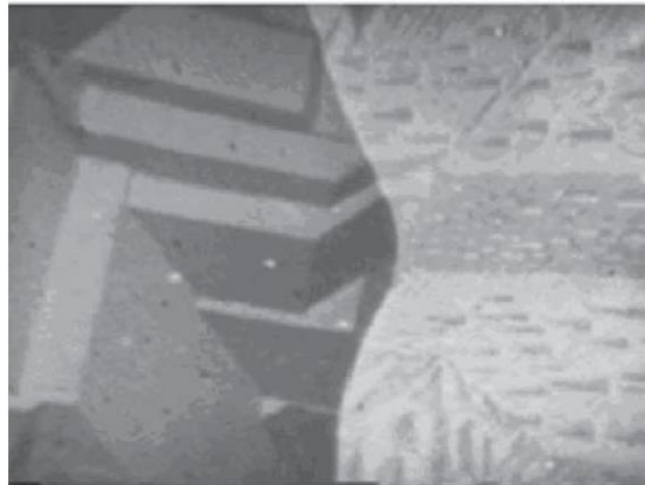
**Figura 12** Relação entre a Resistência CA e CC em função da ordem harmônica para cabos de seção de 2,5 mm<sup>2</sup>, 50 mm<sup>2</sup>, 95 mm<sup>2</sup> e 240 mm<sup>2</sup> (ANDRADE, 2009).

Para os enrolamentos de uma máquina de indução trifásica, independente do modo de operação, o efeito pelicular tem maior significância sobre os enrolamentos do estator de máquinas de potência elevada, também, sobre as barras do rotor que possuem seções transversais significativas, mesmo em máquinas de baixa potência, pois a frequência da corrente induzida é proporcional ao valor do escorregamento (ANDRADE, 2009).

### 2.3.2 Perdas no Núcleo Ferromagnético

As perdas ferromagnéticas ocorrem devido à variação do fluxo magnético. Elas são separadas em perdas clássicas (perdas por histerese e por corrente parasita) e perdas anômalas (excedentes). Para melhor compreensão, primeiramente, define-se que, no interior de um material ferromagnético, os momentos magnéticos de cada átomo ordenam-se de forma a minimizar a energia magnética do sistema. Essa mínima energia relaciona-se com o aparecimento de sub-regiões denominadas domínios magnéticos (ESPÍNDOLA, 2003).

Os domínios magnéticos são volumes com dimensões milimétricas, entre 0,001 e 1 mm de largura, onde um determinado número de spins está alinhado na mesma direção na ausência de campos exteriores e são mantidos assim por forças de ligação atômicas. A Figura 13 mostra a estrutura de domínios em dois grãos vizinhos (o da esquerda com plano paralelo a superfície e o da direita com plano próximo a superfície), onde há um acoplamento entre domínios de um grão e outro, havendo continuidade das paredes de domínio através dos contornos do grão. As interfaces entre os domínios magnéticos medem centenas de nanômetros e são denominadas “paredes de domínios magnéticos” (LANDGRAF, 2002).



**Figura 13 Exemplo da estrutura de domínios em dois grãos vizinhos (LANDGRAF, 2002).**

### **2.3.2.1 Perdas por Histerese**

No gerador de indução, a perda por histerese relaciona a energia requerida para realizar a orientação dos domínios magnéticos durante cada ciclo do campo magnético aplicado ao núcleo ferromagnético (CHAPMAN, 2010). Esta energia necessária para realizar este deslocamento é dissipada em forma de calor. A perda por histerese pode ser representada pela variação da energia histerética ( $W_h$ ) durante todo o ciclo de histerese, conforme mostra a

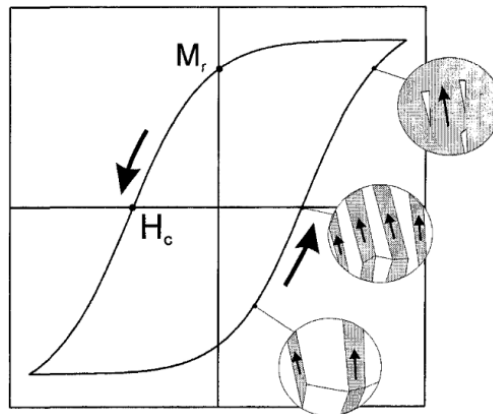
Figura 14. Esta energia é dada pela Equação (19) (BATISTELA, LUZ, 2000) para o caso quase estático, ou seja, para uma frequência muito próxima a 0 Hz:

$$W_h = \frac{1}{m_v} [\int H dB]_{\text{laço}} \quad (19)$$

Onde,

$W_h$  – energia histerética, [J/kg];

$m_v$  – massa específica do material ferromagnético, [kg/m<sup>3</sup>].



**Figura 14** Representação do ciclo de histerese e seus domínios magnéticos (OLIVEIRA, 2013).

Com o objetivo de evitar cálculos computacionais para o cálculo da área do ciclo de histerese, Steinmetz determinou uma fórmula empírica para o cálculo da perda por histerese baseada em estudos experimentais e considerando uma variação senoidal da excitação, conforme mostra a Equação (20).

$$P_{h(\text{Steinmetz})} = k_h f B_{\text{max}}^n \quad (20)$$

Onde,

$P_{h(\text{Steinmetz})}$  – potência histerética, [W/m<sup>3</sup>];

$k_h$  – constante dependente da característica do núcleo do material;

$f$  – frequência da excitação senoidal, [Hz];

$B_{max}$  – densidade de fluxo máximo;

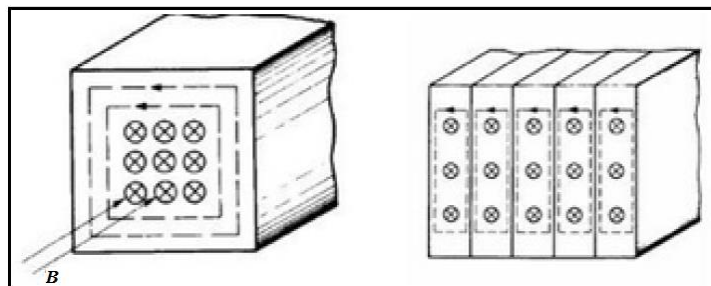
$n$  – expoente de Steinmetz.

A constante  $k_h$  depende do material e do sistema de unidades utilizado, o expoente  $n$  depende do material e varia entre 1,4 a 1,8 para lâminas de aço silício (valor típico igual a 1,6) (KÖFLER, 2008).

Salienta-se que nessa condição quase estática as perdas por correntes parasitas são desprezíveis (BATISTELA, LUZ, 2000) (ANDRADE, 2009).

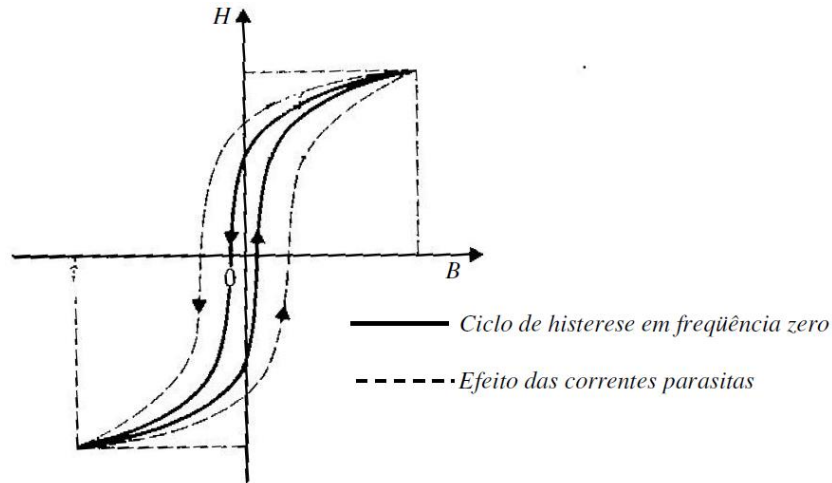
### 2.3.2.2 Perdas por Correntes Parasitas

Nas máquinas de indução, independente do modo de operação, as perdas por correntes parasitas são geradas através das correntes induzidas no núcleo ferromagnético quando este é submetido a um fluxo variável no tempo (MEURER, 2005). A Figura 15 mostra a distribuição das correntes induzidas em lâminas ferromagnéticas.



**Figura 15** Distribuição das correntes induzidas em lâminas ferromagnéticas (KOTHARI, NAGRATH, 2010).

Um dos efeitos das correntes parasitas é o aumento da área do laço de histerese, conforme mostra a Figura 16.



**Figura 16** Efeito das correntes parasitas na curva de histereses (ANDRADE, 2009).

Considerando-se que a densidade de fluxo magnético varia em regime senoidal e que se tratando de perdas não é o valor instantâneo, mas sim, o valor médio o mais relevante, e dividindo as perdas pelo volume da lâmina no núcleo laminado, tem-se a expressão que representa a potência dissipada nas lâminas por correntes induzidas por unidade de volume em  $[\text{W}/\text{m}^3]$ , conforme mostra a Equação (21) (PIRES, 2008).

$$P_p = \frac{1}{24} \sigma \omega^2 e^2 B_{max}^2 \quad (21)$$

A Equação (22) pode ser reescrita em função da constante  $k_f$ .

$$P_p = k_f \sigma \omega^2 e^2 B_{max}^2 \quad (22)$$

Onde,

$k_f$  – constante para correntes de Foucault;

$\sigma$  – condutividade elétrica do núcleo ferromagnético,  $[\Omega/\text{m}]$ .

$e$  – espessura da lâmina,  $[\text{m}]$ ;

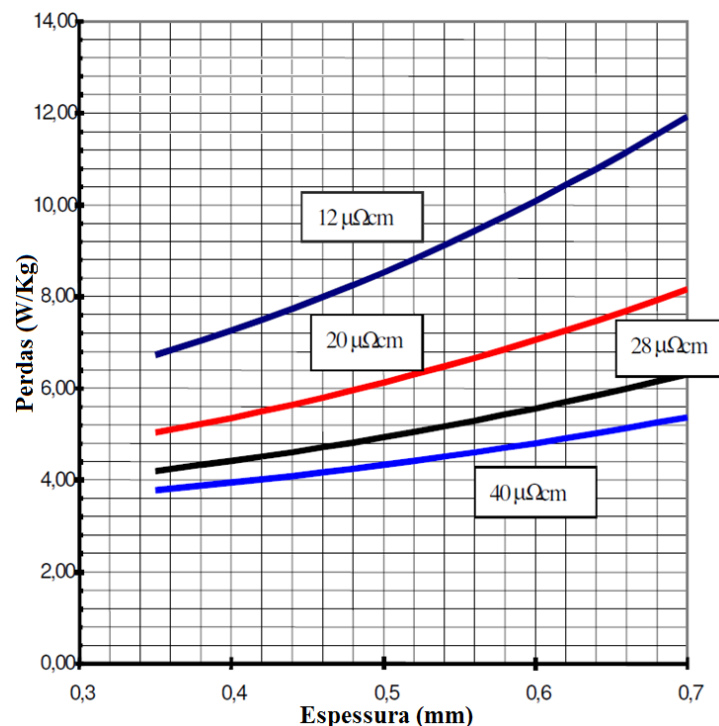
$B_{max}$  – indução magnética máxima,  $[\text{T}]$ .



A Equação (22) evidencia que as perdas parasitas são proporcionais ao quadrado da espessura da laminação. Por esta razão, no projeto dos dispositivos eletromagnéticos, o núcleo é dividido em lâminas menos espessas. Entre as lâminas é utilizado um revestimento especial de forma que os caminhos de correntes parasitas fiquem limitados a áreas menores no interior da lâmina de material ferromagnético (CHAPMAN, 2010), conforme mostrado na Figura 15. Para dispositivos eletromagnéticos, a espessura da laminação usualmente varia entre 0,3 a 0,5mm. Especificamente, nas máquinas elétricas girantes de grande porte são utilizadas em sua maioria lâminas de 0,5mm (KOTHARI, NAGRATH, 2010).

Também, com objetivo de reduzir as correntes parasitas e aumentar a resistividade do material, utilizam-se a inserção de silício (também alumínio ou outras substâncias) ao aço do núcleo ferromagnético (MEURER, 2005).

A Figura 17 apresenta as perdas em função da espessura das lâminas para variadas resistividades dos materiais.



**Figura 17** Efeito da espessura das chapas e diferentes valores de resistividades em relação aos valores de perdas para o valor de densidade de fluxo de 1,5T e frequência de 60 Hz (SANTOS, 2005).

Recentemente, verificou-se que a Equação empregada para o cálculo das perdas por correntes parasitas não representava a totalidade das perdas no ferro. Os valores aferidos foram superiores aos previstos. Assim, designou-se uma nova parcela de perdas, conhecidas como perdas excedentes (ou anômalas) (BEAN, PRY, 1958).

### 2.3.2.3 Perdas Excedentes

As perdas excedentes, também conhecidas por perdas anômalas, representam a parcela de perdas produzidas por correntes parasitas geradas a partir da variação do campo magnético aplicado no material ferromagnético e que não são calculadas pelo método clássico de modelagem das perdas, sendo em muitos casos maiores que as próprias perdas clássicas (AGUIAR, ANTUNES, 2005). Tais perdas dependem de coeficientes de difícil mensuração prática, tais como: tamanho de grão, condutividade elétrica, campo coercitivo, coeficientes empíricos, dentre outros.

De acordo com a bibliografia, as perdas em excesso são supostamente originadas do excesso de correntes induzidas em decorrência do processo de deslocamento das paredes de domínio que leva a perdas irreversíveis de energia, induzindo correntes parasitas em nível microscópico (AGUIAR, ANTUNES, 2005). A partir de um modelo para separação de perdas incluindo os efeitos da existência de domínio e de paredes de domínio na microestrutura, resulta a Equação (23) (BEAN, PRY, 1958).

$$P_{exc} = (\gamma - 1)P_p \quad (23)$$

Onde,

$P_{exc}$  – perdas excedentes, [W]

$\gamma \cong 1,63(D/e)$

$D$  – distância média de equilíbrio entre paredes de domínios, [mm];

$e$  – espessura da lâmina, [mm];

As perdas por excesso estariam relacionadas à componente histerética. De acordo com o princípio geral das perdas, podem-se calcular separadamente as perdas por excesso através da Equação (24) (BERTOTTI, 1988).

$$P_{exc}(média)(t) = 8,76\sqrt{\sigma G V_0} (f_{max} B_{max})^{3/2} \quad (24)$$

Onde,

$G$  – coeficiente adimensional que representa o coeficiente de atrito do movimento das paredes dos domínios, onde  $G \approx 0,136$  (BERTOTTI, 1988);

$V_0$  – equivale a um campo coercitivo em excesso no processo de magnetização do material, [A/m];

$f_{max}$  – frequência máxima, [Hz].

Os valores de  $G$  e de  $V_0$  são de difícil determinação e exigem alta tecnologia. No entanto, existem outras formas para determinação das perdas magnéticas, já que são parâmetros relacionados à microestrutura do material. Conforme a referência (CAMPOS, FALLEIROS, LANGRAFF, 2003), leva-se em conta observações da estrutura de domínios e da microestrutura em diferentes frequências e considera-se que existem dois tipos de perdas, a histerética e outra se comportando como uma fricção dinâmica ( $P_p + P_{exc}$ ).

### 2.3.3 Perdas Rotacionais por Atrito e Ventilação

As perdas mecânicas estão relacionadas com os efeitos mecânicos nas máquinas de indução. Essencialmente, existem dois tipos de perdas mecânicas: por atrito e por ventilação. As perdas por atrito são intrínsecas às partes rotativas pelo contato com os rolamentos que fazem a conexão com a parte fixa da máquina. A potência gasta com o efeito de ventilação (arrefecimento e arraste aerodinâmico) tem como função principal retirar o calor da máquina produzido pelas suas perdas. Na máquina de indução, estas perdas contribuem de 5 a 15% em relação às perdas totais e são divididas em quatro tipos (CHAPMAN, 2010):

- perdas por atrito nos mancais;
- perdas por atrito do rotor com o ar;
- perdas por atrito provocadas pelos anéis de curto-circuito do rotor com o ar;
- perdas por ventilação.

Comumente, as perdas mecânicas e do núcleo de uma máquina de indução são unidas e chamadas de perdas rotacionais em vazio. Portanto, medindo a perda na entrada de uma máquina atuando como motor em vazio, obter-se-á um valor aproximado para essas perdas (CHAPMAN, 2010).

### 2.3.4 Perdas Suplementares

As normas (IEC, IEEE-112) definem as perdas suplementares como a porção das perdas não consideradas pela soma das perdas mecânicas, perdas Joule (estator e rotor) e as perdas no núcleo. Estas perdas estão relacionadas às imperfeições construtivas das máquinas e sua maior parcela é em função do fluxo de dispersão, principalmente zig-zag, responsável pelas perdas suplementares de alta frequência, as quais dependem da configuração dos dentes, ranhuras, entreferro e enrolamentos. Pode-se destacar ainda fatores adicionais determinantes à

ocorrência das perdas suplementares, tais como: limitações das propriedades do núcleo ferromagnético, estrutura geométrica da máquina e imperfeições construtivas e as falhas no isolamento entre barras do rotor. Portanto, tais perdas variam de máquina para máquina de acordo com a concepção utilizada no projeto e com as diferenças de processos de fabricação empregados (ALGER, ANGST, DAVIES, 1959) (ANDRADE, 2009) (MACHADO, 2008).

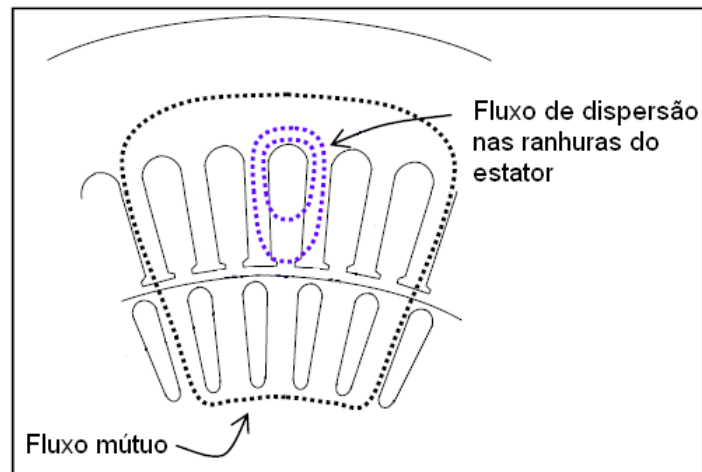
As perdas suplementares ainda são complexas de serem avaliadas analiticamente, assim como serem medidas diretamente, de tal maneira que as principais entidades internacionais de padronização determinam que o valor das perdas suplementares seja obtido por meio de valores percentuais da potência de entrada dos motores. De acordo com as normas (IEC, IEEE-112) essas perdas variam entre 0,25% a 1,8% da potência nominal da máquina. As seguintes perdas podem ser destacadas como suplementares:

- perdas devido ao fluxo de dispersão das ranhuras;
- perdas suplementares de alta frequência (perdas nas superfícies do rotor e do estator e perdas por pulsação);
- perdas devido ao fluxo de dispersão de faixa de fase;
- perdas no núcleo em motores com barras inclinadas;
- perdas nas partes finais da estrutura da máquina e nos anéis de curto-circuito do rotor.

#### **2.3.4.1 Perdas Devido ao Fluxo de Dispersão nas Ranhuras do Estator**

Esta parcela de perdas está relacionada às correntes de Foucault nos condutores do estator devido ao fluxo de dispersão das ranhuras. Dependem da corrente, do carregamento elétrico e da geometria dos condutores das bobinas. O fluxo de dispersão das ranhuras é uma parcela do fluxo magnético total da máquina que não atravessa o entreferro, enlaçando apenas

o seu enrolamento de origem (SOBRINHO, 2008) (WEG, 2012). O fluxo de dispersão nas ranhuras concatena parte dos condutores e retorna ao núcleo, conforme mostrado na Figura 18.



**Figura 18 Fluxo de dispersão nas ranhuras do estator (PYRHÖHEN, JOKINEN, HRABOVCOVÁ, 2008) (OLIVEIRA, 2013).**

A Equação (35) permite a obtenção das perdas adicionais devido ao fluxo de dispersão nas ranhuras do estator (ANDRADE, 2009).

$$P_{sup1} = \left[ K_1 + K_2 \left( \frac{I_c d_{fi}}{I_{tf} d_{fni}} \right)^2 \right] \frac{(\pi f B_{topo} d_{fni})^2}{6\rho} \quad (35)$$

Onde,

$P_{sup1}$  – perdas adicionais devidas ao fluxo de dispersão nos enrolamentos do estator

[W];

$K_1$  – fator das perdas causadas pelo efeito pelicular (normalmente 0,333);

$K_2$  – fator das perdas causadas pela circulação de correntes entre os fios do enrolamento (normalmente entre 0,18 e 0,5);

$I_c$  – comprimento transversal do núcleo [m];

$I_{tf}$  – comprimento total de um fio do enrolamento [m];

$d_{fi}$  – diâmetro de um fio do enrolamento com isolamento [m];

$d_{fni}$  – diâmetro de um fio do enrolamento sem isolamento [m];

$B_{topo}$  – densidade do fluxo de dispersão no topo da ranhura [Wb/m<sup>2</sup>];

$\rho$  – resistividade do material [ $\Omega$ m].

### 2.3.4.2 Perdas Zig-Zag

As perdas suplementares zig-zag são perdas induzidas no rotor causadas por harmônicos de força magnetomotriz (FMM) produzidos pela corrente de carga do estator, podendo também ser ocasionadas por harmônicos de FMM pela corrente no rotor. Esta parcela de perdas também pode ser originada pelo fluxo de dispersão (ou zig-zag) que percorre os dentes do estator e do rotor (JIMOH, FINDLAY, POLOUJADOFF, 1985) (MACHADO, 2008), conforme apresentado na Figura 19.

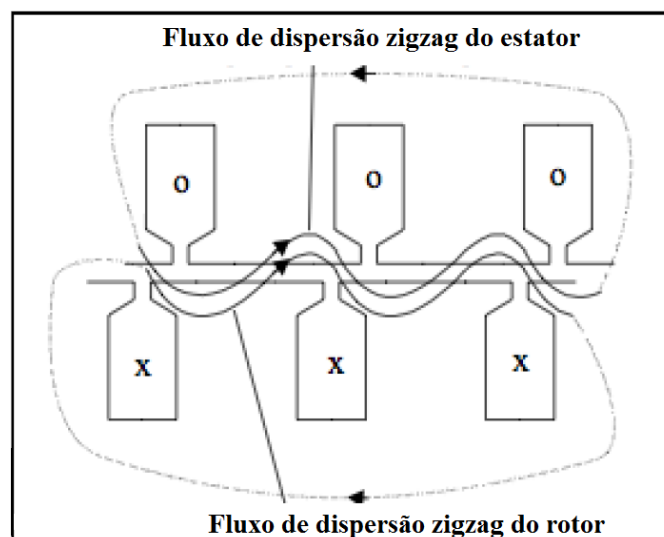


Figura 19 Fluxo de dispersão zig-zag (CHAPMAN, 2010) (OLIVEIRA, 2013).

O valor do fluxo zig-zag é diretamente relacionado à geometria das ranhuras, ao comprimento do entreferro e ao passo polar dos enrolamentos. Ranhuras semifechadas,

usualmente utilizadas em máquinas de indução, devido à variação da permeância causada pela abertura das ranhuras apresentam perdas por pulsação elevadas comparadas às ranhuras fechadas. Tal efeito é reduzido com a inserção de cunhas, as quais apresentam baixa permeabilidade magnética, reduzindo a corrente de magnetização da máquina e conseqüentemente melhorando o desempenho da máquina (ANDRADE, 2009) (CHAPMAN, 2010) (KOTHARI, NAGRATH, 2010) (MACHADO, 2008).

A redução do entreferro acarreta também em maiores perdas suplementares. Em contrapartida há uma redução na corrente magnetizante da máquina, mitigando as perdas Joule. Portanto, o projetista deve contrabalançar ambas as perdas, verificando qual delas é mais significativa em seu projeto de forma a reduzir ao máximo as perdas totais, maximizando dessa maneira o desempenho da máquina. A utilização de passo reduzido ao invés de passo pleno na bobinagem da máquina também acarretará em redução das perdas suplementares (JIMOH, FINDLAY, POLOUJADOFF, 1985).

O cálculo das perdas resistivas no rotor devidas ao fluxo de dispersão que cruza o entreferro da máquina (zig-zag) é calculado pela Equação (36) (ALGER, ANGST, DAVIES, 1959) (ANDRADE, 2009).

$$P_{supZZZ} = Cml^2(k_s R_{2b}) \quad (36)$$

Onde,

$P_{supZZZ}$  – perdas resistivas no rotor devido ao fluxo de dispersão que cruza o entreferro (zig-zag);

$C$  – fator de perda para harmônicas fundamentais. Representa as perdas provocadas pelas harmônicas de densidade de fluxo em função da relação entre o número de ranhuras do rotor e as do estator. Observam-se na Figura 20 os valores típicos dessa constante;

$m$  – número de fases;



$k_s$  – relação do efeito pelicular para as barras do rotor na frequência da ranhura do estator;

$R_{2b}$  – resistência do barramento do rotor referido ao estator, [ $\Omega$ /fase].

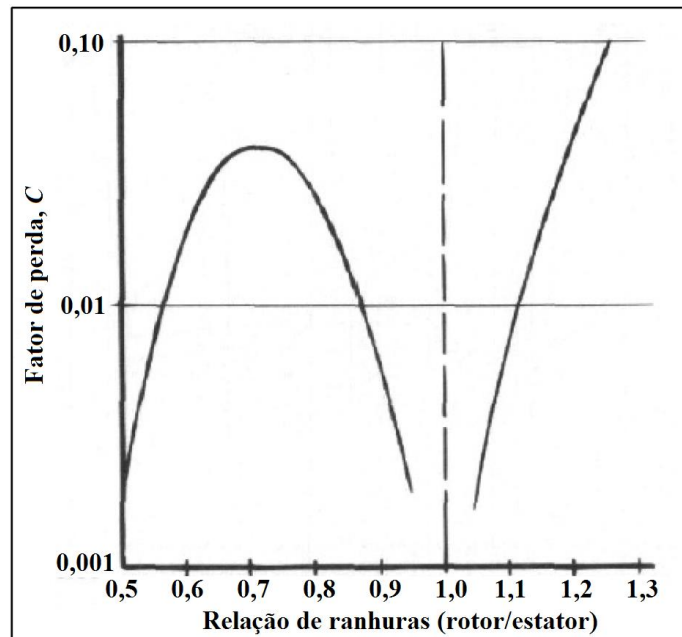
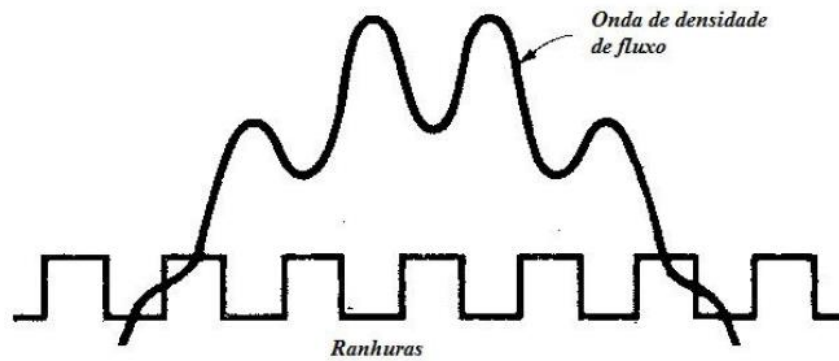


Figura 20 Influência da relação entre o número de ranhuras e as perdas zig-zag (ANDRADE, 2009).

### 2.3.4.3 Perdas na Superfície do Estator e do Rotor

Tanto a distribuição do fluxo magnético na região do entreferro quanto à distribuição da força magnetomotriz (FMM) apresentam irregularidades em suas formas de onda, devido à influência das ranhuras e da densidade de corrente nos condutores. A combinação destes efeitos provoca pulsações na densidade de fluxo na região do entreferro e geram perdas magnéticas na superfície do núcleo do estator e do rotor (OLIVEIRA, 2013). A Figura 21 representa a influência das ranhuras na forma de onda da densidade de fluxo magnético.



**Figura 21** Pulsações na densidade de fluxo magnético na região do entreferro (MECROW, 1989).

O modelo analítico deste efeito é realizado pela separação em séries de harmônicas, cujas principais componentes, além da fundamental, são aquelas proporcionais ao número de ranhuras por polos do rotor e do estator. As perdas também dependem da largura do entreferro e do comprimento do núcleo. As perdas causadas pelas pulsações na superfície do rotor e do estator podem ser calculadas pelas Equações empíricas (37) e (38) respectivamente (ANDRADE, 2009).

$$P_{\text{superfície do rotor}} = 2D_i L_{\text{núcleo}} \left( \frac{I}{Q_s \text{ por polo } I_0} \right)^2 \left( \frac{B_g}{100} \right)^2 C_{s2} \lambda_1 \quad (37)$$

$$P_{\text{superfície do estator}} = 2D_i L_{\text{núcleo}} \left( \frac{I}{Q_s \text{ por polo } I_0} \right)^2 \left( \frac{B_g}{100} \right)^2 C_{s1} \lambda_2 \quad (38)$$

Onde,

$P_{\text{superfície do rotor}}$  – perdas na superfície do rotor, [W];

$P_{\text{superfície do estator}}$  – perdas na superfície do estator, [W];

$D_i$  – diâmetro do entreferro, [m];

$L_{\text{núcleo}}$  – comprimento longitudinal do núcleo, [m];

$I$  – corrente rms de carga do estator, [A];

$Q_s \text{ por polo}$  – número de ranhuras por polo do estator;

$I_0$  – corrente rms a vazio do estator, [A];

$B_g$  – densidade média de fluxo magnético no entreferro, [T];

$C_{s1}$  – coeficiente de perdas magnéticas no estator, [W/m<sup>3</sup>];

$C_{s2}$  – coeficiente de perdas magnéticas no rotor, [W/m<sup>3</sup>];

$\lambda_1$  – passo das ranhuras do estator, [m];

$\lambda_2$  – passo das ranhuras do estator, [m].

De acordo com (OLIVEIRA, 2013), os valores de  $C_{s1}$  e  $C_{s2}$  podem variar até 900 W/m<sup>3</sup> em função das frequências das ranhuras do estator e do rotor.

#### **2.3.4.4 Perdas Devido ao Fluxo de Dispersão Faixa de Fase**

Semelhante ao fluxo de dispersão zig-zag, o fluxo de dispersão de faixa de fase ocorre devido às harmônicas espaciais no entreferro. Para os campos das harmônicas de baixa ordem, a impedância do rotor de gaiola é baixa, comparada com a reatância de magnetização quando a máquina opera em velocidade nominal. O passo da bobina do estator é, normalmente, escolhido de forma a reduzir a ordem das harmônicas de faixa de fase. As harmônicas de faixa de fase produzem um conjugado negativo, o qual se opõe ao torque principal, gerando conseqüentemente uma resistência ao movimento do rotor na rotação nominal de operação (ALGER, ANGST, DAVIES, 1959) (HODGE, WILLIAMSON, SMITH, 2002).

A quinta e sétima harmônicas apresentam as maiores influências no valor da reatância de dispersão através do fluxo de dispersão de faixa de fase. Assim, no projeto de uma MIT, é fundamental que o passo polar seja definido de forma a reduzir a quinta e, ou, sétima harmônicas, melhorando, conseqüentemente, os parâmetros de desempenho da máquina. As

perdas suplementares em baixa frequência devidas ao fluxo de dispersão de faixa de fase podem ser obtidas pela Equação (39) (OLIVEIRA, 2013).

$$P_{faixa\ de\ fase} = ml^2 k_m R_{2b} \left( \frac{K_{2m-1}^2 + K_{2m+1}^2}{K_1^2} \right) \quad (39)$$

Onde,

$P_{faixa\ de\ fase}$  – perdas suplementares devido ao fluxo de dispersão de faixa de fase, [W];

$m$  – número de fases;

$k_m$  – coeficiente de efeito pelicular para rotor de barras na frequência da faixa de fase, que em velocidade síncrona é igual a  $2mf$ ;

$k_{2m\pm 1}$  – fator de distribuição dos enrolamentos do estator, para a harmônica de ordem  $(2m \pm 1)$ . No caso da máquina trifásica para as harmônicas de 5ª e 7ª ordem;

$k_1$  – fator de distribuição dos enrolamentos do estator para a harmônica fundamental.

Concomitantemente à escolha do passo do enrolamento do estator, é possível também reduzir as harmônicas inclinando-se as barras do rotor. Porém, inclinações também originam perdas suplementares no núcleo. Assim, é de responsabilidade do projetista definir qual perda é mais significativa e prejudicial, a fim de contrabalancear ambas de forma a obter o melhor desempenho possível no projeto da máquina.

#### 2.3.4.5 Perdas no Núcleo Devido à Inclinação das Barras

Normalmente, os rotores injetados de máquinas de indução de pequeno porte são inclinados de forma a reduzir os efeitos das harmônicas, assim como o conjugado de

relutância e o provável ruído acústico devido ao ranhuramento da máquina. Além disso, as componentes de alta frequência das correntes induzidas nas barras do rotor são atenuadas. Conseqüentemente, reduzem-se as perdas Joule no rotor. No entanto, deve-se também considerar o efeito da inclinação nas perdas do núcleo.

As perdas suplementares devido à inclinação das barras do rotor são obtidas pela Equação (40) (ALGER, ANGST, DAVIES, 1959).

$$P_{\text{inclinação das barras}} = \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{\xi I_2}{Q_s I_0} \right)^2 \quad (40)$$

Onde,

$P_{\text{inclinação das barras}}$  – perdas suplementares devido à inclinação das barras do rotor,

[W];

$\xi$  - razão de inclinação para um passo de ranhura do estator;

$Q_s$  - número de ranhuras do estator;

$I_2$  - corrente rotórica eficaz [A];

$I_0$  - corrente do estator a vazio eficaz [A].

#### 2.3.4.6 Perdas nas Cabeceiras de Bobina e Anéis de Curto Circuito

As perdas suplementares nas estruturas finais da máquina são causadas por correntes parasitas induzidas devidas aos fluxos de dispersão gerados nas curvaturas (cabeceiras de bobina) dos enrolamentos do estator e do rotor, quando bobinado, e nos anéis de curto-circuito do rotor. Estes fluxos penetram nas laminações na direção axial, por exemplo, e também nas partes metálicas do final da máquina, como a proteção do ventilador e outros (ANDRADE, 2009). A Figura 22 representa a geometria em estudo.

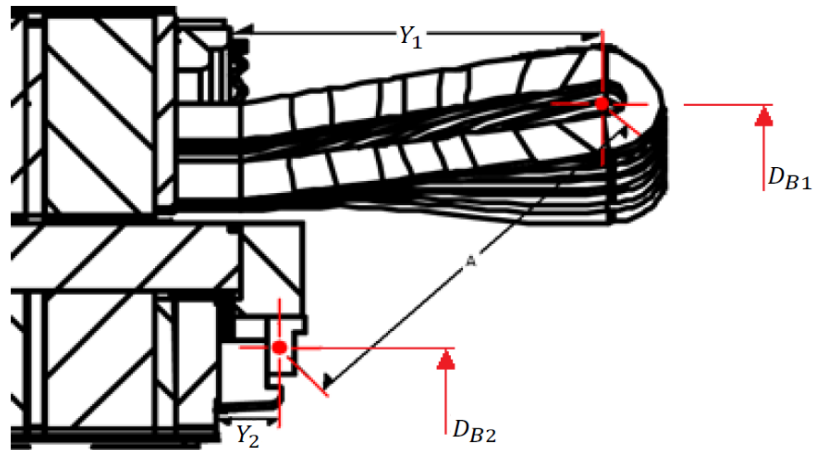


Figura 22 Partes finais do condutor do estator e do rotor (OLIVEIRA, 2013).

As perdas nas partes finais da máquina estão relacionadas à largura das dobras dos enrolamentos do estator na parte final do núcleo, à distância entre as correntes periféricas da parte final dos enrolamentos do estator e do rotor, e à proximidade entre as partes metálicas com as dobras dos enrolamentos (ANDRADE, 2009). As três principais causas destas perdas são as seguintes (MECROW, 1989):

- efeito espraiamento no entreferro na parte final do núcleo do estator;
- correntes do rotor e do estator nas partes finais do enrolamento;
- saturação diferencial no núcleo do estator.

As perdas suplementares nas partes finais da máquina de indução são obtidas pela Equação (41).

$$P_{partes\ finais} = 0,3mI_{rms}^2 \left[ \frac{1,6f_m N_{espiras}^2 D_{1ext}}{p^2 10^7} \log \left( 1 + \frac{A^2}{4Y_1 Y_2} \right) \right] \quad (41)$$

Onde,

$N_{espiras}$  – número efetivo de espiras no enrolamento por fase;

$D_{1ext}$  – diâmetro externo do estator, [m];

$p$  – número de pares de polos;

$A$  – distância entre o centro da bobina do estator e as correntes periféricas do rotor (vide Figura 22), [m];

$Y_1, Y_2$  – distância axial entre o centro das correntes periféricas do estator e do rotor e o núcleo (vide Figura 22), [m].

O valor da distância entre o centro da bobina do estator e das correntes periféricas do rotor pode ser obtido pela Equação (42):

$$A = \sqrt{\left(\frac{D_{B1} - D_{B2}}{2}\right)^2 + (Y_1 + Y_2)^2} \quad (42)$$

Onde,

$D_{B1}$  – diâmetro do centro da bobina do estator, [m];

$D_{B2}$  – diâmetro do centro da bobina do rotor, [m].

## 2.4 RENDIMENTO NO GERADOR DE INDUÇÃO

O rendimento é a razão da potência de saída pela potência de entrada. No motor de indução, é a razão entre a potência mecânica disponível no eixo e a potência de entrada (FITZGERALD, 2003). Na abordagem realizada neste estudo, o rendimento do gerador de indução é calculado como sendo a razão entre a potência elétrica ativa gerada  $P_{saída}$  e a potência mecânica entregue pela máquina primária  $P_{eixo}$ . A formulação é definida da seguinte forma:

$$\eta_{gerador} = \frac{P_{saída}}{P_{eixo}} = \frac{P_{saída}}{|P_{mec(s<0})| + P_{rot}} \quad (43)$$

A potência de entrada no motor de indução é igual à potência de saída no gerador de indução, e pode ser calculada pela Equação (44).

$$P_{saída} = n_{fases} \left| \hat{V}_1 \right| \left| \hat{I}_1 \right| \cos \varphi \quad (44)$$

Conforme o circuito equivalente mostrado na Figura 10, o fator de potência  $\cos \varphi$  pode ser determinado pelo valor do argumento da impedância do circuito visto entre os terminais  $a$  e  $b$ :

$$Z_{ab} = (R_1 + jX_1) + \left[ (R_{fe} // jX_m) // \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \right] \quad (45)$$

$$Z_{ab} = (R_1 + jX_1) + \left\{ \left[ \frac{j(R_{fe} X_m)}{R_{fe} + jX_m} \right] // \left[ \frac{R_2}{s} + jX_2 \right] \right\} \quad (46)$$

$$Z_{ab} = (R_1 + jX_1) + \left\{ \left[ \left( \frac{R_{fe} X_m^2}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) + j \left( \frac{R_{fe}^2 X_m}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) \right] // \left[ \frac{R_2}{s} + jX_2 \right] \right\} \quad (47)$$

$$Z_{ab} = (R_1 + jX_1) + \frac{\left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \left[ \left( \frac{R_{fe} X_m^2}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) + j \left( \frac{R_{fe}^2 X_m}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) \right]}{\left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) + \left[ \left( \frac{R_{fe} X_m^2}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) + j \left( \frac{R_{fe}^2 X_m}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) \right]} \quad (48)$$



$$\begin{aligned}
Z_{ab} = (R_1 + jX_1) + & \left\{ \frac{\left\{ \left[ R_{fe} X_m^2 \left[ \left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2^2 \right] + \left[ \frac{R_2}{s} R_{fe}^2 X_m^2 \right] \right\} \left[ R_{fe}^2 + X_m^2 \right]}{\left[ \frac{R_2}{s} (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe} X_m^2 \right]^2 + \left[ X_2 (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe}^2 X_m \right]^2} \right\} \\
& + j \left\{ \frac{\left\{ \left[ R_{fe}^2 X_m \left[ \left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2^2 \right] + \left[ X_2 R_{fe}^2 X_m^2 \right] \right\} \left[ R_{fe}^2 + X_m^2 \right]}{\left[ \frac{R_2}{s} (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe} X_m^2 \right]^2 + \left[ X_2 (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe}^2 X_m \right]^2} \right\}
\end{aligned} \quad (49)$$

A impedância  $Z_{ab}$  pode ser representada pela soma de uma parcela resistiva  $R_{ab}$  e outra indutiva  $X_{ab}$  (NASCIMENTO, 2012).

$$Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab} \quad (50)$$

$$R_{ab} = \left\{ R_1 + \frac{\left\{ \left[ R_{fe} X_m^2 \left[ \left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2^2 \right] + \left[ \frac{R_2}{s} R_{fe}^2 X_m^2 \right] \right\} \left[ R_{fe}^2 + X_m^2 \right]}{\left[ \frac{R_2}{s} (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe} X_m^2 \right]^2 + \left[ X_2 (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe}^2 X_m \right]^2} \right\} \quad (51)$$

$$X_{ab} = \left\{ X_1 + \frac{\left\{ \left[ R_{fe}^2 X_m \left[ \left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2^2 \right] + \left[ X_2 R_{fe}^2 X_m^2 \right] \right\} \left[ R_{fe}^2 + X_m^2 \right]}{\left[ \frac{R_2}{s} (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe} X_m^2 \right]^2 + \left[ X_2 (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe}^2 X_m \right]^2} \right\} \quad (52)$$

Adotando coeficientes definidos pelas seguintes Equações (53), (54), (55) e (56), as parcelas resistiva  $R_{ab}$  indutiva  $X_{ab}$  podem ser reescritas conforme as Equações (57) e (58).

$$a = [R_{fe} X_m] \left[ \left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2^2 \right] \quad (53)$$

$$b = R_{fe}^2 X_m^2 \quad (54)$$

$$c = R_{fe}^2 + X_m^2 \quad (55)$$

$$d = \left[ \frac{R_2}{s} (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe} X_m^2 \right]^2 + \left[ X_2 (R_{fe}^2 + X_m^2) + R_{fe}^2 X_m \right] \quad (56)$$

$$R_{ab} = R_1 + \frac{\left( X_m a + \frac{R_2}{s} b \right) c}{d} \quad (57)$$

$$X_{ab} = X_1 + \frac{(R_{fe} a + X_2 b) c}{d} \quad (58)$$

Com a combinação das Equações (50), (57) e (58) a impedância  $Z_{ab}$  é reescrita pela Equação (59).

$$Z_{ab} = \left[ R_1 + \frac{\left( X_m a + \frac{R_2}{s} b \right) c}{d} \right] + j \left[ X_1 + \frac{(R_{fe} a + X_2 b) c}{d} \right] \quad (59)$$

Logo,

$$\cos \varphi = \cos(\arg \underline{Z}_{ab}) \quad (60)$$

Com a combinação das Equações (12), (43), (15) e (59), tem-se que:

$$\eta_{gerador} = \frac{n_{fases} \left| \hat{V}_1 \right| \left| \hat{I}_1 \right| \cos \varphi}{n_{fases} (1-s) \left[ \left( \frac{\hat{E}_{2(s<0)}}{R_2/s + X_2} \right)^2 \left( \frac{R_2}{s} \right) \right] + P_{rot}} \quad (61)$$

### **3 MODELAGEM DA MÁQUINA DE INDUÇÃO ORIGINAL**

O projeto do protótipo do gerador de indução apresentado nesta tese iniciou com a escolha de uma máquina convencional, projetada para atuar como motor. A escolha da máquina de indução foi realizada em concordância com as características (potência e rotação) que a bancada de ensaios do LMEAE possui. Assim, através dos dados e características construtivas repassadas pelo fabricante, conforme descritas no anexo I, construiu-se um modelo computacional que gerasse resultados tão próximos, ou seja, com uma diferença inferior a 10% quando comparados aos resultados (corrente, rendimento, potência mecânica, potência ativa, potência reativa e fator de potência) dos ensaios experimentais realizados na máquina escolhida operando como gerador interligado à rede em regime permanente. Logo, os resultados das modelagens analítica e numérica, apresentadas neste capítulo, propuseram a idealização do protótipo do gerador de indução apresentado no Capítulo 4.

A máquina de indução original escolhida para o estudo é uma máquina de indução trifásica da fabricante Voges Metalurgia Ltda., que é uma empresa gaúcha com sede na cidade de Caxias do Sul. A Figura 23 mostra a máquina de indução original e as principais informações estão descritas na Tabela 3.



**Figura 23 Máquina de indução original: motor de indução trifásico Voges, modelo VTOP 90L, quatro polos, 2,2 kW.**

**Tabela 3 Dados e informações da máquina de indução original fornecidas pela VOGES.**

Dado	Valor
Potência (kW)	2,2
Frequência (Hz)	60
Fator de serviço	1,15
Fator de potência	0,84
Rendimento (%)	85
Velocidade nominal (r/min)	1715
Ligação triângulo: Tensão nominal (V)	220
Ligação triângulo: Corrente nominal (A)	8,1
Ligação estrela: Tensão nominal (V)	380
Ligação estrela: Corrente nominal (A)	4,7
IP/IN	7,2
Categoria	N
Classe de isolamento	F
Regime tipo	S1
Grau de proteção	IP55
Inclinação nas barras do rotor	não

### 3.1 MODELAGEM NUMÉRICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

De acordo com as referências (BOGLIETTI, *et al.*, 2003) (GMYREK, BOGLIETTI, CAVAGNINO, 2010), o uso do método de elementos finitos aplicado à máquina de indução evita o emprego de diversos fatores práticos e formulação empírica. Em virtude da necessidade de se obter resultados mais próximos em relação aos resultados obtidos através das metodologias tradicionais, como ensaios laboratoriais e cálculos analíticos, a modelagem numérica por elementos finitos permite detalhar mais fielmente as relações entre fluxos magnéticos e correntes no gerador, levando em consideração efeitos de saturação magnética e correntes induzidas por intermédio de métodos numéricos na resolução de Equações não lineares associadas. Conseqüentemente, a importância desta modelagem se fundamenta pela discussão de uma ferramenta útil aos projetistas, a qual possibilita obter resultados mais próximos da realidade física e é conhecida como método de elementos finitos (MEF).

O MEF é um método que permite avaliar, de forma numérica computacional, a solução de problemas contínuos governados por Equações diferenciais parciais. Também bastante usado na análise e projeto de dispositivos eletromagnéticos, esse método disponibiliza a montagem e simulação de um modelo virtual, considerando as propriedades físicas do modelo real, tais como a linearidade ou curva de magnetização, as condições de fronteira, a magnetização de peças geradoras de campo magnético, condutividade térmica e elétrica, velocidade, entre outras.

O objetivo principal do MEF, neste estudo, é determinar o comportamento dos parâmetros eletromagnéticos em regime permanente da máquina de indução operando como gerador de indução, possibilitando obter as características de desempenho com valores mais próximos da realidade. E ainda, avaliar esta metodologia de modelagem como ferramenta de projeto, comparando os resultados com os da modelagem analítica e dos resultados

experimentais. Visto que algumas etapas do projeto do protótipo do gerador de indução como a parametrização da ranhura assimétrica, por exemplo, seriam inconcebíveis.

Devido à complexidade de uma máquina elétrica, no seu modelo são embutidas diversas aproximações que são baseadas no profundo conhecimento do comportamento físico do elemento a ser modelado. Nos métodos de elementos finitos aplicados ao gerador de indução, a maior aproximação é o fato de modelar uma seção bidimensional (2D), pois o modelo tridimensional (3D) requer uma maior capacidade computacional, como tempo de processamento e memória. Quando se utiliza esta aproximação em 2D, surgem algumas questões para representar uma máquina real que são inerentes de uma natureza 3D, tais como (SHINDO, 2003):

- cabeça de bobina dos enrolamentos;
- anéis de curto circuito do rotor;
- inclinação das barras do rotor (caso presente);
- dutos de ventilação radial e axial (caso presente);
- correntes entre barras.

Uma das aplicações do modelo em 3D é estudar fenômenos específicos em parte de uma máquina, como alguns dos fenômenos descritos nesta seção. Apesar da necessidade de se fazer aproximações, é importante ter em mente que para um modelo ser considerado ideal, deve incorporar as seguintes características (SHINDO, 2003):

1. propriedades magnéticas não lineares;
2. meios para calcular perdas no material ferromagnético;
3. meios para representar efeito pelicular nas barras do rotor e no enrolamento do estator (apenas máquinas grandes, pois máquinas pequenas possuem fio fino);
4. meios para atualizar as propriedades dos materiais como resultado de mudanças de temperatura local;

5. meios para permitir variações axiais nas propriedades magnéticas como resultado do efeito “skew”, causado pelas barras inclinadas do rotor (se presente).

De acordo com um conjunto de aproximações escolhidas para ser aplicado ao elemento a ser analisado, diversas metodologias podem ser implementadas. Entretanto, vale ressaltar que a escolha de uma metodologia é fundamentada num balanço entre este conjunto de aproximações (SHINDO, 2003). Assim, de acordo com as aproximações citadas nesta seção, para os modelos numéricos das máquinas de indução analisadas neste estudo, optou-se construir modelos em 2D.

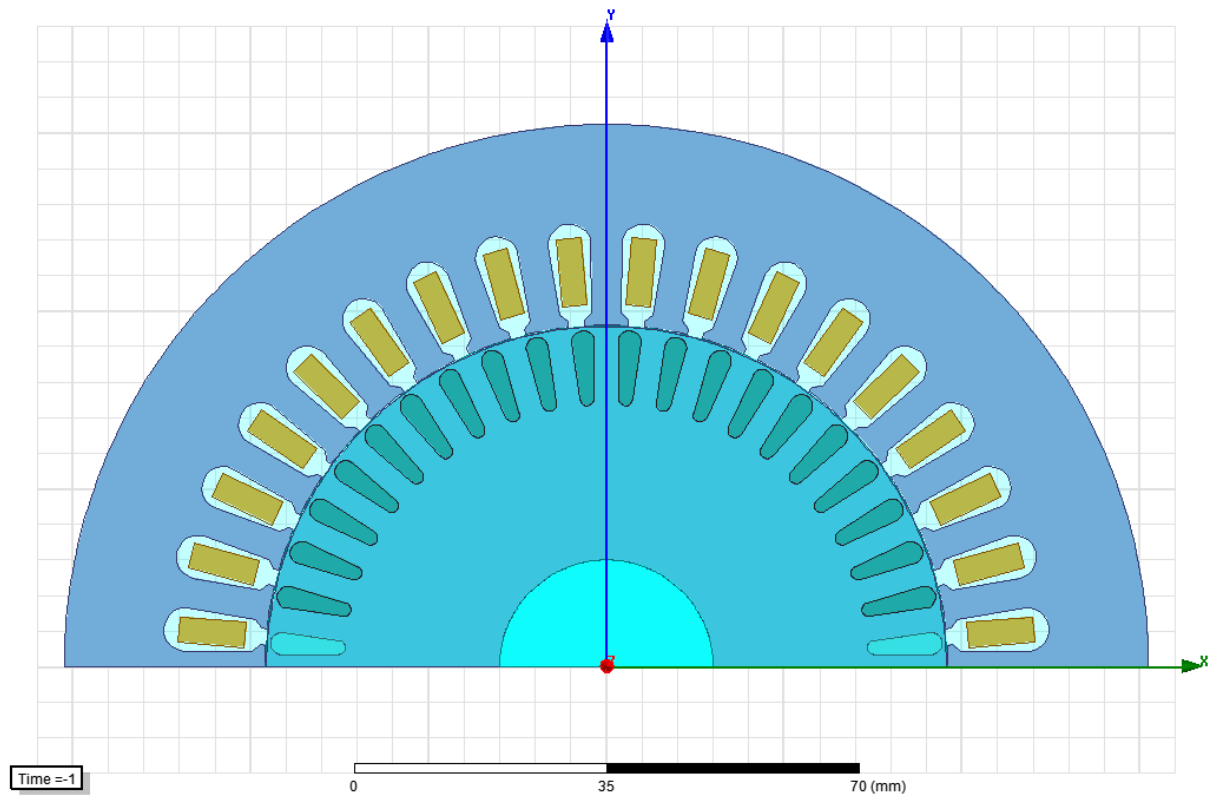
### **3.1.1 Construção do Modelo Numérico 2D**

O programa computacional utilizado na análise numérica eletromagnética é o pacote computacional Ansoft Maxwell, versão 15.0.1. O software engloba as etapas de pré- e pós-processamento. É na etapa de pré-processamento que é definido o tipo de problema e quando são gerados o modelo e a malha de elementos. A malha é gerada pela junção de todos os elementos finitos, que por sua vez são definidos pelos nós. Também são definidas as condições de contorno do problema e físicas do material bem como suas dimensões. Já na etapa de pós-processamento, são analisados os resultados gerados através de ferramentas gráficas e de cálculo.

A construção da malha é gerada, primeiramente, a partir de um modelo de elementos finitos 2D axissimétrico. Os materiais dos núcleos ferromagnéticos, tanto do estator como do rotor, função das permeabilidades magnéticas, adotando-se as curvas de magnetização, foram definidos como regiões não lineares. Assim, a curva BH define o comportamento da magnetização e deve ser considerada pelo método numérico. Para os materiais alumínio e

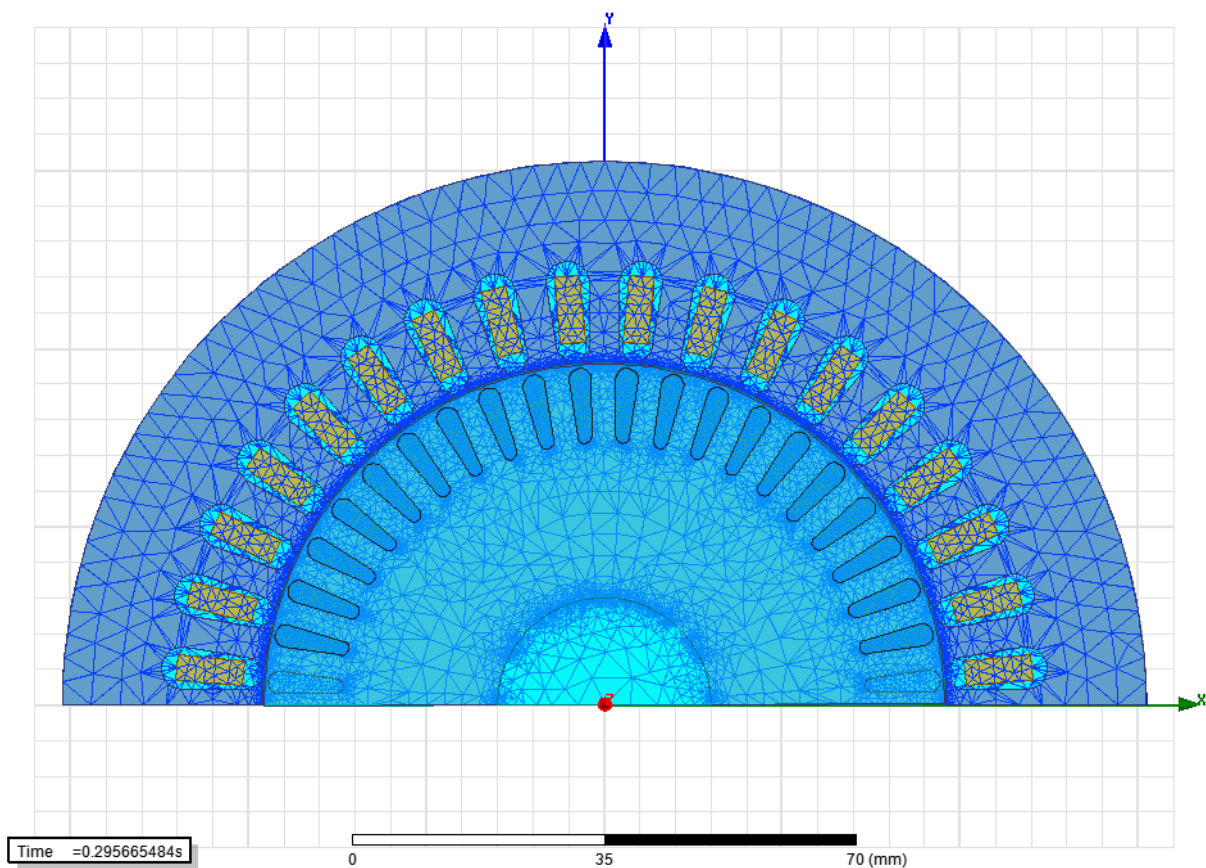


cobre, são considerados valores de permeabilidade magnética e resistividade elétrica lineares. Como a máquina apresenta enrolamento concêntrico no estator, o programa de elementos finitos aceita como simetria mínima a simetria de  $180^\circ$ , conforme a Figura 24 mostra.



**Figura 24 Desenho do modelo numérico axissimétrico da máquina de indução original com simetria de  $180^\circ$ .**

Na Figura 25, são apresentados os detalhes da vista da malha, considerando, em destaque, a região do núcleo ferromagnéticos, das bobinas do estator e das barras da gaiola de esquiço. A malha possui 24039 elementos. O número de espiras de cada bobina, a área e o volume ocupado pelas bobinas, bem como das dimensões do núcleo ferromagnético e da gaiola são mantidas idênticos às características construtivas originais, promovendo uma melhor verificação e comparação dos resultados obtidos.

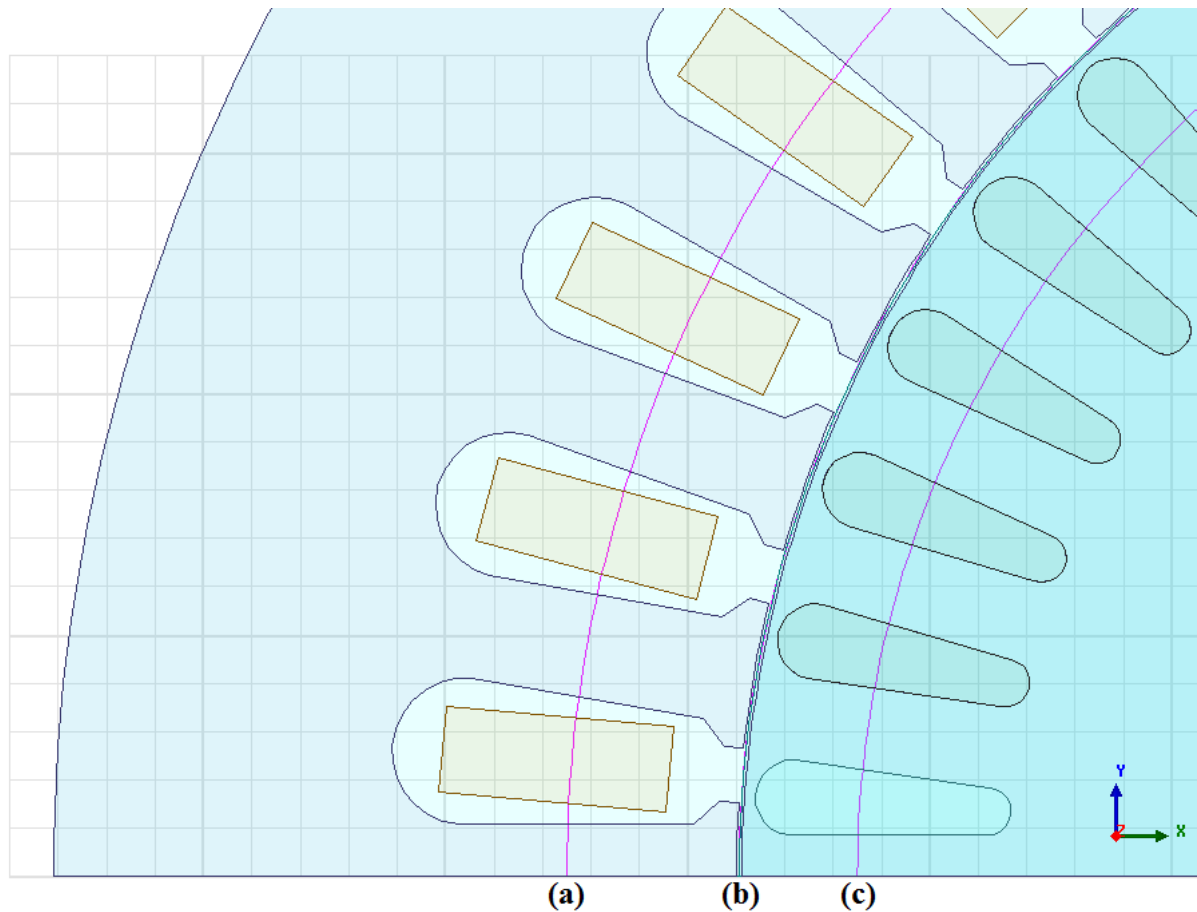


**Figura 25 Desenho com a malha em destaque do modelo numérico da máquina de indução original.**

### **3.1.2 Resultados Numéricos para Densidade de Fluxo Magnético**

De acordo com a referência (SAWETSAKULANOND, HOTHONGKHAM, KINNARES, 2008), as máquinas de indução projetadas para atuarem como motores encontram-se na região de saturação magnética quando atuam como geradores, conforme explicado na seção 2.1.2. Assim, no início do estudo sobre diretrizes de projeto para máquinas de indução operarem como geradores interligados à rede, houve a necessidade da realização de simulações por elementos finitos para conhecer e mapear o comportamento da densidade de fluxo magnético referentes a este modo de operação. Logo, apresentam-se resultados adquiridos através de simulações numérica 2D axissimétrica em regime permanente para uma máquina de indução original, operando como motor e como gerador, ou seja, impulsionada à

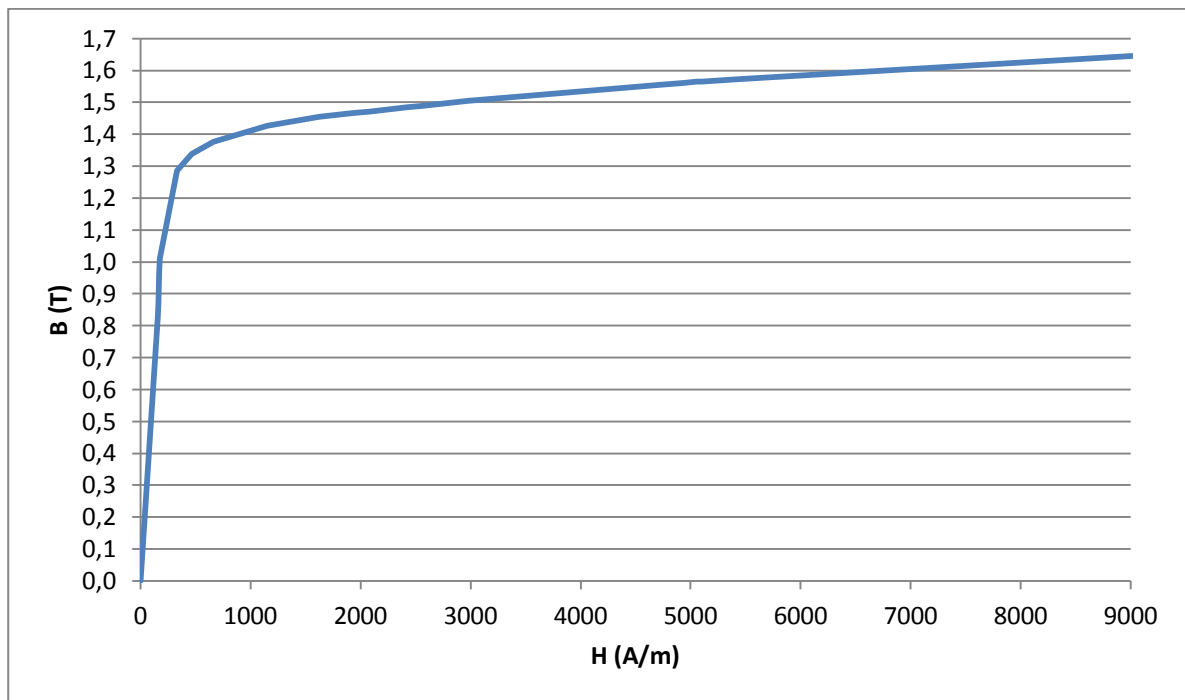
velocidade sobre síncrona. Para detectar os pontos de saturação no material ferromagnético nas simulações realizadas, traçaram-se as linhas pré-desenhadas, conforme mostra a Figura 26, e o maior valor do módulo da densidade de fluxo resultante sobre o caminho percorrido pelas linhas encontra-se na Tabela 4.



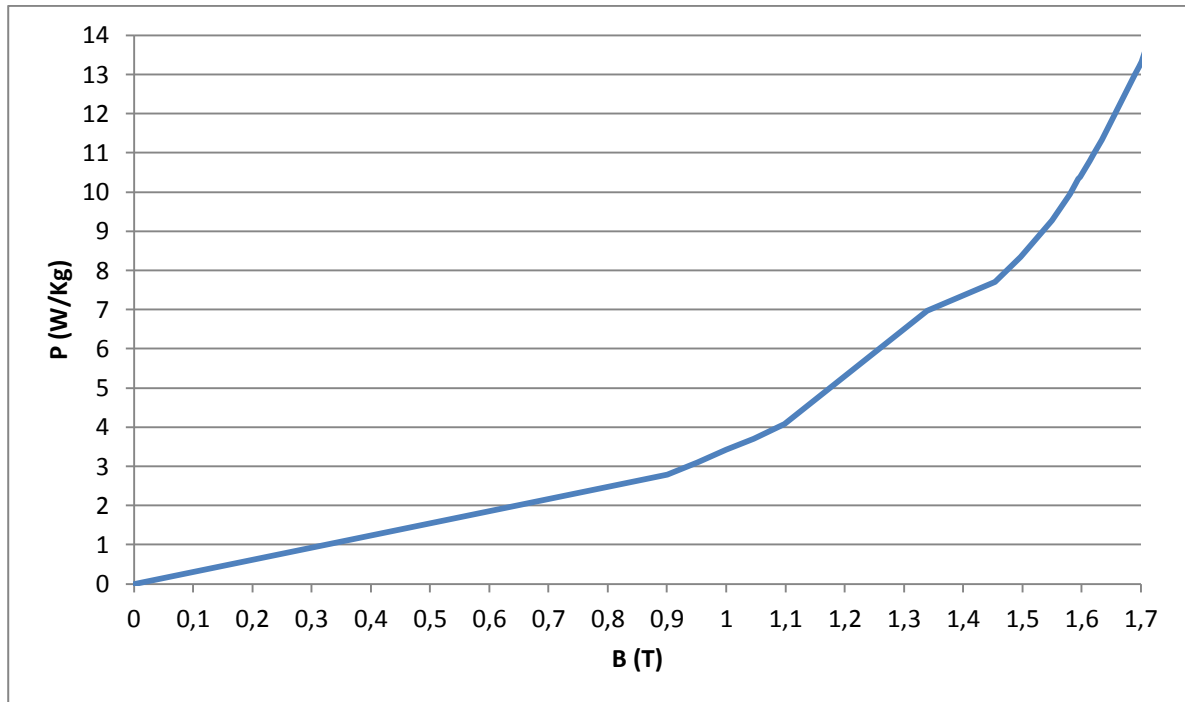
**Figura 26** Linhas traçadas ao longo da geometria da máquina de indução original no modelo por elementos finitos: (a) dentes do estator, (b) entreferro e (c) dentes do rotor.

As lâminas que compõem os pacotes dos núcleos magnéticos do estator e do rotor possuem 0,5 mm de espessura, incluindo o pacote do rotor prototipado apresentado no Capítulo 4. A curva BH e de perdas do material ferromagnético fornecida pela VOGES, referente à excitação senoidal na frequência de 60 Hz, são mostradas nas Figuras 27 e 28, respectivamente. Adicionalmente aos dados fornecidos pela VOGES, realizou-se um projeto de experimentos no LMEAE com o objetivo de caracterizar o material ferromagnético,

conforme apresentado no apêndice B. Entretanto, não foi possível a inserção a tempo destes dados resultantes nos modelos numéricos realizados, pois a máquina de caracterização não estava em operação, ainda. Logo, os dados relacionados às características elétricas e magnéticas do material ferromagnético são todas provenientes da VOGES.

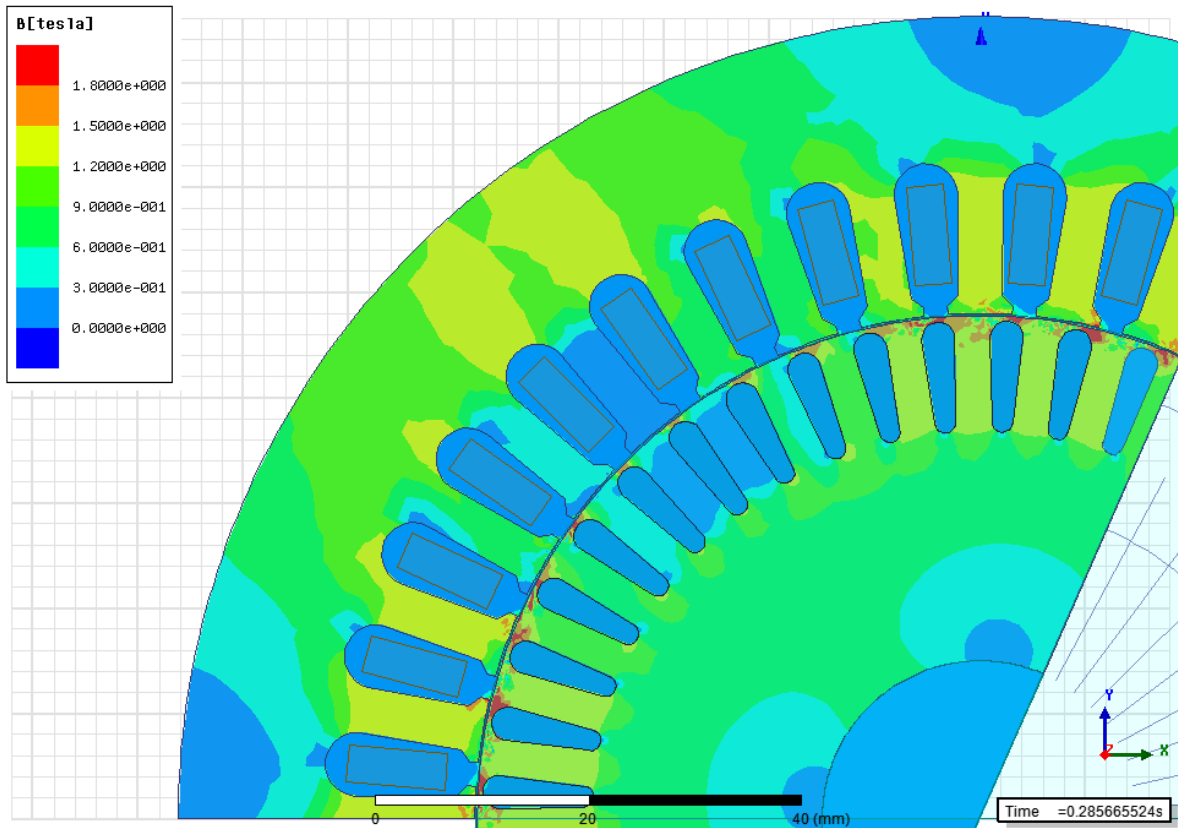


**Figura 27** Curva BH do material ferromagnético fornecido pela VOGES.

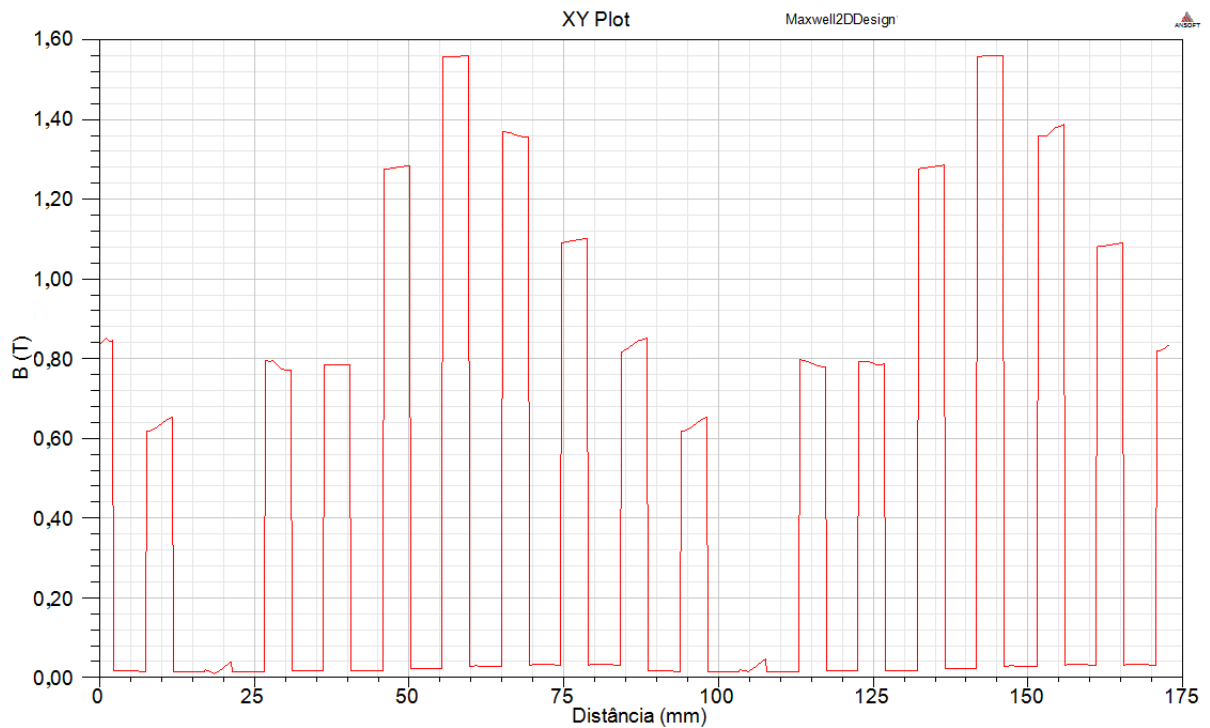


**Figura 28 Curva de Perdas do material ferromagnético fornecido pela VOGES.**

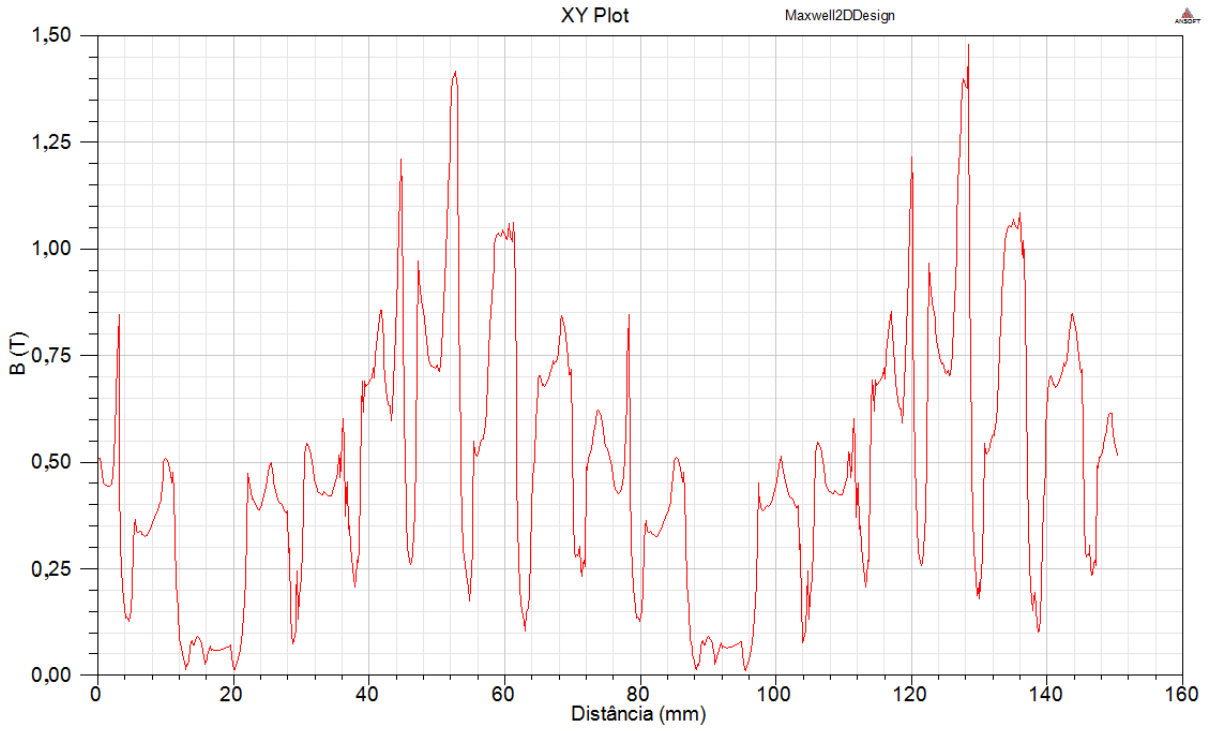
A Figura 29 apresenta o mapa e as Figuras 30, 31 e 32 mostram os gráficos da densidade de fluxo magnético ao longo das linhas geométricas, conforme apresentadas na Figura 26, para a máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor.



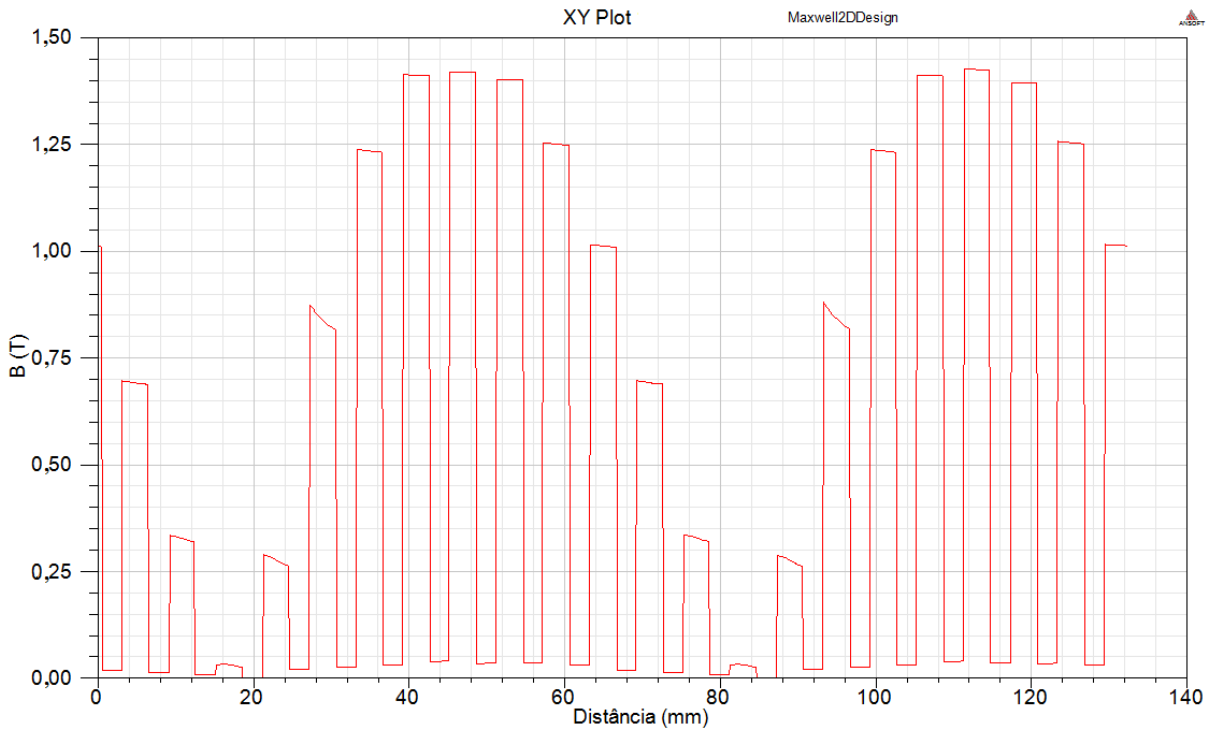
**Figura 29** Mapa da densidade de fluxo magnético na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min).



**Figura 30** Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do estator na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min).

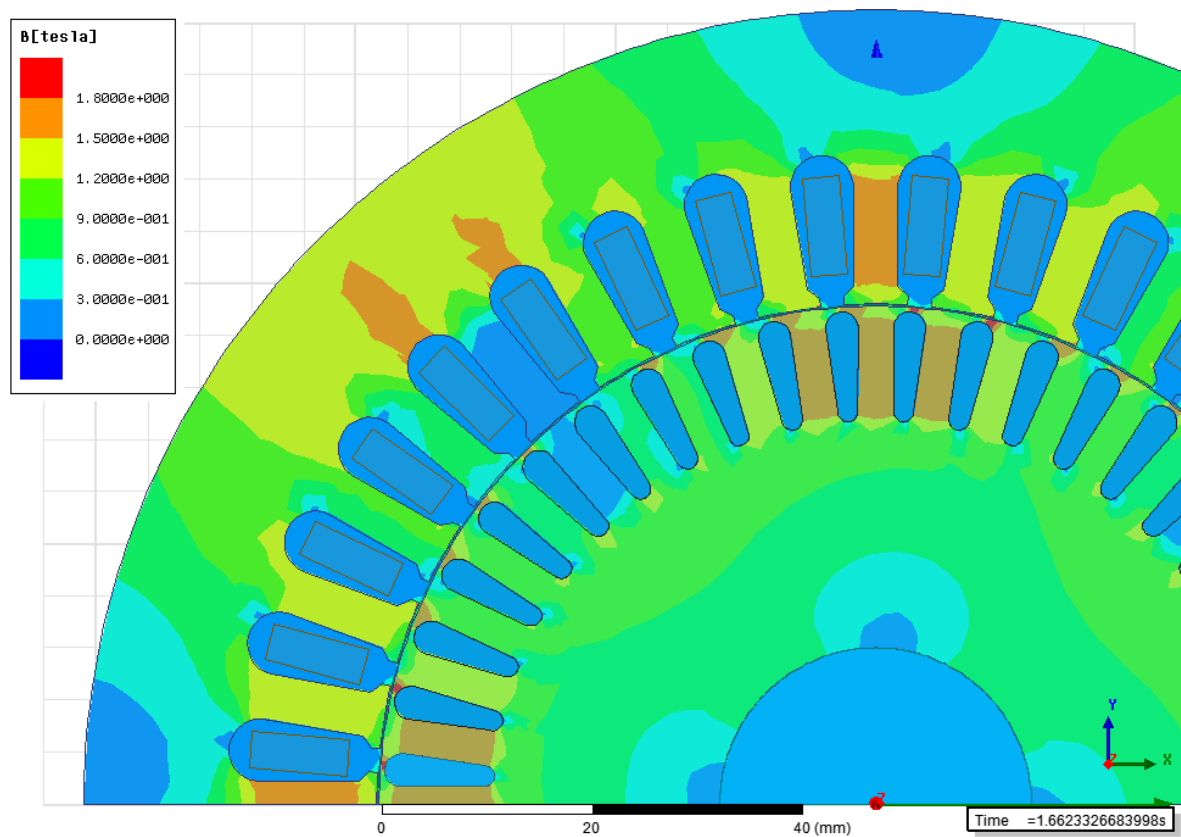


**Figura 31** Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do entreferro na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min).



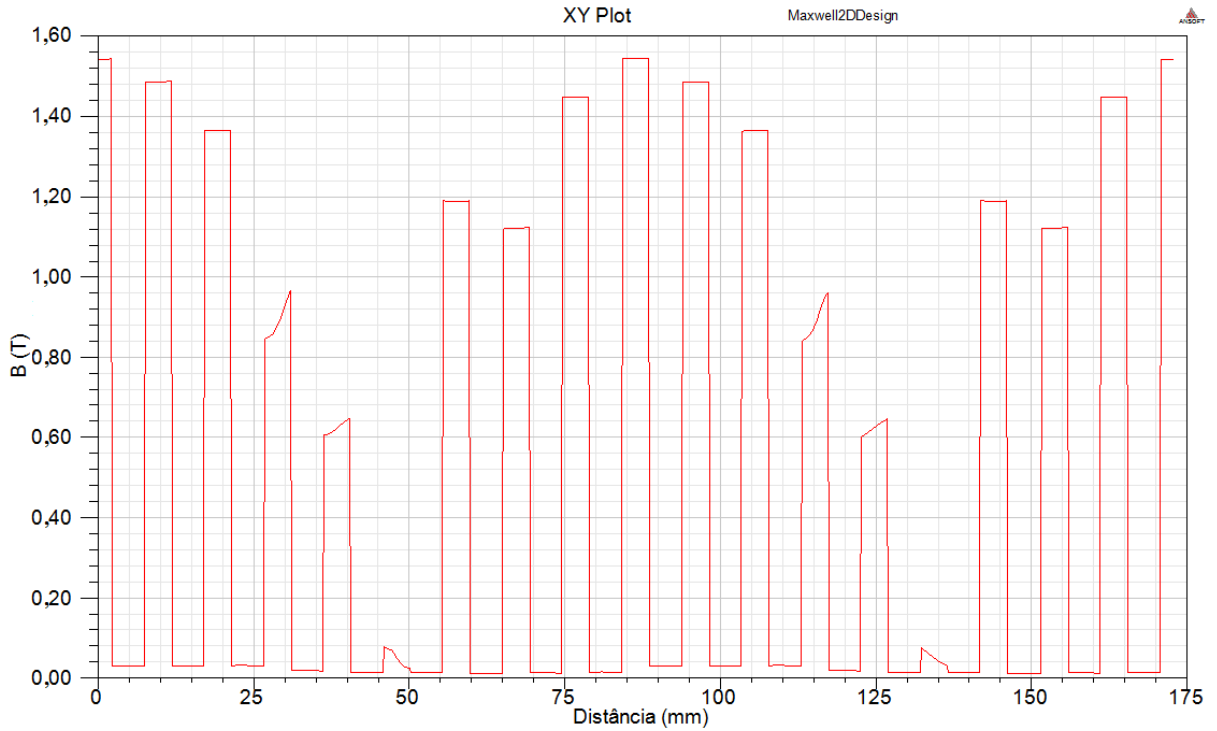
**Figura 32** Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do rotor na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo motor (1720r/min).

A Figura 33 apresenta o mapa e as Figuras 34, 35 e 36 mostram os gráficos da densidade de fluxo magnético ao longo das linhas geométricas, conforme apresentadas na Figura 26, para a máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador.

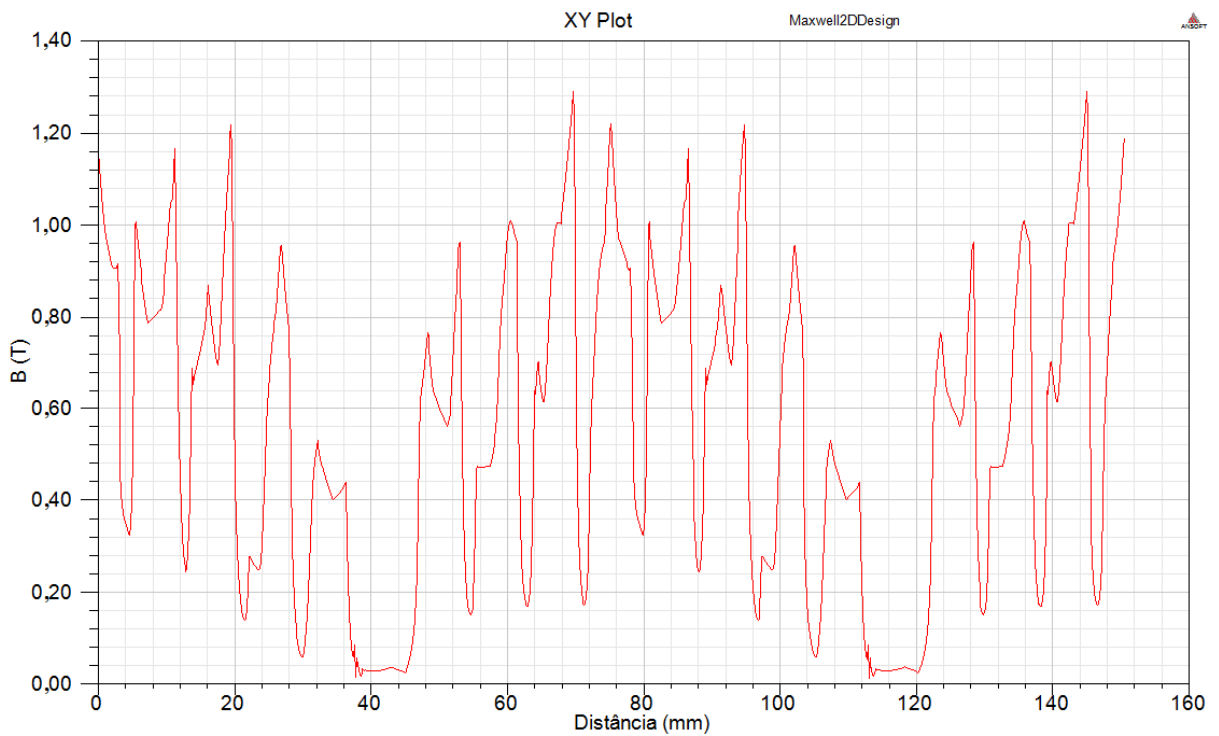


**Figura 33** Mapa da densidade de fluxo magnético na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min).

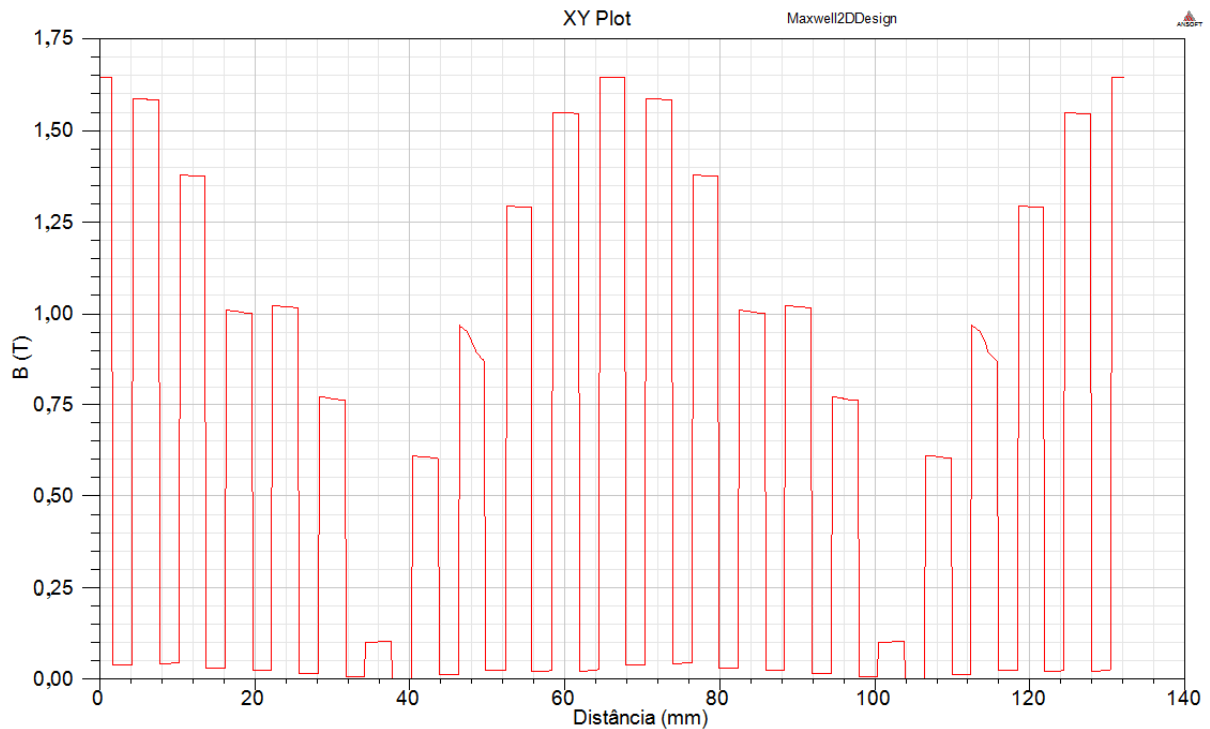




**Figura 34** Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do estator na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min).



**Figura 35** Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do entreferro na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min).



**Figura 36 Módulo da densidade de fluxo magnético ao longo da linha do rotor na máquina de indução original operando com valor de corrente nominal no modo gerador (1868r/min).**

A Tabela 4 mostra a comparação de valores de indução máxima obtidos para a velocidade nominal quando a corrente nominal (4,68 A) é alcançada, em ambos os modos de operações, motor e gerador, referente às posições geométricas das linhas descritas na Figura 26.

**Tabela 4 Valores máximos de induções resultantes das simulações por elementos finitos nas linhas traçadas para a máquina de indução operando como motor e gerador na velocidade de operação nominal.**

Linha	Valores máximos de indução B(T)	
	Motor	Gerador
Entreferro	0,820	0,950
Dentes do Estator	1,540	1,554
Dentes do Rotor	1,458	1,629

Com resultados mostrados na Tabela 4 e a curva BH do material ferromagnético apresentado na Figura 27, conclui-se que a máquina de indução original encontra-se na região de saturação do núcleo ferromagnético quando opera como gerador interligado à rede. Assim,

evidencia-se a importância de que diretrizes de projeto de geradores de indução devem ser diferenciadas das de projeto de motores de indução, conforme já descrito na seção 2.1.2.

### 3.1.3 Resultados Numéricos para Máquina de Indução Original Operando como Gerador Interligado a Rede em Regime Permanente

Os resultados numéricos na operação em regime permanente obtidos pela simulação por elementos finitos 2D são mostrados a seguir. Todos os resultados correspondem à faixa de velocidades no modo geração, ou seja, acima da velocidade síncrona. As fórmulas para potência instantânea (62), fator de potência (63), potência ativa (64), potência aparente (65), potência reativa (66), potência mecânica no eixo (67), perdas totais (68) e rendimento (69) são aplicadas no intervalo de um ciclo quando a máquina de indução encontra-se em regime permanente. Todos os resultados numéricos computacionais são obtidos na etapa de pós-processamento a partir da aquisição das formas de onda da tensão e da corrente no tempo. Somente a parcela das perdas rotacionais que é estimada de forma analítica, conforme mostrado na seção da modelagem analítica da máquina de indução original.

$$P(t) = v_{fase}(t)i_{fase}(t) \quad (62)$$

$$FP = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}{V_{rms} I_{rms}} \quad (63)$$

$$P_{ativa} = 3V_{fase}I_{fase}FP \quad (64)$$

$$S = 3V_{fase}I_{fase} \quad (65)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (66)$$

$$P_{eixo} = P_{ativa} + P_{perdas} = P_{mec} + P_{rotacionais} \quad (67)$$

$$P_{perdas} = P_{cobre} + P_{alumínio} + P_{núcleo} + P_{rotacionais} \quad (68)$$

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{ativa}}{P_{eixo}} \quad (69)$$

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados oriundos do modelo numérico para a máquina de indução original operando como gerador interligado a rede em regime permanente. Os resultados das Tabelas exibem a faixa de velocidades operacionais cujo limite superior (linha destaca em verde) é definido pela velocidade quando se alcança o valor unitário de corrente por unidade. A faixa de valores de velocidades operacionais considerada foi desde a velocidade síncrona 1800 rpm, ( $s=0$ ), até 1870 rpm, ( $s= -3,89\%$ ).

As Figuras 37, 38, 39 e 40 mostram os gráficos das grandezas de conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento todas em relação à velocidade. Esclarece-se que os valores apresentados são eficazes, levando em consideração as perdas rotacionais para o cálculo do rendimento.

**Tabela 5 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

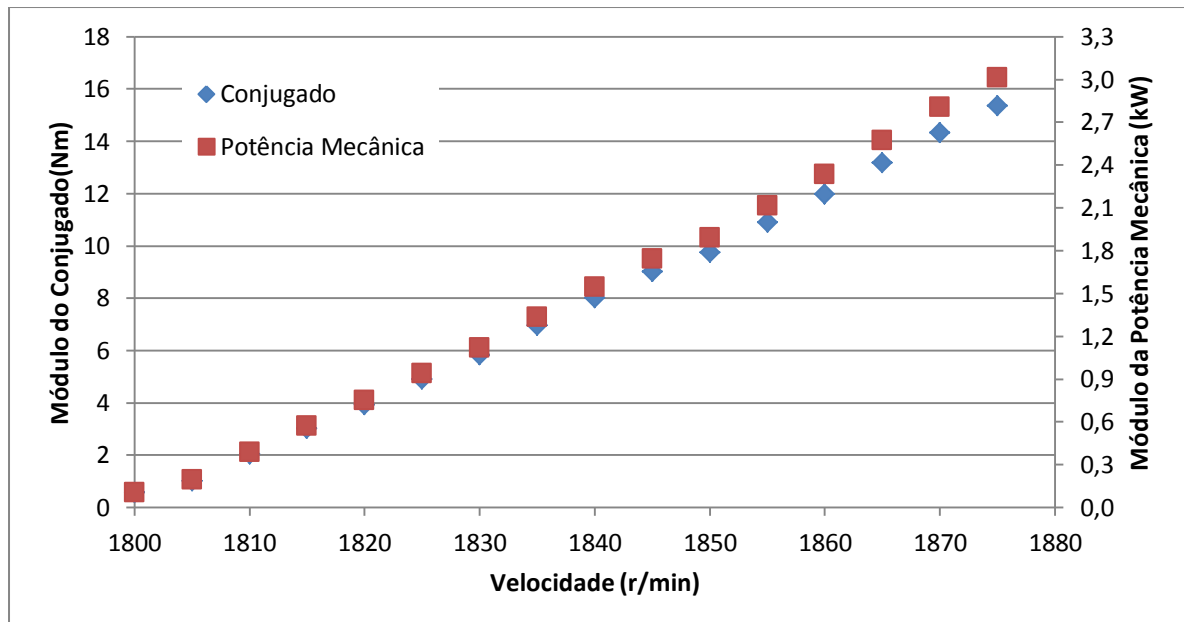
$s$	$n(\text{r/min})$	$I(\text{p.u.})$	$I_{\text{fase}}(\text{A})$	$P(\text{kW})$	$Q(\text{kVAr})$	$S(\text{kVA})$	$FP$
0,0000	1800	0,359	1,68	0,000	1,086	1,086	0,00
-0,0028	1805	0,374	1,75	0,080	1,128	1,131	0,07
-0,0056	1810	0,400	1,87	0,262	1,180	1,209	0,22
-0,0083	1815	0,432	2,02	0,436	1,231	1,306	0,33
-0,0111	1820	0,473	2,21	0,600	1,297	1,429	0,42
-0,0139	1825	0,515	2,41	0,773	1,353	1,558	0,50
-0,0167	1830	0,567	2,65	0,935	1,435	1,713	0,55
-0,0194	1835	0,618	2,89	1,132	1,486	1,868	0,61
-0,0222	1840	0,674	3,15	1,318	1,553	2,036	0,65
-0,0250	1845	0,729	3,41	1,490	1,624	2,204	0,68
-0,0278	1850	0,787	3,68	1,608	1,753	2,379	0,68
-0,0306	1855	0,849	3,97	1,804	1,825	2,566	0,70
-0,0333	1860	0,913	4,27	1,985	1,918	2,760	0,72
-0,0361	1865	0,971	4,54	2,189	1,955	2,935	0,75
<b>-0,0389</b>	<b>1870</b>	<b>1,039</b>	<b>4,86</b>	<b>2,378</b>	<b>2,053</b>	<b>3,142</b>	<b>0,76</b>
-0,0417	1875	1,103	5,16	2,545	2,156	3,336	0,76

**Tabela 6 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, perdas totais e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

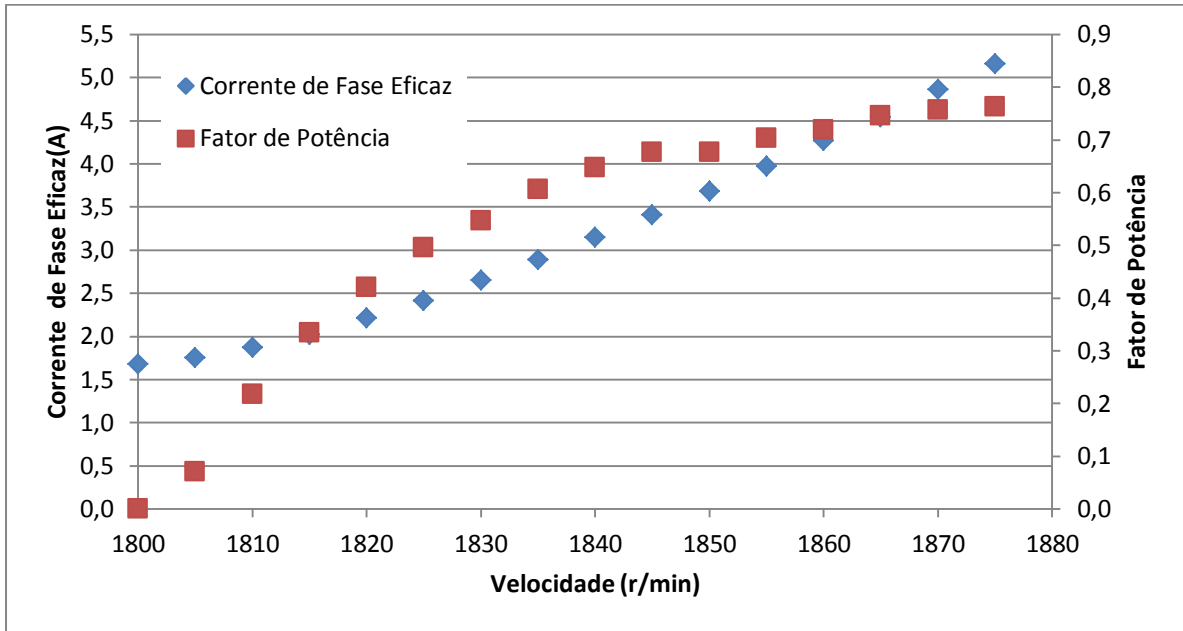
$s$	$n(\text{r/min})$	$I(\text{p.u.})$	$T(\text{Nm})$	$P_{\text{mec}}(\text{kW})$	$P_{\text{perdas}}(\text{kW})$	$\eta (\%)$
0,0000	1800	0,359	0,56	0,106	0,150	0,00
-0,0028	1805	0,374	1,02	0,192	0,156	33,94
-0,0056	1810	0,400	2,03	0,384	0,167	61,14
-0,0083	1815	0,432	3,01	0,571	0,180	70,78
-0,0111	1820	0,473	3,93	0,749	0,194	75,52
-0,0139	1825	0,515	4,90	0,937	0,210	78,64
-0,0167	1830	0,567	5,83	1,117	0,228	80,39
-0,0194	1835	0,618	6,95	1,335	0,250	81,94
-0,0222	1840	0,674	8,02	1,545	0,274	82,78
-0,0250	1845	0,729	9,02	1,742	0,299	83,27
-0,0278	1850	0,787	9,75	1,889	0,329	83,03
-0,0306	1855	0,849	10,89	2,116	0,360	83,36
-0,0333	1860	0,913	11,98	2,333	0,397	83,35
-0,0361	1865	0,971	13,18	2,573	0,433	83,49
<b>-0,0389</b>	<b>1870</b>	<b>1,039</b>	<b>14,32</b>	<b>2,804</b>	<b>0,475</b>	<b>83,34</b>
-0,0417	1875	1,103	15,34	3,012	0,517	83,12

**Tabela 7 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Perdas Joule, perdas no núcleo e perdas rotacionais. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

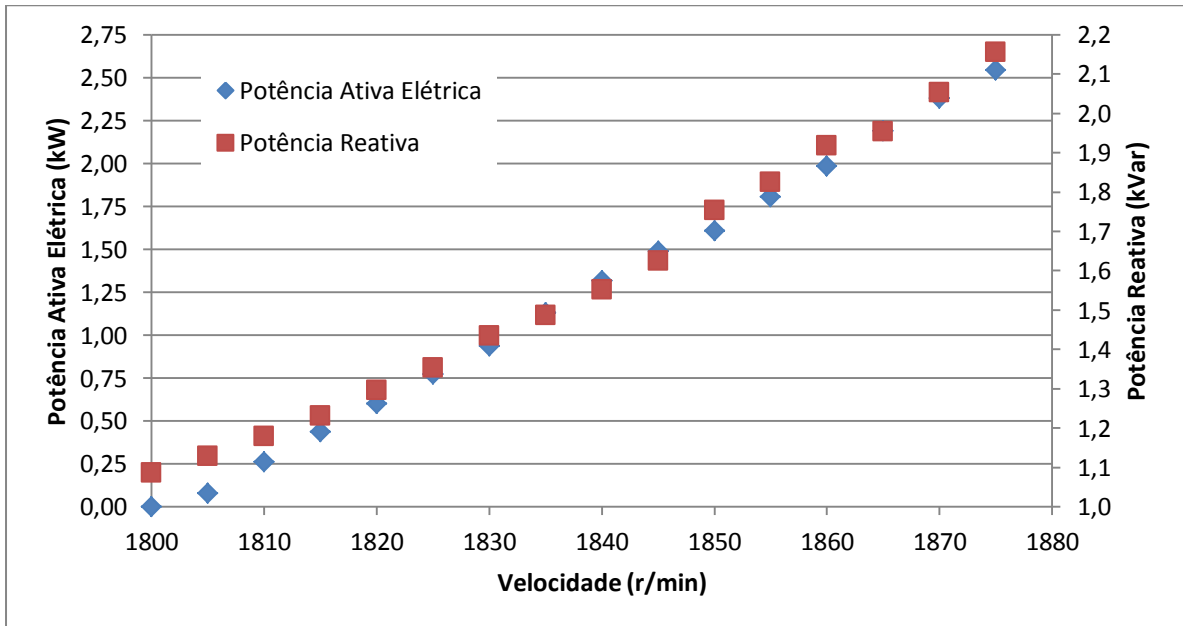
s	n(r/min)	l(p.u.)	$P_{\text{Joule}}$		$P_{\text{núcleo}}(\text{kW})$	$P_{\text{rotacionais}}(\text{kW})$
			$P_{\text{cobre}}(\text{kW})$	$P_{\text{alum.}}(\text{kW})$		
0,0000	1800	0,359	0,022	0,001	0,083	0,044
-0,0028	1805	0,374	0,024	0,002	0,086	0,044
-0,0056	1810	0,400	0,028	0,005	0,089	0,045
-0,0083	1815	0,432	0,032	0,009	0,094	0,045
-0,0111	1820	0,473	0,039	0,014	0,096	0,045
-0,0139	1825	0,515	0,046	0,020	0,098	0,046
-0,0167	1830	0,567	0,055	0,027	0,100	0,046
-0,0194	1835	0,618	0,066	0,035	0,102	0,047
-0,0222	1840	0,674	0,078	0,044	0,105	0,047
-0,0250	1845	0,729	0,092	0,054	0,106	0,047
-0,0278	1850	0,787	0,107	0,066	0,108	0,048
-0,0306	1855	0,849	0,124	0,078	0,110	0,048
-0,0333	1860	0,913	0,144	0,094	0,110	0,049
-0,0361	1865	0,971	0,162	0,107	0,115	0,049
-0,0389	1870	1,039	0,186	0,125	0,115	0,049
-0,0417	1875	1,103	0,210	0,141	0,116	0,050



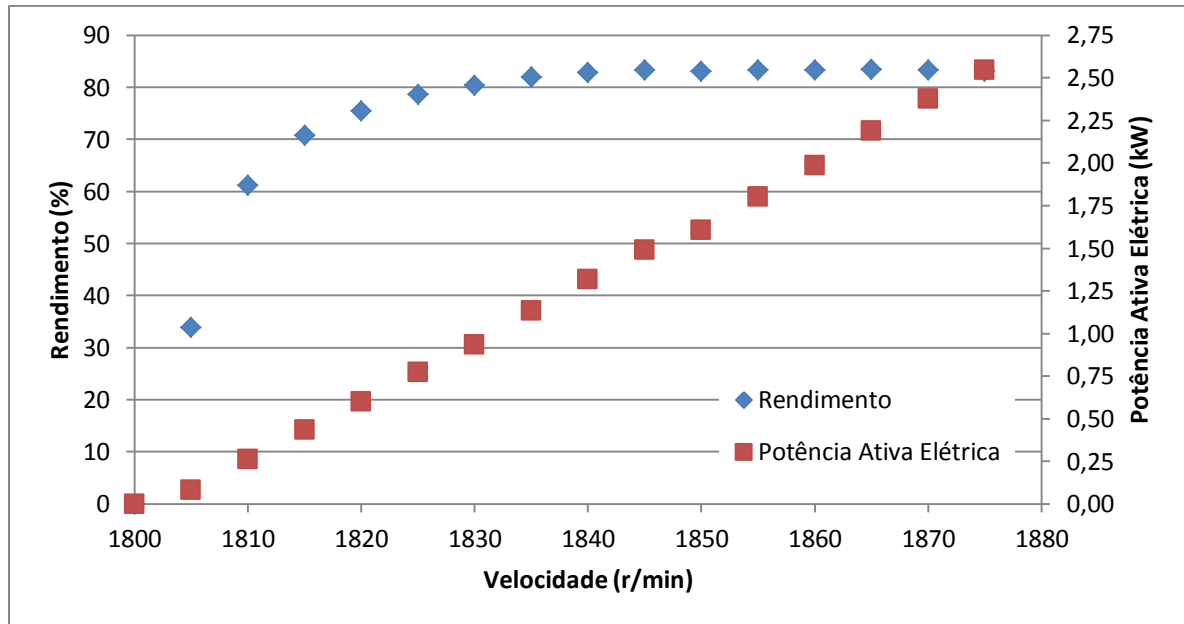
**Figura 37 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Conjugado e potência mecânica versus velocidade.**



**Figura 38** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade.



**Figura 39** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade.



**Figura 40 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede – Rendimento e potência ativa versus velocidade.**

As Figuras 37, 38, 39 e 40 mostram os gráficos dos resultados numéricos de conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento para a máquina de indução original operando como gerador. No ponto de operação referente ao valor de velocidade de 1870 r/min, próximo à condição de corrente nominal, foram obtidos os valores de 0,76 e 83,34% para fator de potência e rendimento, respectivamente. Os resultados são coniventes com os da referência (CHAPALLAZ, 1992) em termos de operação da máquina de indução funcionando como gerador. Logo, este modelo numérico é validado e serve como base para o estudo de gerador de indução operando em regime permanente conectado à rede.

### 3.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO

A fim de conhecer os parâmetros concentrados (circuito equivalente) de uma máquina de indução, ensaios podem ser realizados para que a partir de seus resultados seja possível



calcular as reatâncias e resistências do modelo apresentado da Figura 10. Geralmente, os ensaios realizados são os seguintes (FARRET, SIMÕES, 2006):

- Medição da resistência do estator;
- Ensaio a vazio - medição da tensão aplicada ao estator, da corrente de linha e da potência ativa;
- Ensaio com o rotor bloqueado - medição de tensão reduzida aplicada ao estator, da corrente de linha e da potência ativa;
- Ensaio à velocidade síncrona - com o auxílio de uma máquina primária, impõe-se a velocidade síncrona na máquina de indução e se realizam medições da tensão, da corrente e das potências ativa e reativa.

No entanto, apenas os três primeiros desses ensaios seriam realmente necessários para se obter um circuito equivalente representativo da máquina. Com a necessidade de maior confiabilidade dos resultados, além da utilização de instrumentos adequados, é necessário realizar também o ensaio à velocidade síncrona. A metodologia adotada para realização dos cálculos deste capítulo encontra-se na referência (SANTOS, 2003). As medições das grandezas elétricas necessárias para calcular os parâmetros do modelo e os ensaios de gerador interligado à rede foram realizadas com os instrumentos listados na Tabela 8.

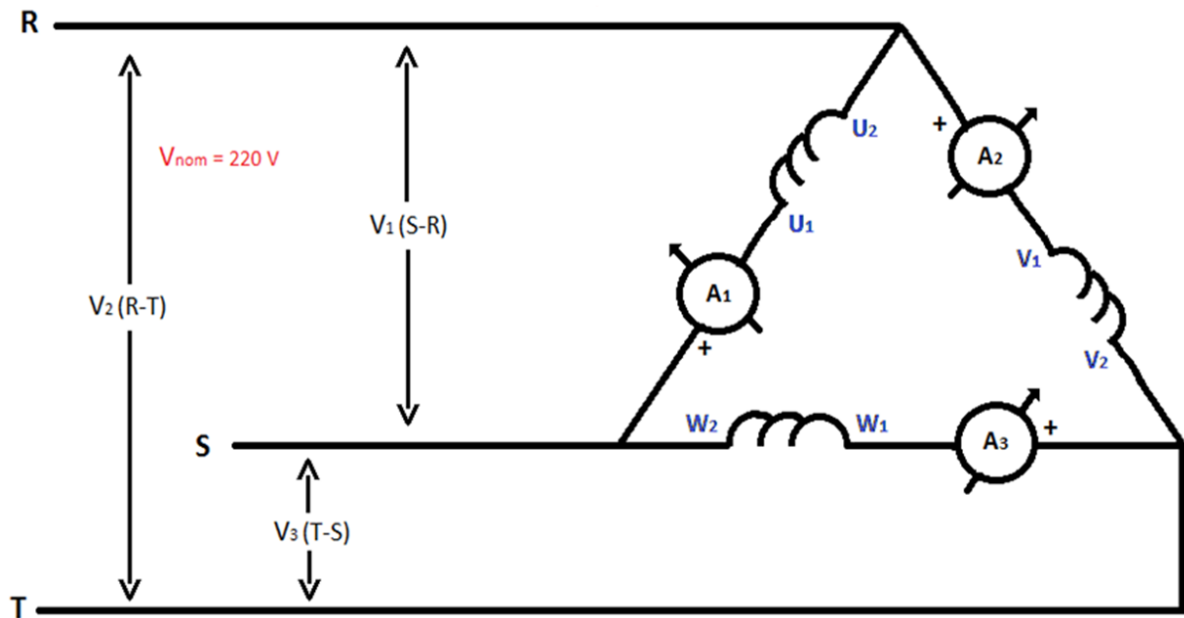
**Tabela 8 Relação dos instrumentos utilizados nos ensaios.**

Instrumento	Dados do Instrumento	Grandeza	Precisão
Medidor digital de tensão, corrente, potência ativa e reativa	Fabricante: Yokogawa Tipo: Digital Power Meter Modelo: WT1030M Resolução: 16 bits	Tensão Corrente Potência ativa Potência reativa	Tensão: $\pm 0,1\%$ do valor medido
			Corrente: $\pm 0,1\%$ do valor medido
			Defasagem: $\pm 5^\circ$ do valor medido
Multímetro digital	Fabricante: Hewlett Packard Tipo: Multímetro Digital Modelo: 3478a Resolução: $300 \mu\Omega$ (escala 30 $\Omega$ ), $100 \mu V$ (escala 30 V)	Tensão Resistência	Tensão: $\pm 0,46\%$ do valor medido
			Resistência: $\pm 0,034\%$ do valor medido
Tacômetro	Fabricante: MINIPA Tipo: Digital eletrônico a cristal de quartzo Modelo: TD-301 Resolução: 1 r/min	Velocidade	(Desconhecido)
Variador de Tensão (VARIAC)	Fabricante: Equacional Tipo: Variac trifásico Entrada: 220 V Saída: 0 a 240 V Corrente máx. de saída: 10 A	Tensão	(Desconhecido)
Transdutor de Torque (Torquímetro)	Fabricante: HBM Entrada: 0,1 a 50 N.m Saída: 0 a 5 V Conjugado Nominal: 50 N.m	Conjugado	0,5%

### 3.2.1 Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio de um motor de indução fornece informações em relação à corrente de excitação e às perdas a vazio. Geralmente, esse ensaio é executado em frequência nominal e com tensões polifásicas equilibradas, aplicadas aos terminais do estator (FITZGERALD, 2003). Este ensaio deve ser feito primeiro a fim de lubrificar os rolamentos do motor e colocá-lo em uma situação próxima à de operação nominal.

O ensaio a vazio de uma máquina de indução mede as perdas rotacionais e fornece informações sobre a corrente de magnetização. O esquemático das conexões dos amperímetros e dos voltmímetro do Wattímetro (Yokogawa-WT1030) para a realização deste ensaio é apresentado na Figura 41. Como características deste procedimento, a potência mecânica disponibilizada no eixo é convertida em perdas por atrito e ventilação. Neste caso, a impedância total do circuito é praticamente igual à soma das impedâncias do ramo de magnetização e do estator.



**Figura 41** Conexão realizada nos ensaios a vazio.

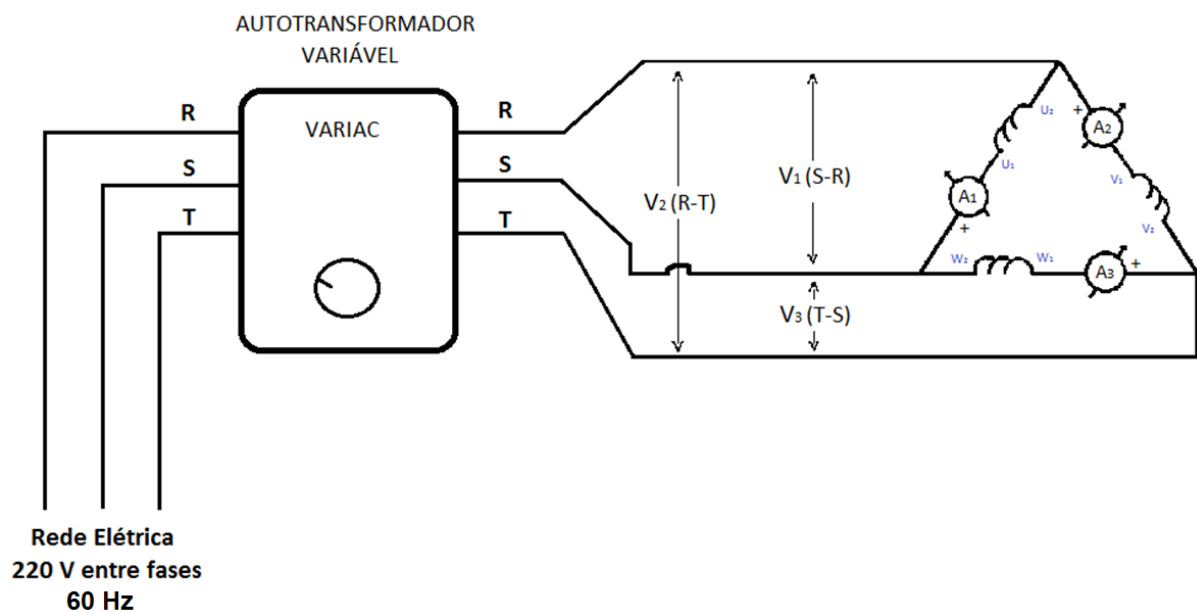
A Tabela 9 contém os valores das medidas realizadas no ensaio a vazio para a máquina de indução original. Nota-se que a obtenção dos resultados é proveniente dos amperímetros conectados em série com os enrolamentos do estator e uma média aritmética das medidas de cada fase é tomada como referência para os cálculos, devido ao desequilíbrio entre as potências medidas nos ensaios.

**Tabela 9 Resultados do ensaio a vazio para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa(W)	Potência Reativa (VAr)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	220,69	2,14	41,50	470,67
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	220,60	2,13	36,00	468,47
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	220,89	2,16	53,93	473,90
Média	220,73	2,14	43,81	471,01

### 3.2.2 Ensaio a Rotor Bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado ou travado de um motor de indução fornece informações sobre as impedâncias de dispersão especialmente. O rotor é bloqueado, de modo que não possa girar, sendo o escorregamento, portanto, igual à unidade, e tensões polifásicas são aplicadas aos terminais do estator (FITZGERALD, 2003). Para executar esse teste, o rotor é travado e uma tensão alternada de amplitude variável é aplicada ao estator até que a corrente aplicada medida seja igual a nominal. Neste ensaio, utilizou-se um transformador de saída em tensão variável (Variac), com os valores de amplitude e frequência da rede na entrada, para conseguir o valor de corrente mais próximo ao valor nominal, conforme mostra o esquemático da Figura 42. A Tabela 10 mostra os resultados deste ensaio para a máquina de indução.

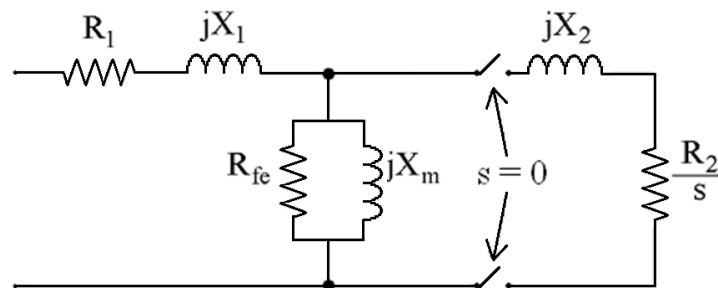
**Figura 42 Montagem do ensaio a rotor bloqueado.**

**Tabela 10 Resultados do ensaio a rotor bloqueado para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa(W)	Potência Reativa (VAr)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	40,94	4,84	107,87	132,70
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	40,92	4,49	91,70	159,37
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	41,06	4,75	106,27	163,63
Média	40,97	4,69	101,94	151,90

### 3.2.3 Ensaio à Velocidade Síncrona

Através do auxílio de uma máquina primária, coloca-se a máquina de ensaio na velocidade síncrona ( $s = 0$ ) com a intenção de “desacoplar” o circuito equivalente ao rotor, conforme ilustra a Figura 43. Desta forma, não há potência transferida pelo entreferro da máquina, logo, a potência ativa medida será a soma das perdas ôhmicas estatóricas mais as perdas no núcleo do estator (BOLDEA, 2006). Os resultados obtidos pelo ensaio são apresentados na Tabela 11 para a máquina de indução original.

**Figura 43 Ensaio a velocidade síncrona (BOLDEA, NASAR, 2002).****Tabela 11 Resultados do ensaio à velocidade síncrona para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa(W)	Potência Reativa (VAr)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	220,4	2,16	32,40	474,20
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	219,16	2,05	27,20	4480
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	219,68	2,12	26,80	465,60
Média	219,75	2,11	28,80	462,60

### 3.2.4 Medida da Resistência do Estator

A fim de realizar a medida de  $R_1$  mais próximo da temperatura de operação, após ter atingido a corrente nominal no ensaio a rotor bloqueado, mediu-se a resistência do estator. A NBR7094 (2003) admite a utilização do ohmímetro (multímetro) como uma das maneiras de medir a resistência do estator de máquinas elétricas rotativas. Logo, optou-se pelo multímetro HP3478A com a opção de medida a quatro fios para medição da resistência do estator, a fim de eliminar o efeito da resistência dos cabos das ponteiros. Assim, com a intenção de obter uma boa estimativa em relação à precisão do instrumento, realizaram-se três medidas para cada fase (enrolamento) e calculou-se a média.

Como se utilizou a mesma carcaça e estator, os resultados obtidos para a medição da resistência do estator são únicos para a máquina de indução original e para o gerador de indução projetado neste estudo, os resultados encontram-se na Tabela 12.

**Tabela 12 Medidas da resistência do estator.**

Enrolamento	Medidas da resistência do estator $R_1$ para 26°C ( $\Omega$ )			
	1ª medida	2ª medida	3ª medida	Média
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	2,429	2,430	2,430	2,430
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	2,438	2,437	2,436	2,437
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	2,432	2,434	2,434	2,433
Média	2,433	2,434	2,434	2,433

### 3.2.5 Cálculo dos Parâmetros Concentrados

Devido ao desequilíbrio entre as potências medidas nos ensaios de rotina, constatado pelos resultados das Tabelas 9, 10 e 11, optou-se por calcular separadamente os parâmetros para cada fase. Assim, o circuito equivalente apresentado no final deste capítulo representa a média dos parâmetros calculados das três fases. Posteriormente, este circuito equivalente é usado no modelamento das características e comportamento da máquina de indução original.

Primeiramente, calculam-se as perdas rotacionais, as perdas no ferro e as perdas suplementares através de (70) (FITZGERALD, 2003). Os resultados são apresentados na Tabela 13 para a máquina de indução original.

$$P_{rot+fe+sup} = P_{vz} - I_{1,vz}^2 R_1 \quad (70)$$

Onde,

$P_{rot+fe+sup}$  – perdas rotacionais, perdas no ferro e perdas suplementares, [W];

$P_{vz}$  – potência ativa monofásica medida no ensaio a vazio, [W];

$I_{1,vz}$  – corrente de linha medida no ensaio a vazio, [A];

$R_1$  – resistência estatórica média das três fases, [ $\Omega$ ].

**Tabela 13 Perdas rotacionais, perdas no ferro e perdas suplementares para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Perdas Rotacionais + Perdas no Ferro ( $R_{fe}$ ) + Perdas Suplementares (W)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	30,35
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	24,96
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	42,59
Soma	97,90

Logo, a reatância a vazio, a resistência e a reatância a rotor bloqueado são obtidas pelas respectivas fórmulas e os resultados obtidos mostrados na Tabela 14 para a máquina de indução original (FITZGERALD, 2003).

$$X_{vz} = \frac{Q_{vz}}{I_{l,vz}^2} \quad (71)$$

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{I_{l,bl}^2} \quad (72)$$

$$X_{bl} = \frac{Q_{bl}}{I_{l,bl}^2} \quad (73)$$

Onde,

$Q_{vz}$  – potência reativa monofásica medida no ensaio a vazio, [VAr];

$X_{vz}$  – reatância monofásica calculada e relacionada ao ensaio a vazio, [ $\Omega$ ];

$I_{1,vz}$  – corrente de linha monofásica medida no ensaio a vazio, [A];

$P_{bl}$  – potência ativa monofásica medida no ensaio a rotor bloqueado, [W].

$Q_{bl}$  – potência reativa monofásica medida no ensaio a rotor bloqueado, [VAr];

$R_{bl}$  – resistência monofásica calculada e relacionada ao ensaio a rotor bloqueado, [ $\Omega$ ];

$X_{bl}$  – reatância monofásica calculada e relacionada ao ensaio a rotor bloqueado, [ $\Omega$ ];

$I_{1,bl}$  – corrente de linha monofásica medida no ensaio a rotor bloqueado, [A].

**Tabela 14 Parâmetros calculados para reatância a vazio, reatância a rotor bloqueado e resistência a rotor bloqueado para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Reatância para ensaio a vazio $X_{vz}$ ( $\Omega$ )	Reatância para ensaio a rotor bloqueado $X_{bl}$ ( $\Omega$ )	Resistência para ensaio a rotor bloqueado $R_{bl}$ ( $\Omega$ )
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	102,68	5,67	4,61
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	103,27	7,89	4,54
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	101,64	7,25	4,71
Média	102,53	6,94	4,62



De acordo com a norma IEEE 112 (1984), o motor com conjugado e corrente de partida normais apresenta reatâncias de dispersão  $X_1$  e  $X_2$  iguais, sendo classificado como classe A. Então, os valores das reatâncias são calculadas da seguinte forma (FITZGERALD, 2003):

$$X_2 = (X_{bl} - X_1) \left( \frac{X_{vz} - X_1}{X_{vz} - X_{bl}} \right) \quad (74)$$

A reatância de magnetização  $X_m$  é obtida pela Equação (75).

$$X_m = X_{vz} - (X_1 + X_2) \quad (75)$$

A referência (FITZGERALD, 2003) deduz que o valor da resistência do rotor  $R_2$  pode ser determinado pela Equação a seguir, sendo os resultados mostrados na Tabela 15 para a máquina de indução.

$$R_2 = (R_{bl} - R_1) \left( \frac{X_2 + X_m}{X_{vz}} \right)^2 \quad (76)$$

Onde,

$R_2$  – resistência monofásica calculada e relacionada ao circuito do rotor, [ $\Omega$ ];

$X_2$  – reatância monofásica calculada e relacionada ao circuito do rotor, [ $\Omega$ ];

$X_m$  – reatância de magnetização monofásica calculada, [ $\Omega$ ];

$R_1$  – resistência estatórica média das três fases, [ $\Omega$ ].

**Tabela 15 Parâmetros de reatâncias e resistências calculados para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Reatâncias do estator e do rotor $X_1 = X_2$ ( $\Omega$ )	Reatância de magnetização $X_m$ ( $\Omega$ )	Resistência do rotor $R_2$ ( $\Omega$ )
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	2,88	99,80	2,30
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	4,02	99,25	2,28
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	3,69	97,95	2,45
Média	3,53	99,00	2,34

O ensaio à velocidade síncrona fornece os valores das perdas no núcleo do estator, sendo calculadas pela seguinte fórmula e os resultados apresentado na Tabela 16 para a máquina de indução original (BOLDEA, 2002).

$$P_{n\u00facleo(estator)} = P_{vs} - I_{vs}^2 R_1 \quad (77)$$

Onde,

$P_{n\u00facleo(estator)}$  – perdas no núcleo do estator por fase, [W];

$P_{vs}$  – potência ativa monofásica medida no ensaio à velocidade síncrona, [W];

$I_{vs}$  – corrente de linha monofásica medida no ensaio à velocidade síncrona, [A];

$R_1$  – resistência estat\u00f3rica m\u00e9dia das tr\u00eas fases, [ $\Omega$ ].

**Tabela 16 Perdas no n\u00facleo do estator para a m\u00e1quina de indu\u00e7\u00e3o original.**

Enrolamento	Perdas no n\u00facleo do estator $P_{n\u00facleo(estator)}$ (W)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	21,083
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	16,994
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	15,832
Soma	53,909

Como o interesse do estudo está em operações com escorregamentos baixos, adotou-se o valor das perdas totais no ferro da máquina como sendo o valor das perdas no ferro do núcleo do estator, pois as perdas no rotor são proporcionais ao escorregamento, portanto, podendo ser desconsideradas numa análise inicial, conforme mostra o apêndice B.

O ramo de excitação é composto pelo valor referente à resistência  $R_{fe}$ , na qual se considera que a potência dissipada é igual às perdas magnéticas para fins de modelagem analítica, em paralelo com a reatância de magnetização  $X_m$  (BOLDEA; NASAR, 2002), logo:

$$R_{fe} // jX_m = \left( \frac{R_{fe} X_m^2}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) + j \left( \frac{R_{fe}^2 X_m}{R_{fe} + X_m^2} \right) \quad (78)$$

$$P_{núcleo} = I_{vs}^2 \left( \frac{R_{fe} X_m^2}{R_{fe}^2 + X_m^2} \right) \quad (79)$$

Isolando  $R_{fe}$ , obtém-se o seu valor através de (32) (BOLDEA; NASAR, 2002). Os resultados são apresentados na Tabela 17 para a máquina de indução original.

$$R_{fe} = \frac{\frac{X_m^2}{P_{núcleo}} + \sqrt{\left( \frac{X_m^2 I_{vs}^2}{P_{núcleo}} \right)^2 - 4X_m^2}}{2} \quad (80)$$

Onde,

$I_{vs}$  – corrente de linha monofásica medida no ensaio à velocidade síncrona, [A];

$P_{núcleo}$  – perdas magnéticas no núcleo por fase, [W].

**Tabela 17 Resistência representativa das perdas magnéticas do núcleo do estator para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Resistência representativa das perdas magnéticas $R_{fe}$ ( $\Omega$ )
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	1330,343
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	1501,353
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	1665,238
Média	1498,978

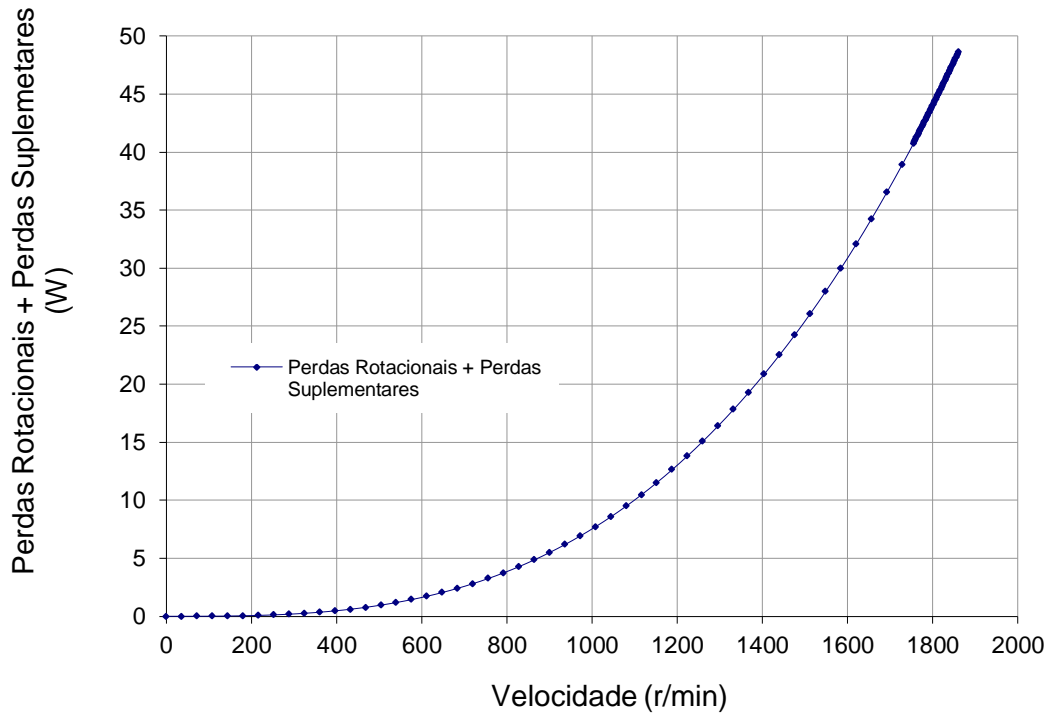
Com o auxílio das Tabelas 13 e 16, consegue-se calcular a parcela da soma das perdas rotacionais mais as perdas suplementares para velocidades muito próximas da síncrona. Assim, a Tabela 18 apresenta a contribuição e a soma das fases. Sabendo que as perdas rotacionais são proporcionais ao cubo da velocidade, estima-se a curva de perdas rotacionais da máquina de indução assume o gráfico da Figura 44, correspondente à Equação (81).

**Tabela 18 Perdas rotacionais e perdas suplementares para a máquina de indução original.**

Enrolamento	Perdas Rotacionais + Perdas Suplementares ( $\approx 1800$ rpm) (W)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	9,26
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	7,97
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	26,76
Soma	43,99

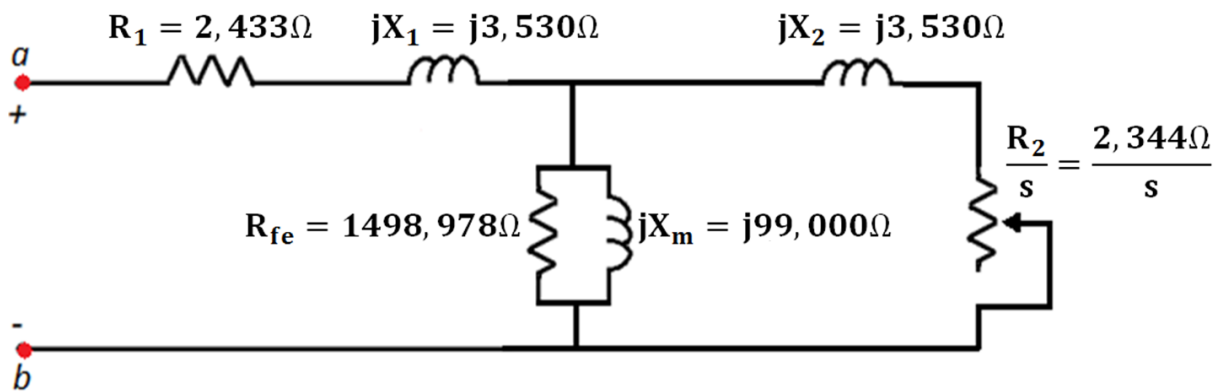
$$P_{rot+sup} = 43,99(1-s)^3 \quad (81)$$

$P_{rot+sup}$  são as perdas rotacionais e perdas suplementares estimadas [W].



**Figura 44** Curva das perdas rotacionais e suplementares estimada para a máquina de indução original.

Com o conhecimento dos parâmetros da máquina de indução de interesse, define-se o circuito equivalente, Figura 45.



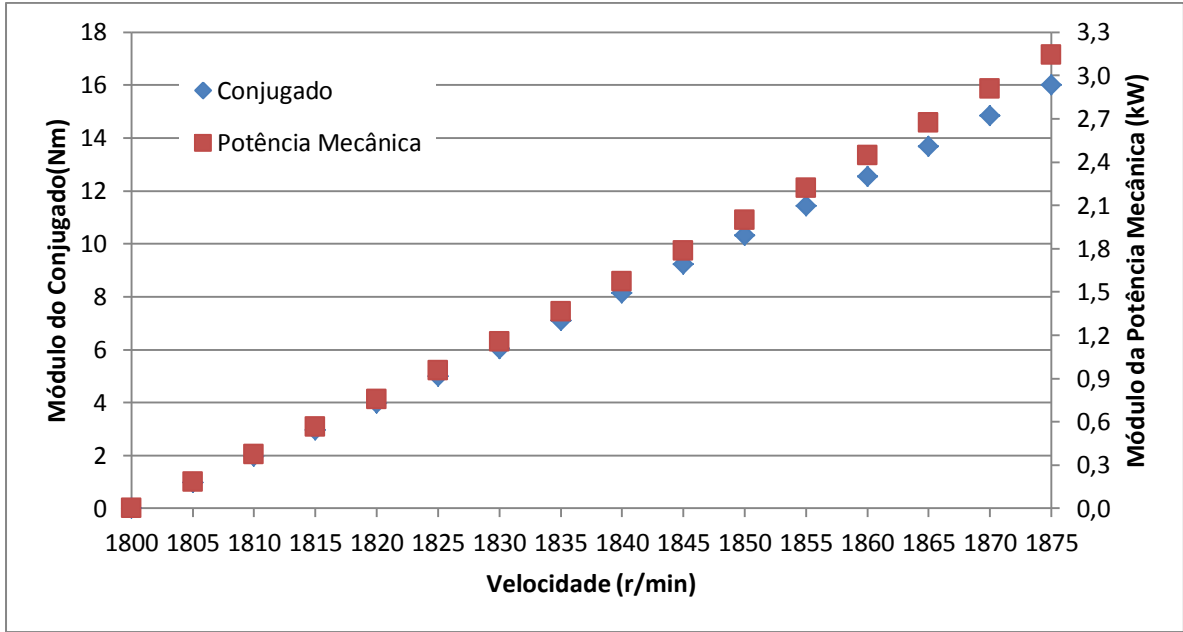
**Figura 45** Circuito equivalente resultante da máquina de indução original.

### 3.2.6 Resultados Analíticos Adquiridos a partir do Circuito Equivalente Monofásico

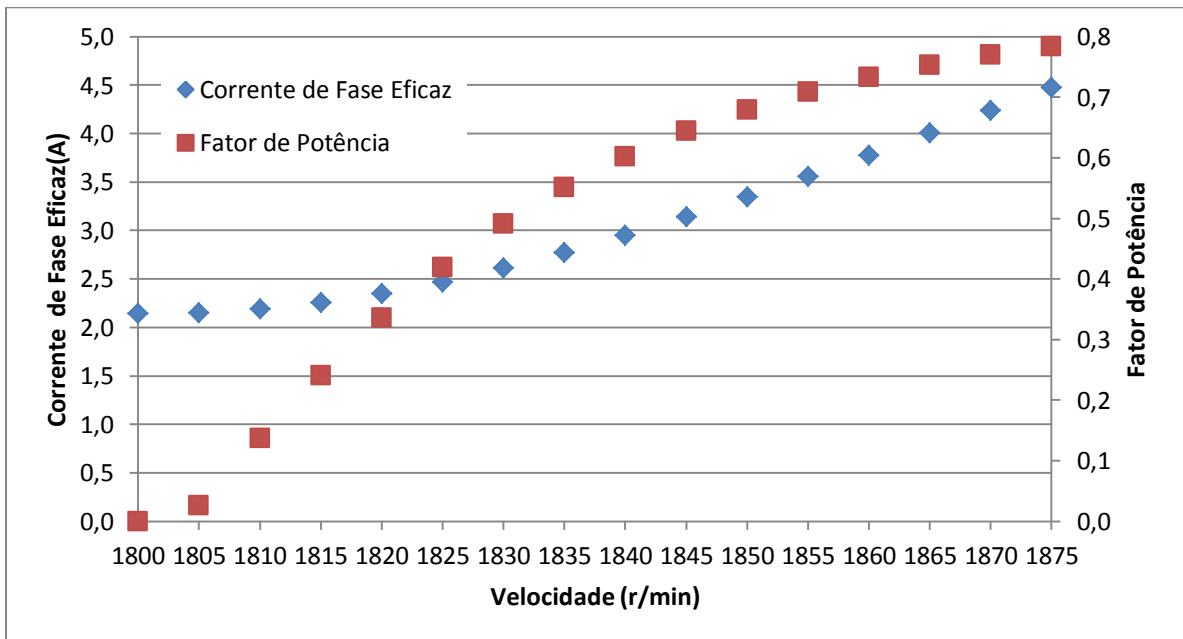
A Tabela 19 apresenta os resultados considerando o circuito equivalente monofásico definido na Figura 45. A tensão considerada nos cálculos foi de 220 V e o intervalo de velocidades foi o compreendido entre os valores de 1800 rpm ( $s=0$ ) até 1875rpm ( $s= -4,17\%$ ). As Figuras 46, 47, 48 e 49 fornecem uma visão do comportamento teórico analítico da máquina. As grandezas apresentadas são conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento todas em relação à velocidade.

**Tabela 19 Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado a rede. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

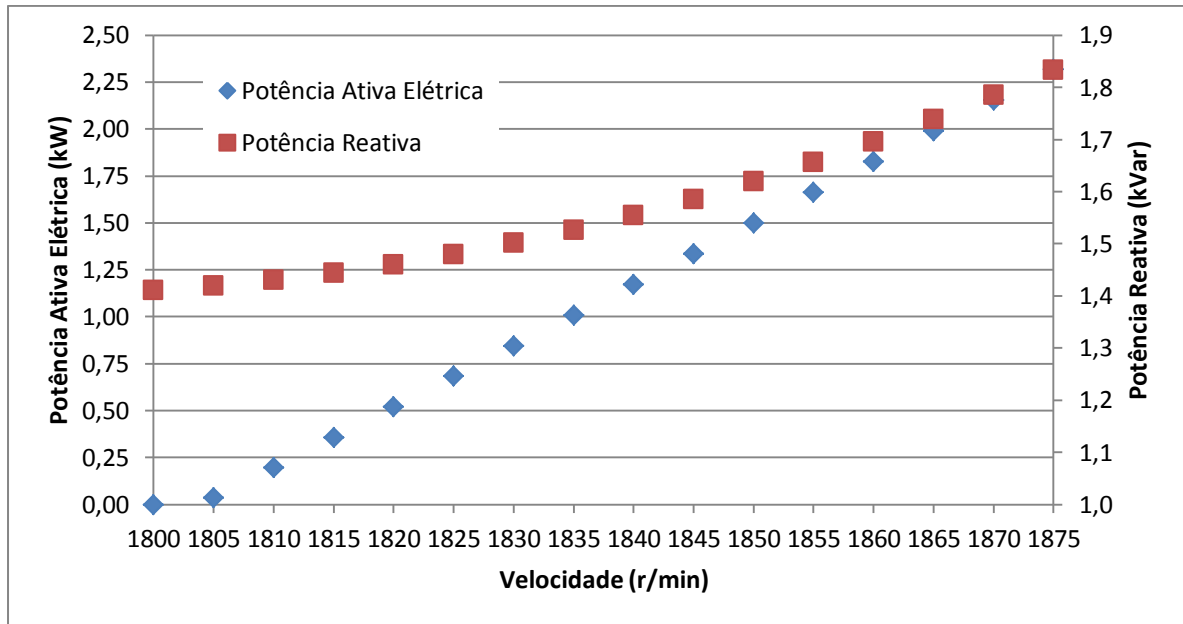
$s$	$n(\text{r/min})$	$T(\text{Nm})$	$P_{\text{mec}}(\text{kW})$	$I_{\text{fase}}(\text{A})$	$FP$	$P(\text{kW})$	$Q(\text{kVAr})$	$\eta$ (%)
0,0000	1800	0,00	0,00	2,15	0,00	0,000	1,411	0,00
-0,0028	1805	0,98	0,18	2,15	0,03	0,036	1,419	15,88
-0,0056	1810	1,97	0,37	2,19	0,14	0,197	1,430	47,20
-0,0083	1815	2,97	0,56	2,25	0,24	0,358	1,444	58,84
-0,0111	1820	3,98	0,76	2,35	0,34	0,520	1,461	64,72
-0,0139	1825	5,00	0,96	2,47	0,42	0,683	1,480	68,12
-0,0167	1830	6,04	1,16	2,61	0,49	0,846	1,502	70,23
-0,0194	1835	7,09	1,36	2,77	0,55	1,009	1,527	71,57
-0,0222	1840	8,16	1,57	2,95	0,60	1,172	1,555	72,43
-0,0250	1845	9,23	1,78	3,14	0,64	1,336	1,586	72,94
-0,0278	1850	10,33	2,00	3,34	0,68	1,500	1,620	73,22
-0,0306	1855	11,43	2,22	3,56	0,71	1,663	1,656	73,31
-0,0333	1860	12,55	2,45	3,78	0,73	1,827	1,696	73,27
-0,0361	1865	13,69	2,67	4,01	0,75	1,991	1,739	73,11
-0,0389	1870	14,85	2,91	4,24	0,77	2,154	1,785	72,87
-0,0417	1875	16,02	3,14	4,48	0,78	2,318	1,834	72,55



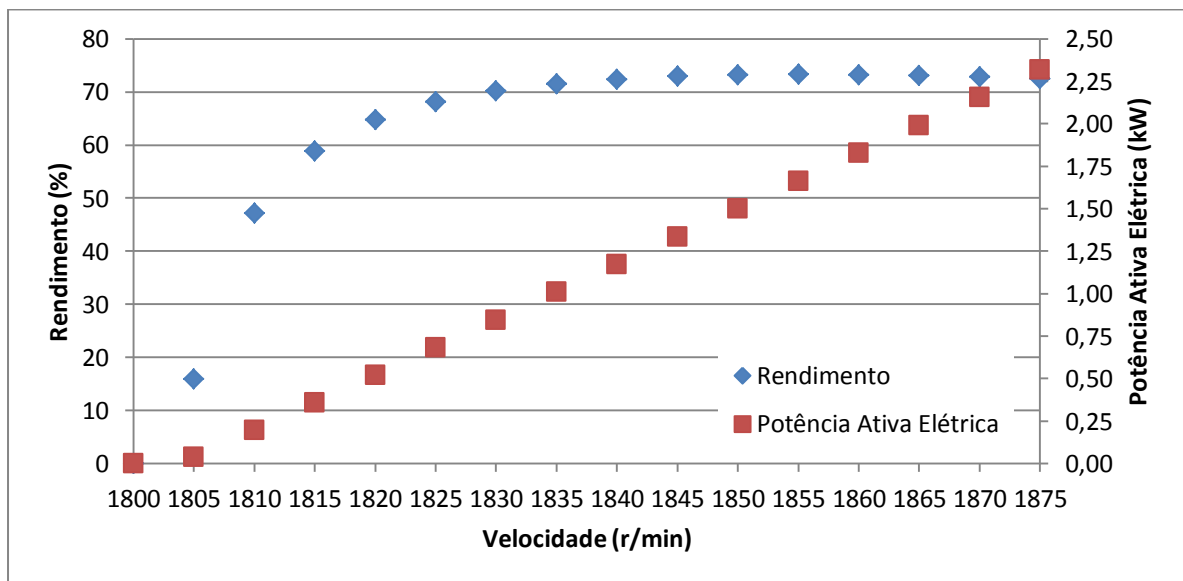
**Figura 46** Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado e potência mecânica versus velocidade.



**Figura 47** Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade.



**Figura 48** Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade.



**Figura 49** Resultados analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Rendimento e potência ativa versus velocidade.

As Figuras 46, 47, 48 e 49 mostram os gráficos dos resultados analíticos de conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento, respectivamente, para a máquina de indução original operando como gerador. No ponto de operação referente ao valor de velocidade de 1870 r/min, próximo à condição de corrente nominal, foram obtidos os valores de 0,77 e 72,55%

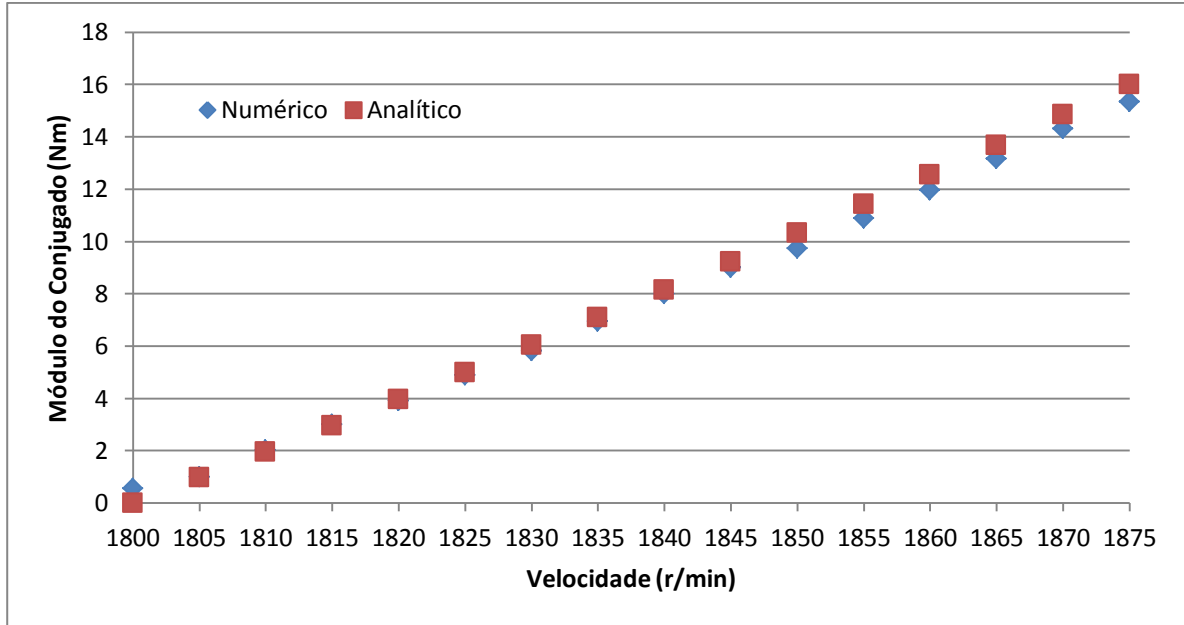


para fator de potência e rendimento, respectivamente. Observa-se que estes valores são menores que os resultados numéricos para a máquina de indução original operando como gerador, 0,84 e 81,88% para fator de potência e rendimento, respectivamente, referente ao mesmo ponto de operação.

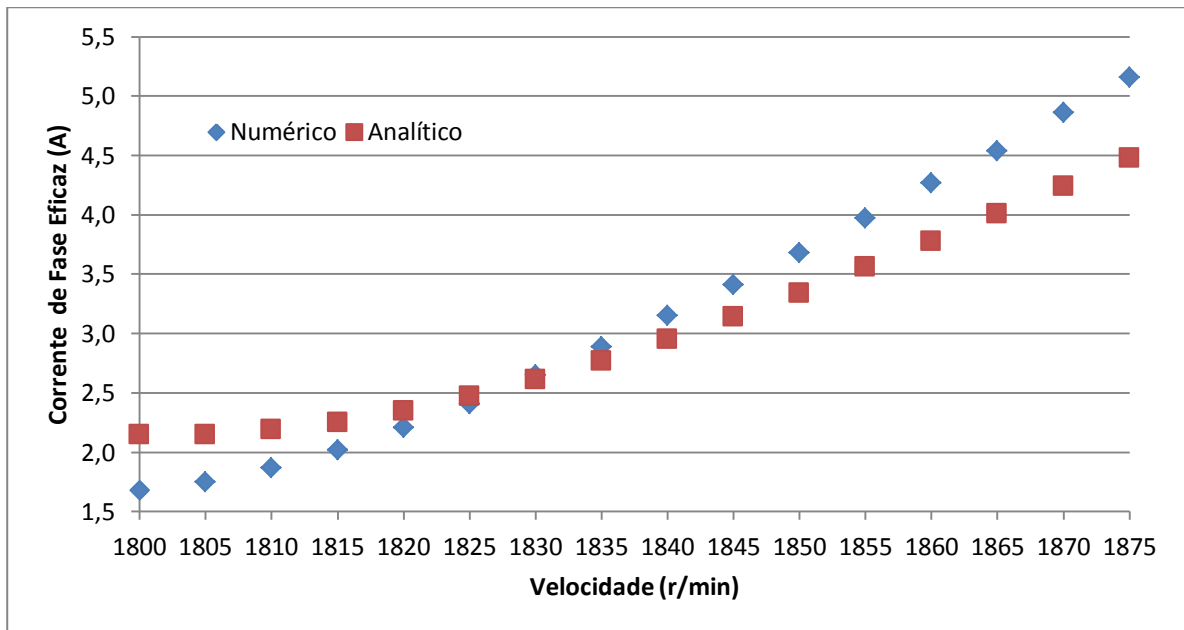
Apesar dos resultados analíticos apresentarem uma diferença maior que os resultados numéricos quando ambos são comparados com resultados experimentais, como mencionado na referência (BOGLIETTI, *et al.*, 2003), estes servem como uma alternativa aos obtidos por simulação por elementos finitos, pois não necessitam de informações de características construtivas detalhadas e nem de softwares dedicados. Entretanto, os modelos analíticos com base no circuito equivalente apresentam incertezas maiores nos resultados que os obtidos nos modelos numéricos por elementos finitos, principalmente, por não levarem em consideração questões como o efeito de saturação do material ferromagnético, importantes no projeto de geradores de indução, como descrito no Capítulo 3.

### **3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS E MODELO ADOTADO PARA PROJETO**

A fim de investigar os resultados da máquina de indução original operando como gerador, as Figuras 50, 51, 52, 53, 54 e 55 mostram os gráficos dos resultados analíticos e numéricos. As grandezas apresentadas são conjugado eletromagnético, corrente de fase, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento, respectivamente, todas em relação à velocidade.



**Figura 50** Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado versus velocidade.



**Figura 51** Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz versus velocidade.

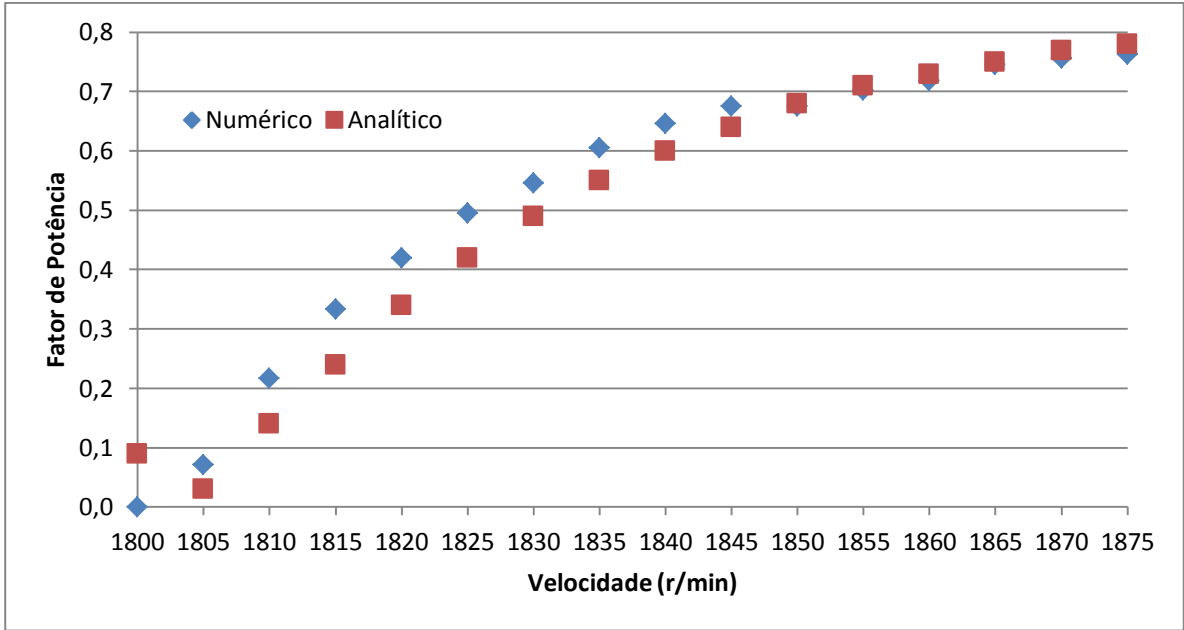


Figura 52 Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Fator de potência versus velocidade.

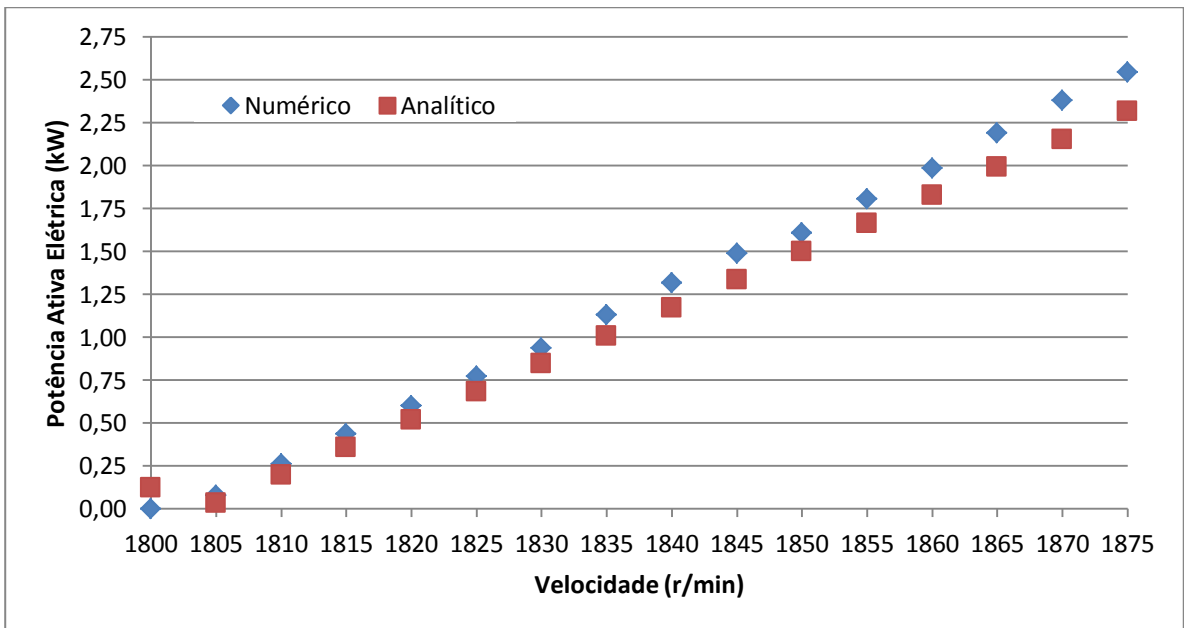
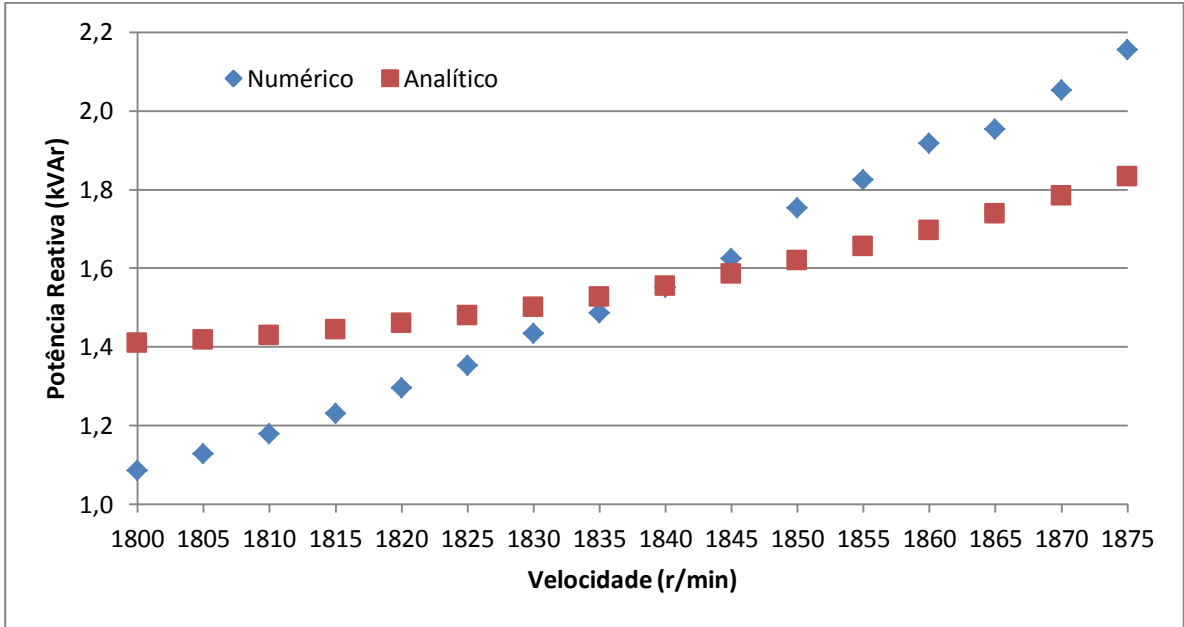
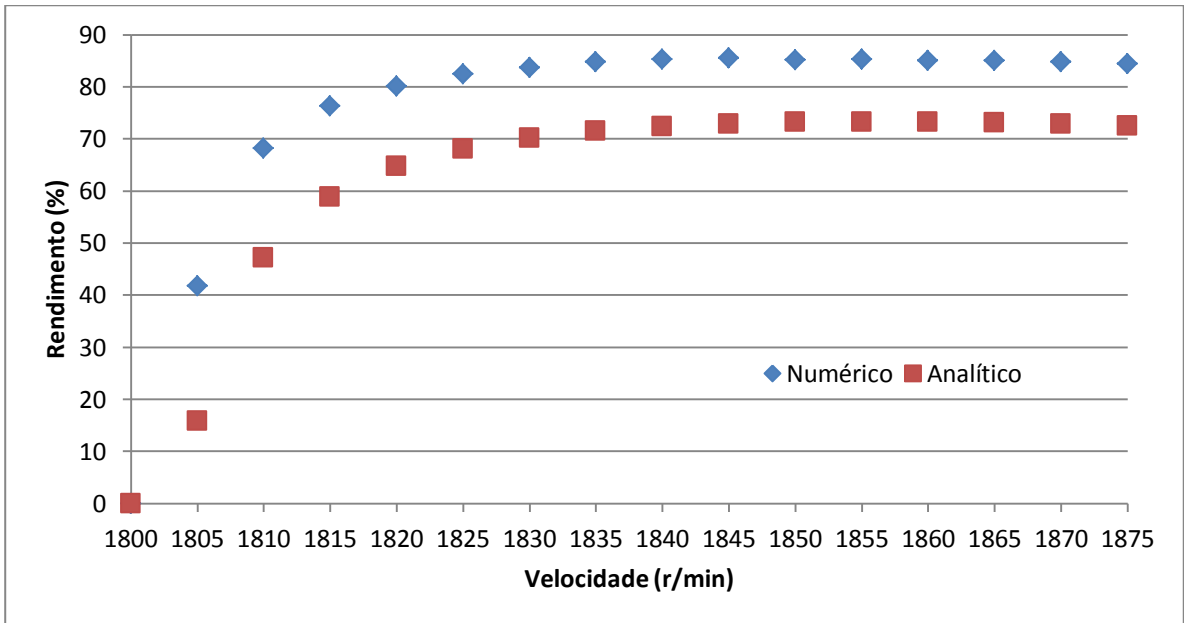


Figura 53 Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência ativa versus velocidade.



**Figura 54** Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência reativa versus velocidade.



**Figura 55** Resultados numéricos e analíticos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Rendimento versus velocidade.

Embora, os resultados dos modelos numéricos e analíticos de conjugado tenham valores próximos para a máquina de indução original operando como gerador, conforme apresentado no gráfico da Figura 50, os gráficos de corrente de fase eficaz, potência reativa e fator de potência, apresentados nas Figuras 51, 54 e 52, respectivamente, mostram

divergência nos valores dos resultados do modelo numérico e do modelo analítico. Esta discordância está associada, principalmente, à característica da não linearidade da permeabilidade relativa do núcleo ferromagnético contida no modelo numérico computacional que difere do modelo analítico, onde os parâmetros concentrados apresentam características lineares.

Neste estudo, a escolha do modelo a ser implementado que melhor se adequa à investigação e projeto do gerador de indução é efetuada pelo critério da diferença dos valores obtidos da corrente por fase entre os modelos simulados e o valor de placa da máquina original quando o gerador encontra-se na velocidade de operação nominal. Este critério é adotado como o principal porque referencia o limite térmico operacional da máquina de indução. Logo, primeiramente, realizou-se um ensaio experimental para a obtenção do valor de velocidade sobre síncrona quando é estabelecido o valor de corrente por fase nominal. Assim, obteve-se experimentalmente o valor de velocidade de 1870 r/min referente a 4,88 A na operação da máquina de indução original.

Os resultados do modelo numérico por elementos finitos e do modelo por circuito equivalente mostraram os valores de 4,86 A e 4,24 A, respectivamente, relacionado à velocidade de 1870 r/min para a máquina de indução original. A diferença entre o resultado numérico por elementos finitos e o valor experimental obtido da corrente por fase na velocidade de 1870 r/min é de 0,4% e o modelo por circuito equivalente é de 13,11%. Logo, a partir destes resultados, conclui-se que o modelo numérico por elementos finitos melhor adequa-se à investigação e projeto de geradores de indução que o modelo analítico por circuito equivalente.

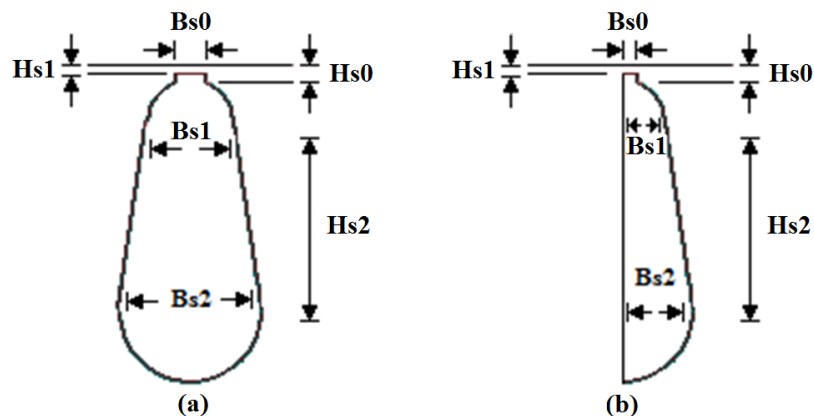
#### **4 PROTÓTIPO DE GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR DO TIPO GAIOLA DE ESQUILO COM RANHURAS ASSIMÉTRICAS**

Neste capítulo, o projeto de um protótipo de gerador de indução do tipo gaiola de esquilo com ranhuras assimétricas no rotor é apresentado. Com o objetivo de salientar a contribuição do estudo e aplicação de ranhuras com formato assimétrico no rotor, optou-se em manter o número de ranhuras do rotor da máquina de indução original. Assim, as variáveis dimensionais estão relacionadas com a ranhura assimétrica do rotor. As variáveis independentes estão relacionadas com as dimensões do estator, rotor, pacote de chapas e características do enrolamento do estator. É importante destacar que o diâmetro externo do estator não foi alterado no processo, a fim de utilizar a mesma carcaça para fins de comparação de resultados entre as duas concepções de máquinas.

Em termos de projeto da máquina, geralmente, para reduzir a potência reativa e aumentar o fator de potência, a ranhura do rotor gaiola de esquilo é dimensionada mais próxima quanto possível do entreferro, porque a reatância de dispersão do rotor define as linhas de campo do rotor que não se estabelecem entre rotor e armadura e que não concatenam os enrolamentos desta última. Se as barras são localizadas próximas da periferia do rotor, a reatância de dispersão será menor, e o fator de potência poderá ser mais elevado. No entanto, para maior rendimento é necessário uma baixa resistência do rotor gaiola de esquilo. Uma opção é aumentar o volume das barras condutoras do rotor ou aumentar a condutividade do material da gaiola e anéis. Para estes fins, uma ranhura do rotor com uma maior área de secção, tão próxima possível do entreferro e com gaiola de cobre apresenta-se como uma interessante solução.

Através da obtenção dos resultados de densidade de fluxo magnético pelas simulações numéricas, observaram-se os pontos de saturação no rotor da máquina de indução original de

2,2 kW, quando se estabelece o valor de corrente nominal no enrolamento do estator no modo de operação de geração interligado à rede. Logo, a partir do conhecimento destes pontos de saturação, conforme mostra a Figura 30 e a Tabela 4, procurou-se criar uma nova topologia de dimensionamento de ranhura do rotor que diminuísse o valor da densidade de fluxo magnético nos pontos de maior saturação. Conseqüentemente, a máquina de indução operando como gerador encontrando-se na região de não saturação magnética, os resultados das características de desempenho em regime permanente, como o fator de potência, por exemplo, melhorariam. Assim, idealizou-se o conceito do formato de desenho assimétrico da ranhura do rotor, conforme mostra a Figura 56.



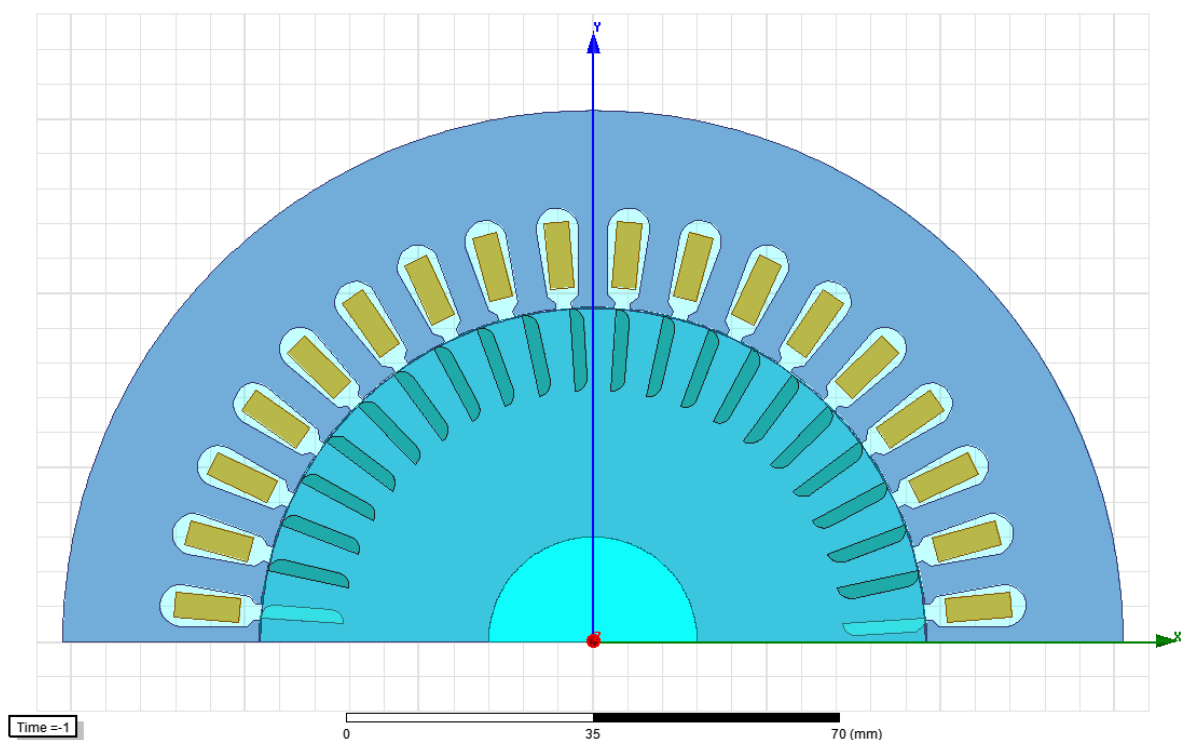
**Figura 56** Layout e variáveis dimensionais das ranhuras do rotor das máquinas de indução estudadas: (a) ranhura da máquina de indução original; (b) ranhura assimétrica projetada para operação como gerador.

A concepção de ranhuras assimétricas no rotor está no fato, conforme as diretrizes descritas na Tabela 1, de obter maiores ganhos de fator de potência e rendimento do que ranhuras com desenhos simétricos, quando máquinas de indução encontram-se no modo de operação de geração interligado à rede. Para isso, adotou-se um desenho com o formato da ranhura do rotor da máquina de indução original dividido ao meio, conforme mostrado na Figura 56. Conjuntamente, realizam-se parametrizações com o intuito de obter a melhor escolha das variáveis dimensionais, primeiramente, em termos de valores de fator de potência

(maximizar) e rendimento (maximizar) e, posteriormente, o valor da área de secção (minimizar).

#### 4.1 MODELO NUMÉRICO 2D DO GERADOR DE INDUÇÃO

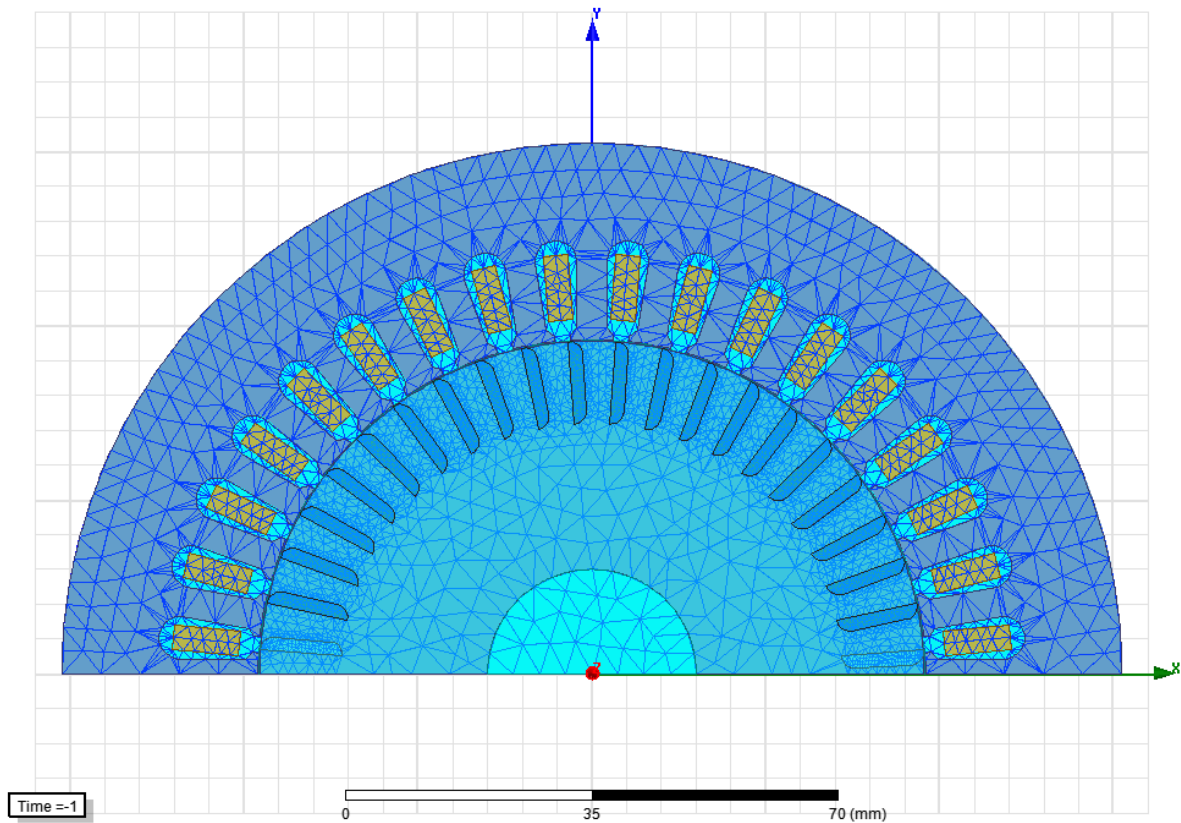
Semelhante ao modelo numérico da máquina de indução original, o objetivo do MEF é determinar o comportamento dos parâmetros eletromagnéticos em regime permanente do gerador de indução projetado com rotor de gaiola de esquilo com ranhuras assimétricas no rotor, cujos dados nominais são iguais aos mostrados na Tabela 3. Não se optou pelo modelo 3D devido ao elevado tempo de processamento (meses) que demandam cada uma das simulações paramétricas empregadas para o dimensionamento da ranhura assimétrica do rotor, neste estudo. A Figura 57 mostra o modelo desenhado com uma simetria de 180°.



**Figura 57** Desenho do modelo numérico axissimétrico do gerador de indução projetado com simetria de 180°.



Na Figura 58, são apresentados os detalhes da vista da malha, considerando, em destaque, a região do núcleo ferromagnético, das bobinas do estator e das barras da gaiola de esquilo, sendo que a malha possui 9016 elementos.



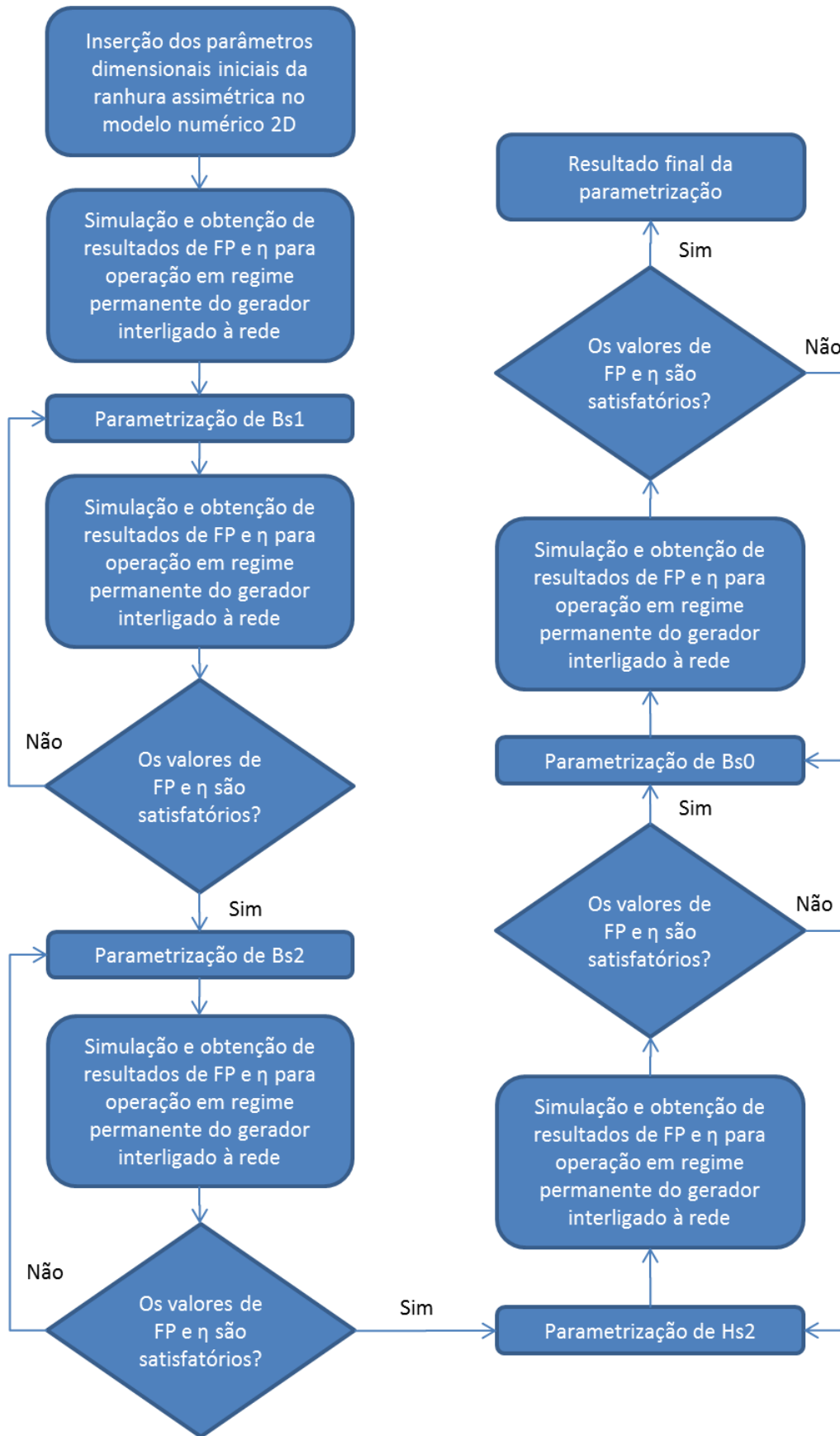
**Figura 58 Desenho com a malha em destaque do modelo numérico do gerador de indução projetado.**

#### **4.1.1 Análise Paramétrica Dimensional da Ranhura Assimétrica do Rotor**

A parametrização das dimensões da ranhura visa a obtenção dos maiores valores para fator de potência e rendimento, igualmente importantes. A variável secundária está relacionada com a área da seção da ranhura. Assim, executam-se sucessivas análises numéricas pelo MEF em regime permanente até que os resultados satisfaçam as condições desejadas. Salienta-se que, para diminuir o tempo de processamento, nos cálculos de fator de

potência e rendimento nominais realizados nas simulações paramétricas foram levados em consideração somente parâmetros elétricos. Logo, as perdas rotacionais não foram levadas em consideração.

O fluxograma adotado para o processo de análise paramétrica é apresentado na Figura 59. Assim, para o ponto inicial do estudo paramétrico, escolheu-se uma ranhura assimétrica com área de secção menor que a ranhura original, intentando-se obter um valor de densidade de corrente que não saturasse o núcleo ferromagnético do rotor. A linha em azul na Tabela 20 refere-se às dimensões escolhidas para o ponto inicial.



**Figura 59 Fluxograma adotado para a parametrização das variáveis dimensionais da ranhura assimétrica.**

Como o valor das dimensões das variáveis estão na casa dos milímetros, o valor da variação paramétrica utilizada encontra-se na faixa de décimos de milímetros. Neste estudo, salienta-se que os valores dos resultados apresentados de todas as variáveis empregadas nas análises paramétricas contêm somente Algarismos Corretos, sendo descartados os Algarismos Duvidosos. As Tabelas 20, 21, 22 e 23 mostram os resultados obtidos durante o processo de parametrização, a linha verde destaca o valor escolhido para a variável parametrizada.

**Tabela 20 Resultados paramétricos para a variável Bs1 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em azul destaca as dimensões iniciais e a linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Bs1.**

Bs0 (mm)	Bs1 (mm)	Bs2 (mm)	Hs0 (mm)	Hs01 (mm)	Hs2 (mm)	n (r/min)	I <sub>fase</sub> (A)	FP	η	Área (mm <sup>2</sup> )
0,113	2,250	1,5	0	0	8,0	1889	4,66	0,837	0,863	20,744
0,113	2,125	1,5	0	0	8,0	1893	4,67	0,840	0,874	19,815
0,113	2,000	1,5	0	0	8,0	1897	4,66	0,842	0,873	18,910
0,113	1,875	1,5	0	0	8,0	1901	4,65	0,839	0,864	18,029
0,113	1,750	1,5	0	0	8,0	1905	4,63	0,844	0,866	17,174

A Tabela 20 mostra os resultados paramétricos para a variável Bs1 com as demais variáveis dimensionais fixas. Realizaram-se variações de 0,125 mm para o intervalo correspondente de 1,750 mm até 2,250 mm. A escolha do valor de Bs1 foi definido pelo resultado de maior fator de potência e rendimento, sendo o critério de desempate a área de secção com o menor valor.

**Tabela 21 Resultados paramétricos para a variável Bs2 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Bs2.**

Bs0 (mm)	Bs1 (mm)	Bs2 (mm)	Hs0 (mm)	Hs01 (mm)	Hs2 (mm)	n (r/min)	I <sub>fase</sub> (A)	FP	η	Área (mm <sup>2</sup> )
0,113	2,000	2,0	0	0	8,0	1883	4,64	0,834	0,876	22,284
0,113	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,840	0,870	21,578
0,113	2,000	1,8	0	0	8,0	1888	4,64	0,838	0,873	20,887
0,113	2,000	1,7	0	0	8,0	1891	4,65	0,837	0,864	20,213
0,113	2,000	1,6	0	0	8,0	1894	4,66	0,842	0,863	19,553
0,113	2,000	1,5	0	0	8,0	1897	4,66	0,842	0,863	18,910
0,113	2,000	1,4	0	0	8,0	1900	4,67	0,840	0,858	18,282

A Tabela 21 mostra os resultados paramétricos para a variável Bs2 com as demais variáveis dimensionais fixas. Realizaram-se variações de 0,1 mm para o intervalo correspondente de 1,4 mm até 2,0 mm. A escolha do valor de Bs2 foi definida pelo resultado de maior fator de potência e, posteriormente, rendimento.

**Tabela 22 Resultados paramétricos para a variável Hs2 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Hs2.**

Bs0 (mm)	Bs1 (mm)	Bs2 (mm)	Hs0 (mm)	Hs01 (mm)	Hs2 (mm)	n (r/min)	I <sub>fase</sub> (A)	FP	η	Área (mm <sup>2</sup> )
0,113	2,000	1,9	0	0	9,0	1880	4,69	0,831	0,858	23,528
0,113	2,000	1,9	0	0	8,5	1883	4,69	0,835	0,876	22,553
0,113	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,84	0,87	21,578
0,225	4	3,8	0,01	0	7,5	1890	4,66	0,841	0,863	20,603

A Tabela 22 mostra os resultados paramétricos para a variável Hs2 com as demais variáveis dimensionais fixas. Realizaram-se variações de 0,5 mm para o intervalo correspondente de 7,5 mm até 9,0 mm. Idem a variável Bs2, a escolha do valor de Hs2 foi definida pelo resultado de maior fator de potência e, posteriormente, rendimento.

**Tabela 23 Resultados paramétricos para a variável Bs0 da ranhura assimétrica do rotor do gerador de indução projetado. A linha em verde destaca o valor escolhido para a variável Bs0.**

Bs0 (mm)	Bs1 (mm)	Bs2 (mm)	Hs0 (mm)	Hs01 (mm)	Hs2 (mm)	n (r/min)	I <sub>fase</sub> (A)	FP	η	Área (mm <sup>2</sup> )
1,500	2,000	1,9	0	0	8,0	1887	4,66	0,827	0,879	21,592
1,250	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,64	0,834	0,871	21,589
1,000	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,66	0,837	0,874	21,587
0,875	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,66	0,839	0,875	21,586
0,750	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,840	0,875	21,584
0,650	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,839	0,879	21,583
0,600	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,840	0,877	21,583
0,550	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,840	0,876	21,582
0,500	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,840	0,874	21,582
0,400	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,841	0,873	21,581
0,200	2,000	1,9	0	0	8,0	1886	4,67	0,840	0,872	21,579

A Tabela 23 mostra os resultados paramétricos para a variável Bs0 com as demais variáveis dimensionais fixas. Realizaram-se variações com valores de passos diferentes para o

intervalo correspondente de 7,5 mm até 9,0 mm. Nota-se que o valor de fator de potência permanece constante para o intervalo de 0,200 mm até 0,875 mm, assim, o critério de escolha ficou relacionado ao maior valor de rendimento.

A Tabela 24 mostra o resultado final do processo de parametrização da ranhura assimétrica do rotor e, também, mostra a comparação com as dimensões da ranhura simétrica original. Como resultado da análise paramétrica, a ranhura assimétrica obteve uma área de seção 16,8% a menos que a área de seção da ranhura simétrica original. Este valor menor da área de seção da ranhura assimétrica acarreta uma diminuição da densidade de corrente nas barras do rotor, conseqüentemente, uma diminuição da densidade de fluxo nos dentes do rotor, proporcionando que o rotor opere na região de não saturação do núcleo ferromagnético, como será mostrado na seção 4.1.2 desta tese.

**Tabela 24 Valores dimensionais das ranhuras do rotor das máquinas de indução estudadas.**

Parâmetro dimensional	Ranhura simétrica do rotor da máquina original	Ranhura assimétrica do rotor da máquina projetada como gerador
Hs0 (mm)	0,44	0
Hs01 (mm)	0,44	0
Hs2 (mm)	8,02	8
Bs0 (mm)	0	0,65
Bs1 (mm)	3,14	2
Bs1 (mm)	1,98	1,9
Área (mm <sup>2</sup> )	25,94	21,58

Após a definição da ranhura a ser utilizado no projeto do rotor do gerador de indução, o pacote de lâminas do rotor foi cortado com a máquina de eletroerosão a fio, Figura 60, do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A Figura 61 mostra o resultado do processo de corte das chapas e a Figura 62 apresenta o rotor já prototipado.



Figura 60 Máquina de eletroerosão a fio.



(a)



(b)

Figura 61 Confeção das lâminas do pacote do rotor: (a) lâminas cortadas em processo de secagem e (b) detalhes da lâmina cortada.



(a)

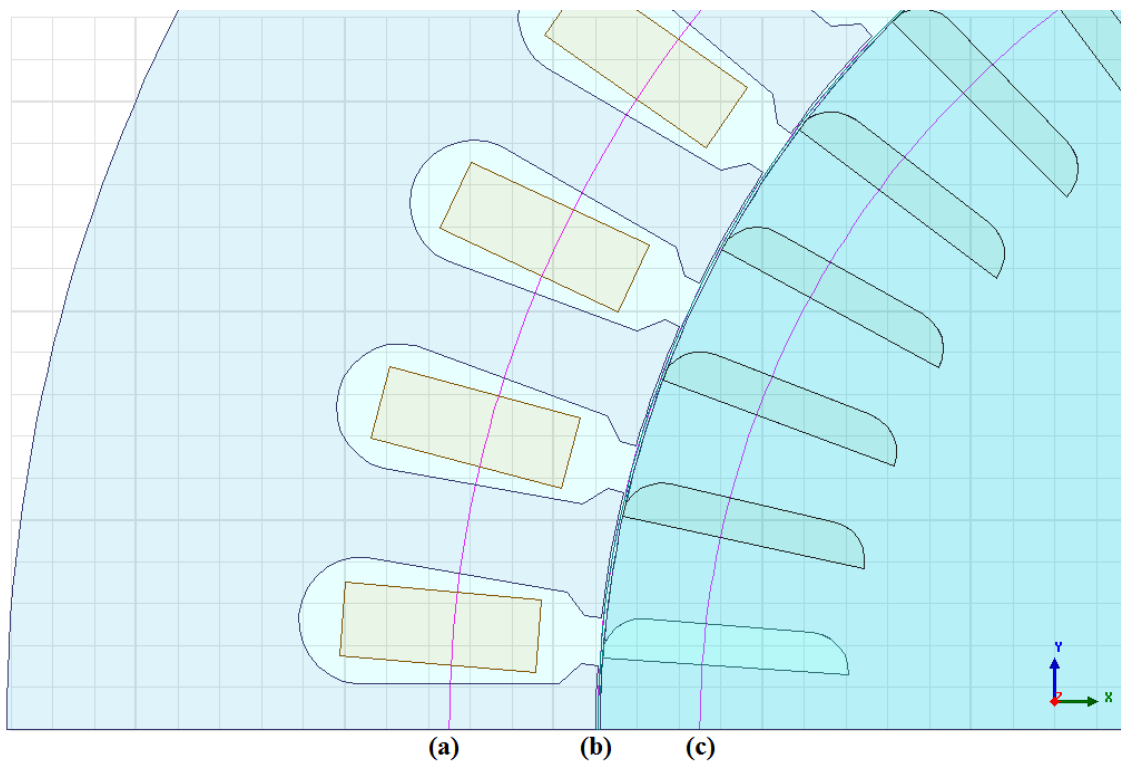


(b)

Figura 62 Protótipo do rotor do gerador de indução: (a) rotor com tampa e ventilador e (b) vista a partir da ponta do eixo.

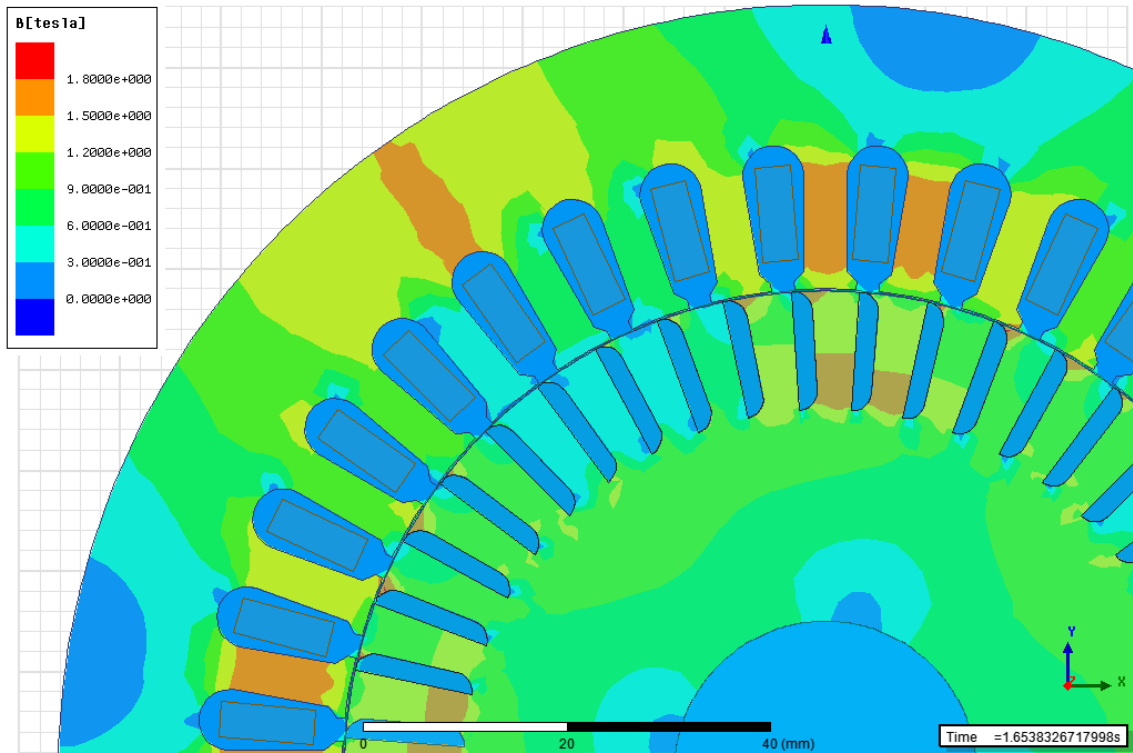
#### 4.1.2 Densidade de Fluxo Magnético no Gerador de Indução e o Efeito do Sentido de Rotação

Semelhante ao estudo sobre densidade de fluxo magnético realizado na máquina de indução original, a seguir, apresentam-se resultados adquiridos através de simulações numéricas 2D axissimétrica em regime permanente para o gerador de indução projetado. Inicialmente, para detectar os pontos de saturação no material ferromagnético nas simulações realizadas, traçaram-se as linhas pré-desenhadas, conforme mostra a Figura 63. Também, avaliam-se os resultados do mapeamento da densidade de fluxo magnético quando o gerador opera no sentido horário e anti-horário com o valor da velocidade referente ao valor de corrente nominal no estator. Assim, as Figuras 64 e 65 apresentam o mapa da densidade de fluxo magnético para o gerador de indução projetado operando com valor de corrente nominal no sentido horário e anti-horário de rotação do rotor, respectivamente.

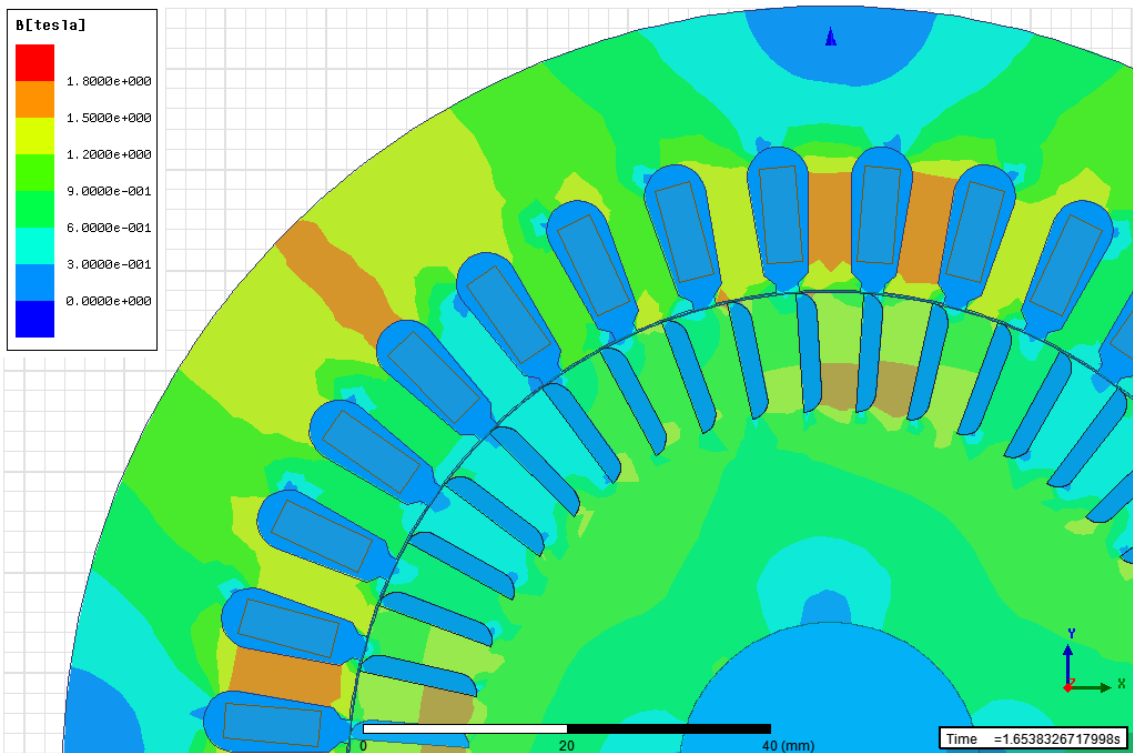


**Figura 63** Linhas traçadas ao longo da geometria do gerador de indução projetado no modelo por elementos finitos: (a) dentes do estator, (b) entreferro e (c) dentes do rotor.





**Figura 64** Mapa da densidade de fluxo magnético no gerador de indução projetado operando com valor de corrente nominal no sentido horário (1886r/min).



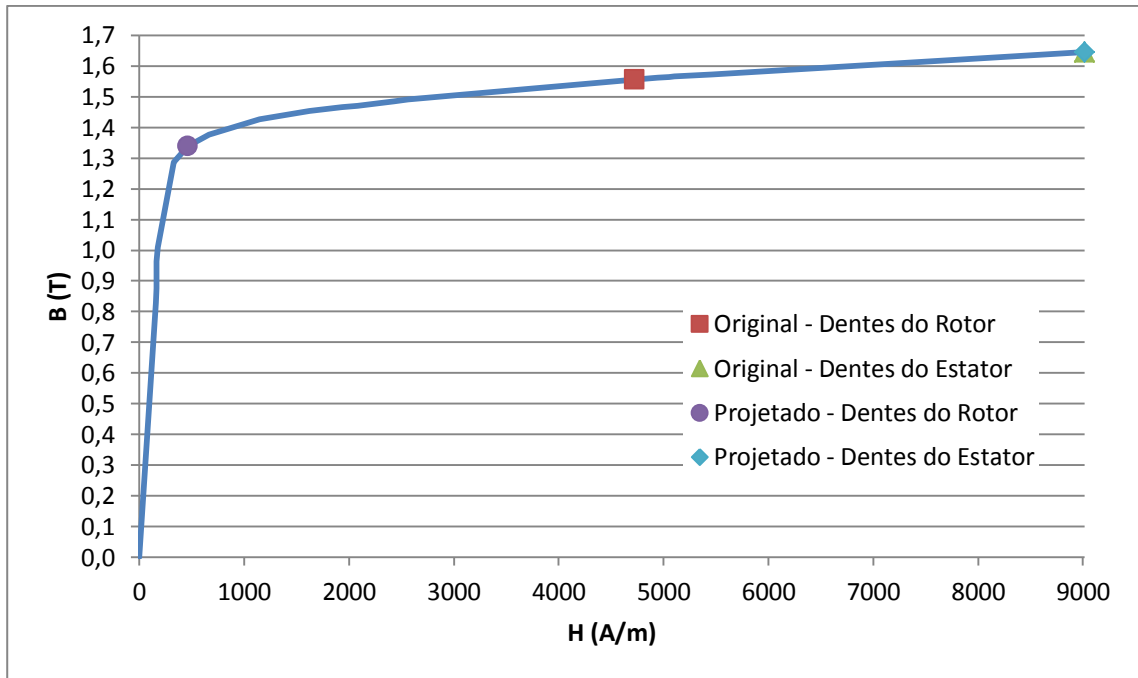
**Figura 65** Mapa da densidade de fluxo magnético no gerador de indução projetado operando com valor de corrente nominal no sentido anti-horário (1886r/min).

A Tabela 25 mostra a comparação de valores eficaz médio de indução máxima, referente às posições geométricas das linhas descritas nas Figuras 26 e 63, obtidos para a velocidade nominal quando a corrente nominal (4,68 A) é alcançada para a máquina de indução original operando como gerador e para o gerador de indução projetado operando no sentido horário e anti-horário.

**Tabela 25 Valores eficaz médio de indução máxima resultantes das simulações por elementos finitos nas linhas traçadas para a máquina de indução original operando como gerador e para o gerador de indução projetado, ambos operando em regime permanente na velocidade nominal.**

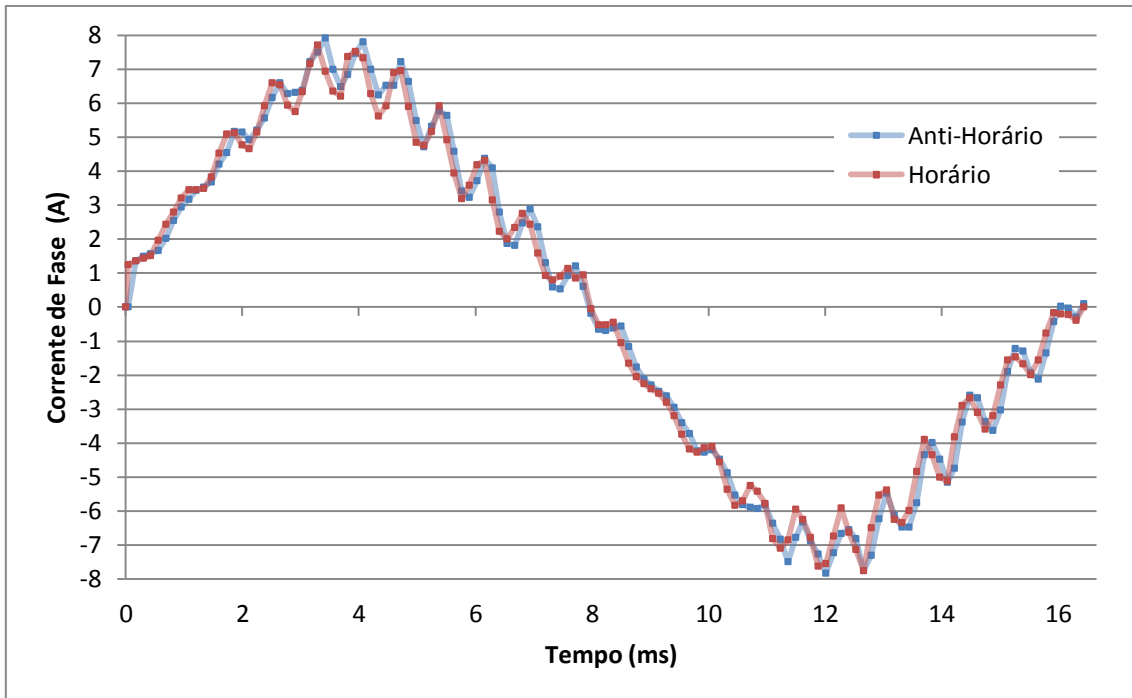
Linha	Valores máximos de indução B(T)		
	Máquina de Indução Original Operando como Gerador	Gerador de Indução Projetado	
		Sentido Horário de Rotação	Sentido Anti-Horário de Rotação
Entreferro	0,950	0,924	0,907
Dentes do Estator	1,629	1,647	1,637
Dentes do Rotor	1,554	1,308	1,285

Conforme os resultados numéricos mostrados na Tabela 25, conclui-se que o projeto do rotor do gerador de indução opera numa região de menor saturação magnética do que o rotor da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede. A Figura 66 mostra os pontos de operação dos dentes do estator e do rotor referentes à curva BH do material ferromagnético, fornecido pela VOGES, para a máquina de indução original operando como gerador e para o gerador de indução projetado.



**Figura 66 Pontos de operação da densidade de fluxo magnético sobrepostos na curva BH referentes à máquina de indução original operando como gerador e ao gerador de indução projetado.**

A partir dos resultados do mapeamento da densidade de fluxo magnético, conforme mostrados nas Figuras 64 e 65, verifica-se a existência de regiões no topo dos dentes do rotor que apresentam saturações de densidade de fluxo magnético na operação com sentido horário de rotação. Este fato acarreta, principalmente, distorções na forma de onda do campo girante e na tensão induzida no entreferro. Logo, estas distorções se refletem no aumento da distorção harmônica da corrente elétrica gerada que, de acordo com os resultados provenientes de simulações numéricas, obtiveram uma taxa de distorção harmônica total, considerando até 50ª ordem, de 13,2% e 12,5% para a operação no sentido horário e anti-horário, respectivamente. Os resultados numéricos das formas de onda da corrente referente aos sentidos de rotação são mostrados na Figura 67.



**Figura 67 Resultados numéricos para a forma de onda da corrente de fase do gerador de indução projetado.**

Embora a diferença do efeito do sentido de rotação seja pequena, conforme apresenta a Tabela 25, a referência (Hitachi Ltda, 2014) cita que a perda gerada no rotor devido à distorção harmônica pode ser reduzida e os valores de fator de potência e rendimento aumentados na operação nominal no rotor com ranhuras assimétricas, desde que o sentido de rotação esteja adequado. Neste estudo, o gerador de indução projetado obteve valores de fator de potência iguais a 0,82 e 0,84 para os sentidos horário e anti-horário de rotação nas condições nominais de operação (1886r/min), entretanto, não obteve-se valores diferentes para o rendimento. Assim, como a diferença dos valores numéricos apresentados pelo efeito do sentido de rotação é inferior a 10% (critério adotado pelo autor), este estudo não é conclusivo sobre a significância deste fenômeno aplicado a ranhuras assimétricas no rotor em geradores de indução.

Todavia, a partir dos resultados analisados nesta seção, os resultados numéricos, analíticos e experimentais para o gerador de indução operando interligado à rede em regime

permanente apresentados nas seções a seguir são referenciados ao sentido anti-horário de rotação, pois se considera este sentido como o operacional de projeto.

#### **4.1.3 Resultados Numéricos para o Gerador de Indução Operando Interligado à Rede em Regime Permanente**

Os resultados numéricos do gerador de indução em regime permanente foram obtidos por simulações pelo MEF em 2D. Semelhante às simulações executadas para máquina de indução original operando como gerador interligado à rede, todos os resultados correspondem à faixa de velocidades no modo geração, ou seja, acima da velocidade síncrona. As fórmulas para potência instantânea, fator de potência, potência ativa, potência aparente, potência reativa, potência mecânica de entrada, perdas totais e rendimento estão descritas na seção 3.1.3.

As Tabelas 26, 27 e 28 apresentam os resultados oriundos do modelo numérico para o gerador de indução projetado operando interligado à rede em regime permanente. Os resultados das Tabelas exibem a faixa de velocidades operacionais cujo limite superior (linha destaca em verde) é definido pela velocidade, quando se alcança o valor unitário de corrente por unidade. A faixa de valores de velocidades operacionais considerada foi desde a velocidade síncrona 1800 rpm, ( $s = 0$ ), até 1890 rpm, ( $s = -5,56\%$ ).

As Figuras 68, 69, 70 e 71 mostram os gráficos das grandezas de conjugado, potência mecânica, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento todas em relação à velocidade. Esclarece-se que os valores apresentados são eficazes, levando em consideração as perdas rotacionais para o cálculo do rendimento.

**Tabela 26 Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

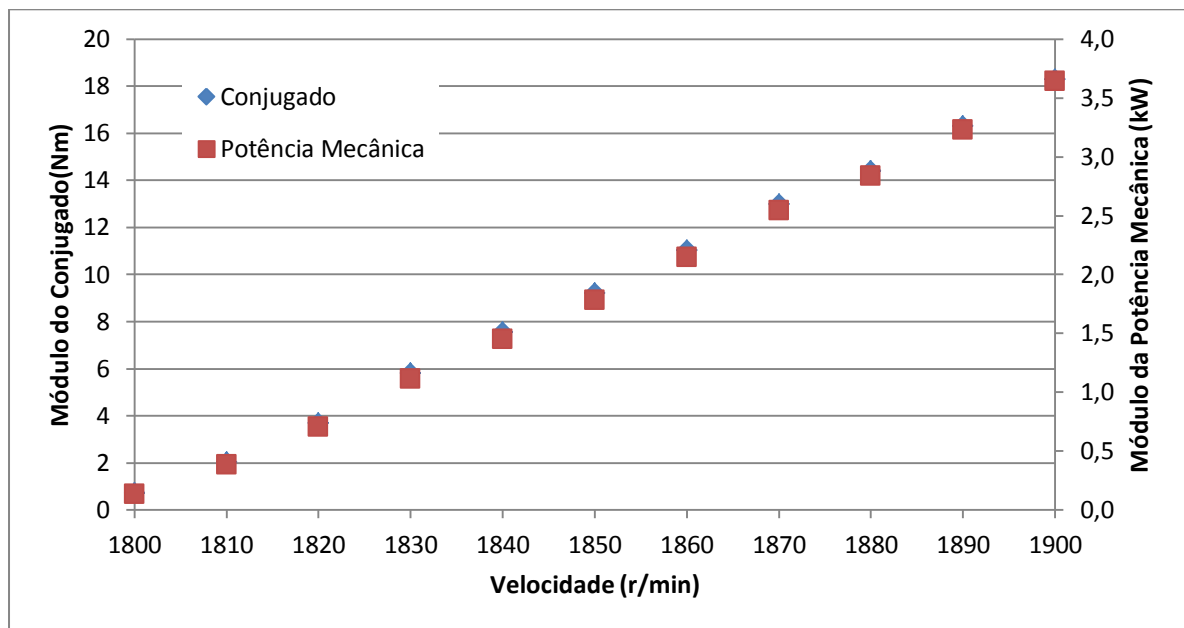
$s$	$n(\text{r/min})$	$l(\text{p.u.})$	$I_{\text{fase}}(\text{A})$	$P(\text{kW})$	$Q(\text{kVAr})$	$S(\text{kVA})$	$FP$
0,0000	1800	0,349	1,63	0,000	1,054	1,054	0,00
-0,0056	1810	0,370	1,73	0,240	1,092	1,118	0,22
-0,0111	1820	0,417	1,95	0,545	1,137	1,261	0,43
-0,0167	1830	0,494	2,31	0,926	1,172	1,493	0,62
-0,0222	1840	0,579	2,71	1,233	1,244	1,752	0,70
-0,0278	1850	0,674	3,15	1,521	1,354	2,036	0,75
-0,0333	1860	0,770	3,60	1,832	1,436	2,327	0,79
-0,0389	1870	0,879	4,11	2,163	1,543	2,657	0,81
-0,0444	1880	0,960	4,49	2,403	1,628	2,903	0,83
<b>-0,0500</b>	<b>1890</b>	<b>1,069</b>	<b>5,00</b>	<b>2,718</b>	<b>1,749</b>	<b>3,232</b>	<b>0,84</b>
-0,0556	1900	1,180	5,52	3,040	1,868	3,568	0,85

**Tabela 27 Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, perdas totais e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

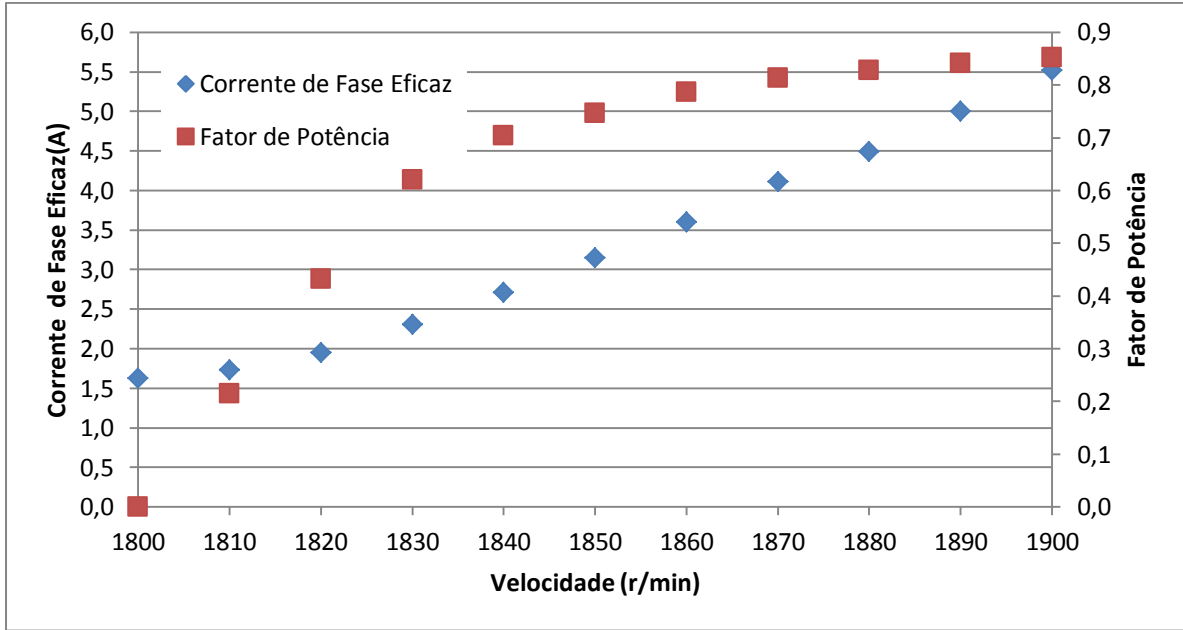
$s$	$n(\text{r/min})$	$l(\text{p.u.})$	$T(\text{Nm})$	$P_{\text{mec}}(\text{kW})$	$P_{\text{perdas}}(\text{kW})$	$\eta$ (%)
0,0000	1800	0,349	0,71	0,134	0,214	0,00
-0,0056	1810	0,370	2,02	0,382	0,223	51,84
-0,0111	1820	0,417	3,68	0,702	0,240	69,44
-0,0167	1830	0,494	5,79	1,109	0,267	77,61
-0,0222	1840	0,579	7,53	1,450	0,302	80,31
-0,0278	1850	0,674	9,20	1,782	0,348	81,39
-0,0333	1860	0,770	11,01	2,145	0,401	82,03
-0,0389	1870	0,879	12,97	2,541	0,468	82,22
-0,0444	1880	0,960	14,40	2,834	0,522	82,15
<b>-0,0500</b>	<b>1890</b>	<b>1,069</b>	<b>16,31</b>	<b>3,227</b>	<b>0,602</b>	<b>81,88</b>
-0,0556	1900	1,180	18,29	3,639	0,693	81,44

**Tabela 28 Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Perdas Joule, perdas no núcleo e perdas rotacionais. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

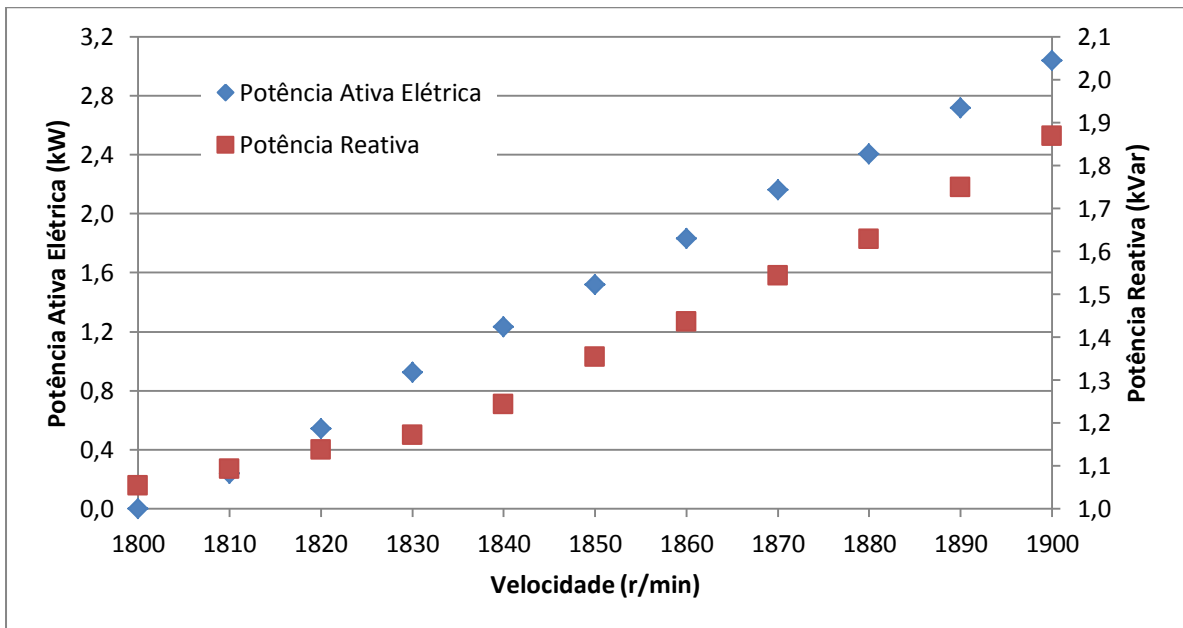
s	n(r/min)	l(p.u.)	$P_{\text{Joule}}$		$P_{\text{núcleo}}(\text{kW})$	$P_{\text{rotacionais}}(\text{kW})$
			$P_{\text{cobre}}(\text{kW})$	$P_{\text{alum.}}(\text{kW})$		
0,0000	1800	0,349	0,021	0,018	0,095	0,080
-0,0056	1810	0,370	0,024	0,021	0,097	0,081
-0,0111	1820	0,417	0,030	0,028	0,099	0,083
-0,0167	1830	0,494	0,042	0,039	0,102	0,084
-0,0222	1840	0,579	0,058	0,055	0,104	0,085
-0,0278	1850	0,674	0,079	0,075	0,107	0,087
-0,0333	1860	0,770	0,103	0,099	0,111	0,088
-0,0389	1870	0,879	0,134	0,128	0,116	0,090
-0,0444	1880	0,960	0,159	0,158	0,114	0,091
-0,0500	1890	1,069	0,197	0,196	0,116	0,093
-0,0556	1900	1,180	0,240	0,239	0,120	0,094



**Figura 68 Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Conjugado e potência mecânica versus velocidade.**

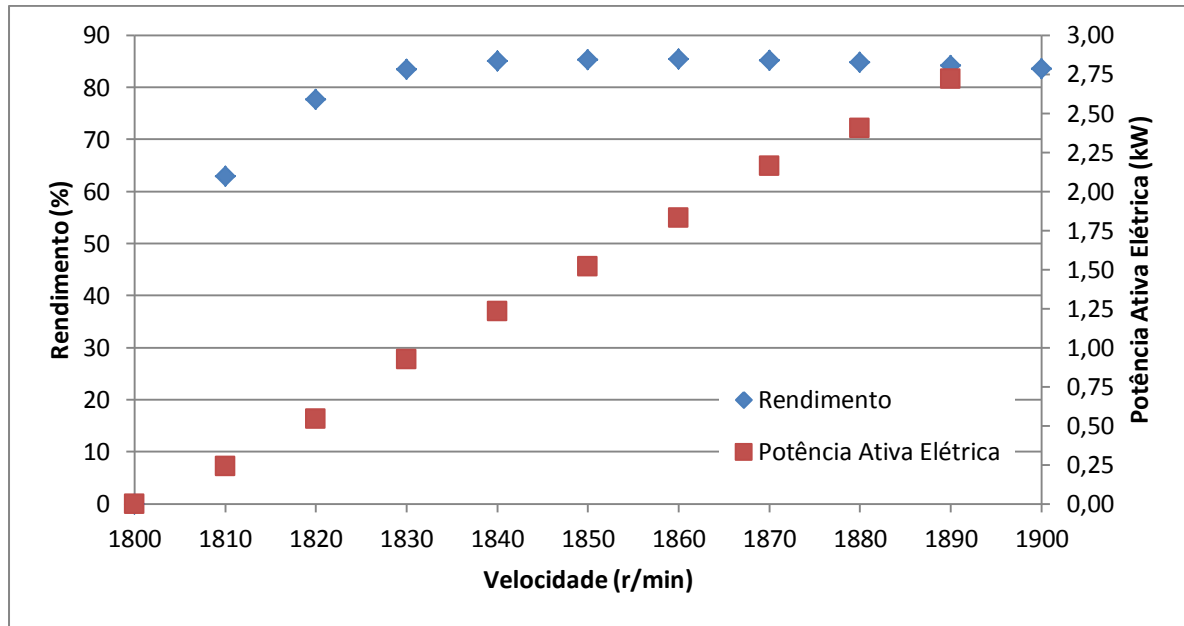


**Figura 69** Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade.



**Figura 70** Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade.





**Figura 71 Resultados numéricos do gerador de indução projetado operando interligado à rede – Rendimento e potência ativa versus velocidade.**

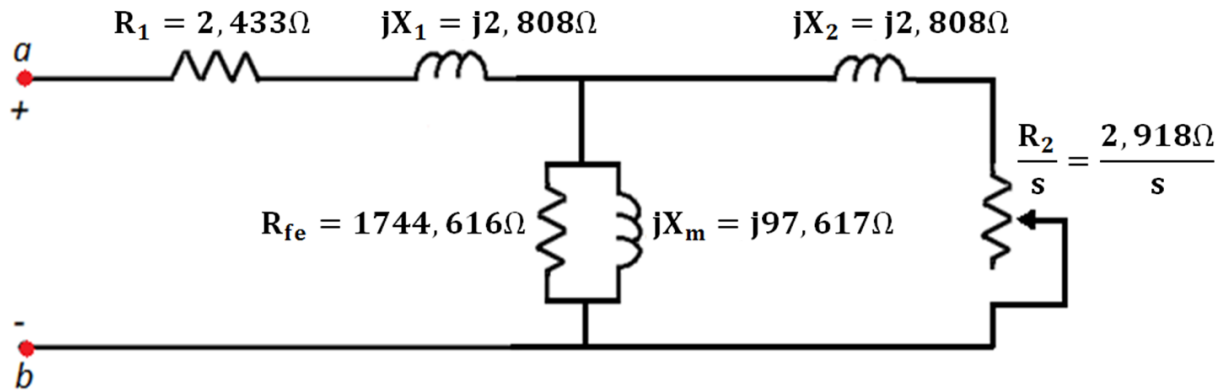
As Figuras 68, 69, 70 e 71 mostram os gráficos dos resultados numéricos de conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento para o gerador de indução projetado. No ponto de operação referente ao valor de velocidade de 1890 r/min, próximo à condição de corrente nominal, foram obtidos os valores de 0,84 e 81,88% para fator de potência e rendimento, respectivamente. Logo, estes resultados demonstram que as diretrizes de projeto sucederam uma máquina de indução em concordância com os objetivos propostos apresentados na Tabela 1.

#### **4.2 RESULTADOS ANALÍTICOS ADQUIRIDOS A PARTIR DO CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO**

A modelagem analítica do gerador de indução projetado tem como objetivo, primeiramente, conhecer os parâmetros concentrados do circuito equivalente monofásico. Logo, necessita-se realizar os ensaios de rotina igualmente efetuados para a máquina de

indução original. A fim de evitar a descrição do mesmo procedimento de cálculos, os resultados dos ensaios de rotina para o gerador de indução encontram-se no apêndice A.

O circuito equivalente monofásico resultante do gerador de indução utilizado para a modelagem analítica é mostrado na Figura 72.

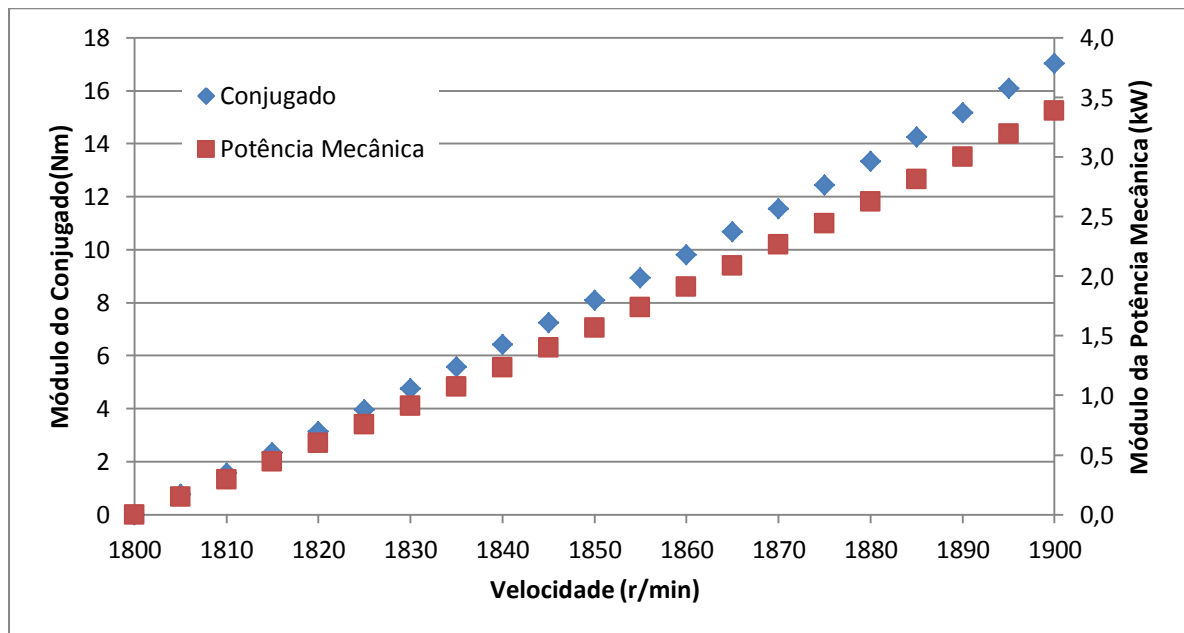


**Figura 72 Circuito equivalente do gerador de indução projetado.**

A Tabela 29 apresenta os resultados considerando o circuito equivalente monofásico definido na Figura 72. A tensão considerada nos cálculos foi de 220 V e o intervalo de velocidades foi o compreendido entre os valores de 1800 rpm ( $s=0$ ) até 1900rpm ( $s= -5,56\%$ ). As Figuras 73, 74, 75 e 76 fornecem uma visão do comportamento teórico analítico da máquina. As grandezas apresentadas são conjugado, potência mecânica, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento todas em relação à velocidade.

**Tabela 29** Resultados analíticos do gerador de indução projetado operando interligado à rede. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.

$s$	$n(\text{r/min})$	$T(\text{Nm})$	$P_{\text{mec}}(\text{kW})$	$I_{\text{fase}}(\text{A})$	$FP$	$P(\text{kW})$	$Q(\text{kVAr})$	$\eta$ (%)
0,0000	1800	0,00	0,000	2,19	0,00	0,000	1,441	0,00
-0,0028	1805	0,78	0,147	2,19	0,01	0,017	1,448	7,45
-0,0056	1810	1,56	0,295	2,22	0,10	0,148	1,456	39,28
-0,0083	1815	2,35	0,446	2,26	0,19	0,279	1,465	52,88
-0,0111	1820	3,15	0,599	2,32	0,27	0,411	1,476	60,27
-0,0139	1825	3,95	0,755	2,40	0,34	0,543	1,489	64,82
-0,0167	1830	4,76	0,913	2,50	0,41	0,675	1,503	67,82
-0,0194	1835	5,58	1,073	2,61	0,47	0,808	1,518	69,89
-0,0222	1840	6,41	1,235	2,73	0,52	0,941	1,535	71,35
-0,0250	1845	7,25	1,400	2,86	0,57	1,075	1,553	72,39
-0,0278	1850	8,09	1,567	3,01	0,61	1,209	1,573	73,13
-0,0306	1855	8,94	1,737	3,16	0,64	1,343	1,595	73,65
-0,0333	1860	9,80	1,910	3,32	0,67	1,478	1,618	74,00
-0,0361	1865	10,67	2,085	3,49	0,70	1,612	1,643	74,21
-0,0389	1870	11,55	2,262	3,66	0,72	1,747	1,669	74,31
-0,0417	1875	12,44	2,443	3,84	0,74	1,882	1,697	74,33
-0,0444	1880	13,34	2,626	4,02	0,76	2,018	1,727	74,28
-0,0472	1885	14,25	2,812	4,21	0,77	2,153	1,758	74,16
-0,0500	1890	15,16	3,001	4,40	0,79	2,289	1,791	73,99
-0,0528	1895	16,09	3,193	4,60	0,80	2,424	1,826	73,78
-0,0556	1900	17,03	3,388	4,80	0,81	2,560	1,862	73,53



**Figura 73** Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Conjugado e potência mecânica versus velocidade.

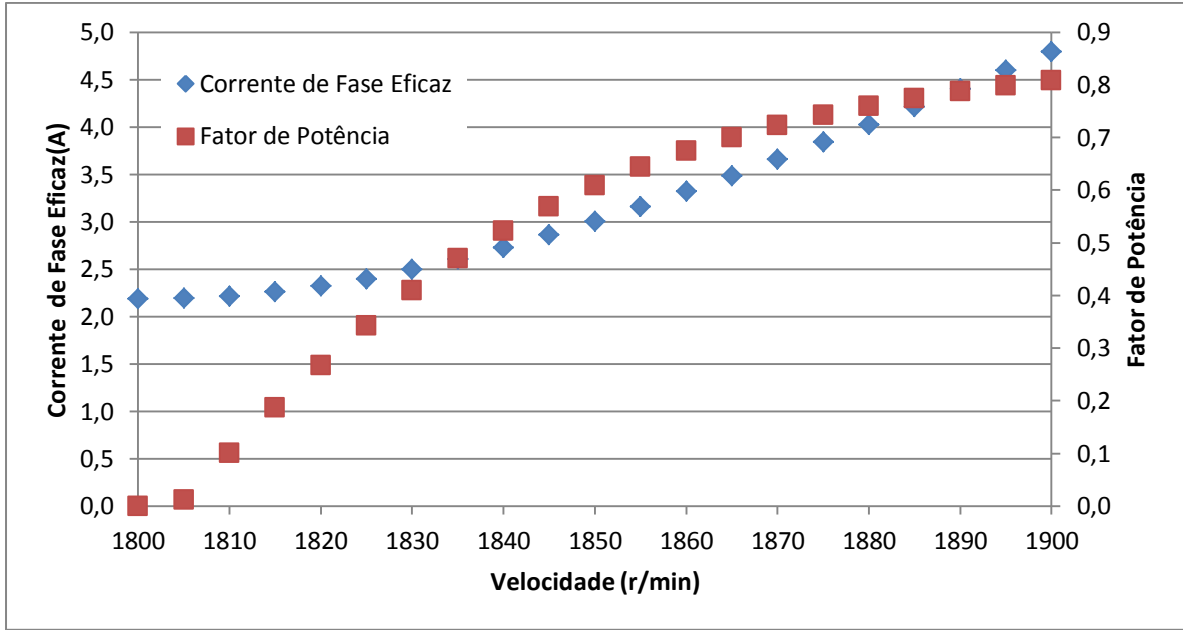


Figura 74 Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade.

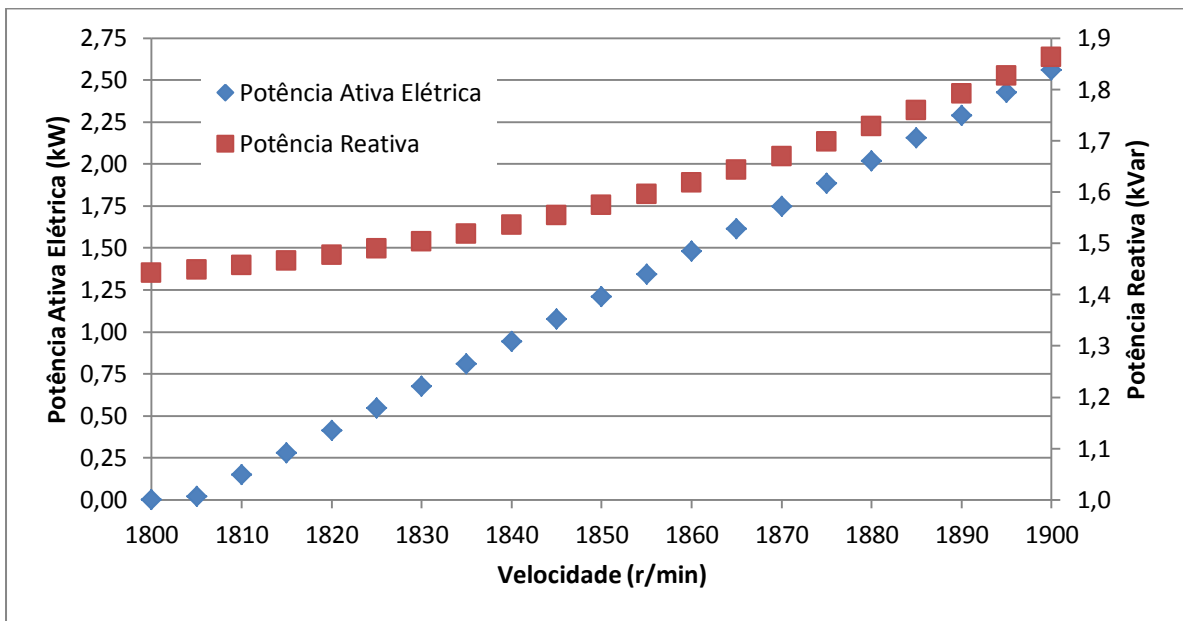
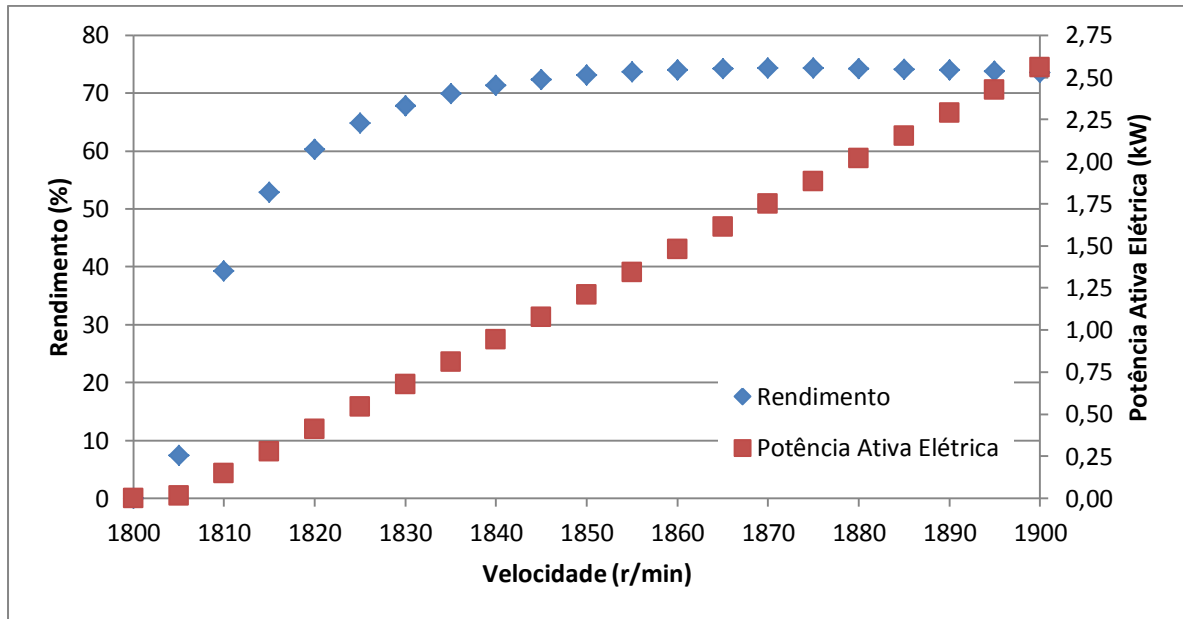


Figura 75 Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Potência ativa e potência reativa versus velocidade.



**Figura 76 Resultados analíticos do gerador de indução projetado – Rendimento e potência ativa versus velocidade.**

As Figuras 77, 78, 79 e 80 mostram os gráficos dos resultados analíticos de conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento, respectivamente, para o gerador de indução projetado. No ponto de operação referente ao valor de velocidade de 1890 r/min, próximo à condição de corrente nominal, foram obtidos os valores de 0,79 e 73,99% para fator de potência e rendimento, respectivamente. A discussão sobre a diferença dos resultados analíticos e numéricos da máquina de indução original operando como gerador e do gerador de indução projetado encontra-se na seção 4.3.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

A partir da análise dos modelos analítico e numérico, comparam-se graficamente os resultados obtidos da máquina e indução original operando como gerador e do gerador de indução projetado, visando mostrar a diferença das grandezas envolvidas para operação em regime permanente interligada à rede de distribuição das máquinas em questão. A Tabela 30

mostra os parâmetros obtidos do circuito equivalente monofásico pelos resultados dos ensaios de rotina.

**Tabela 30 Parâmetros do circuito equivalente monofásico da máquina de indução original e do protótipo do gerador de indução.**

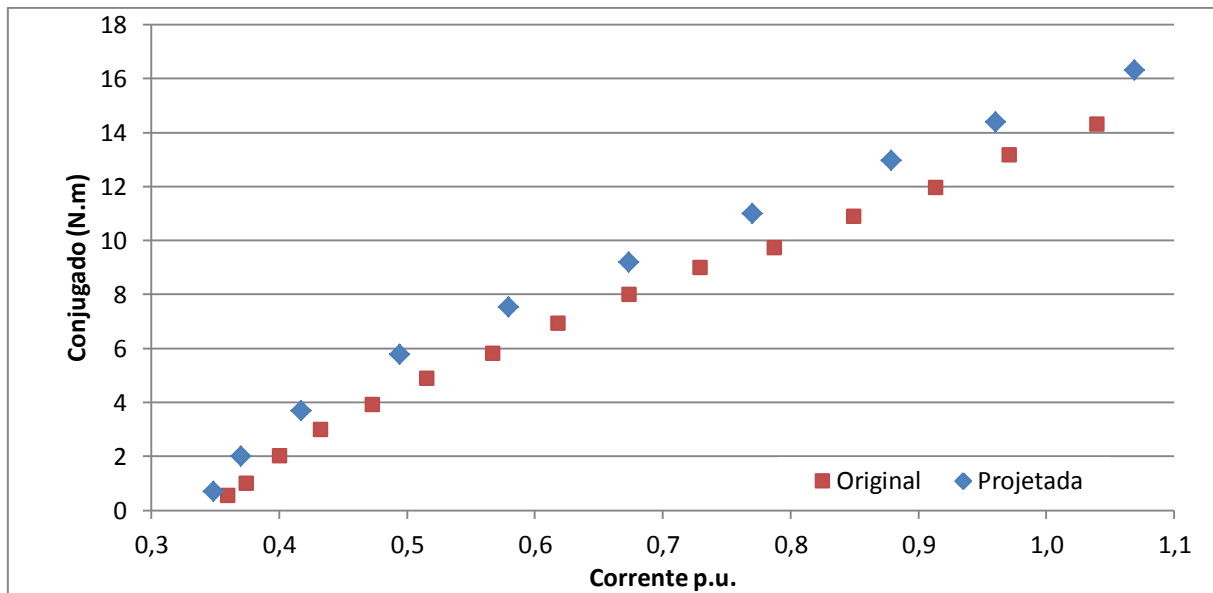
Parâmetros do circuito equivalente monofásico	Máquina de indução original	Protótipo do gerador de indução
$R_1(\Omega)$	2,433	2,433
$jX_1(\Omega)$	3,530	2,808
$R_2(\Omega)$	2,344	2,918
$jX_2(\Omega)$	3,530	2,808
$R_{fe}(\Omega)$	1498,978	1744,616
$jX_m(\Omega)$	99,000	97,617

A comparação dos parâmetros do circuito equivalente monofásico das máquinas em questão mostra uma diminuição dos valores referentes às indutâncias de dispersão do estator ( $jX_1$ ) e do rotor ( $jX_2$ ) do gerador de indução projetado em relação à máquina de indução original operando como gerador. Isto resulta no aumento da porcentagem do fluxo útil produzido que atravessa o entreferro concatenando os enrolamentos do estator e do rotor. Evidenciando-se, assim, o aumento do valor de fator de potência, ainda que se notasse uma pequena diminuição do valor relacionado com a indutância de magnetização ( $jX_m$ ) do núcleo do gerador de indução projetado, promovendo um aumento do valor da corrente de magnetização.

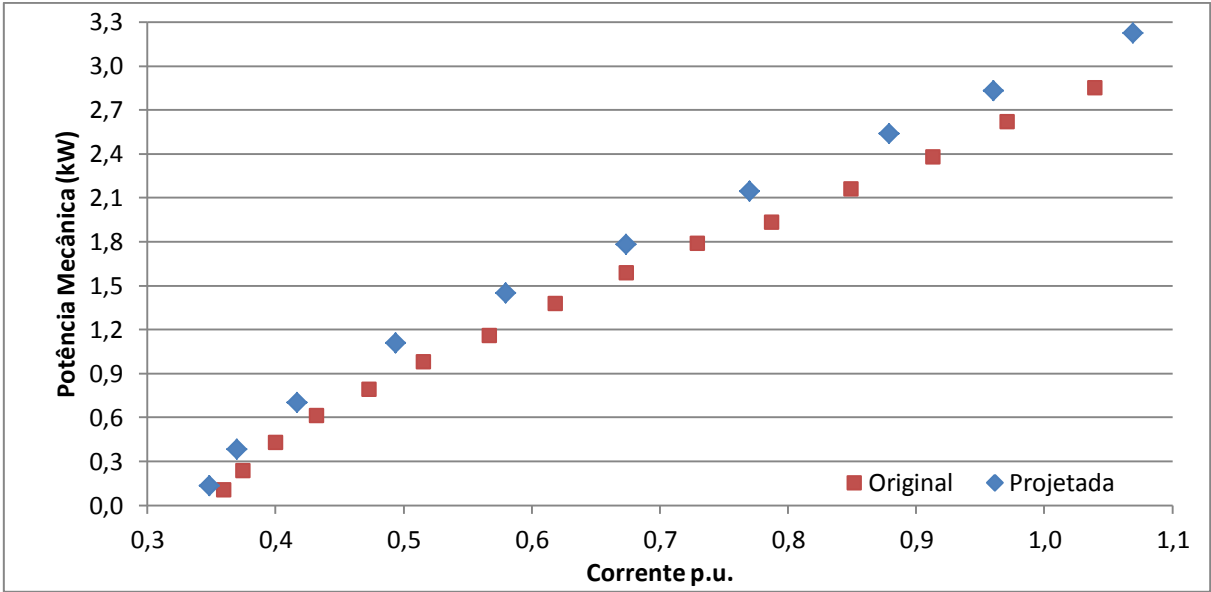
Também, observa-se o aumento do valor da resistência referida ao rotor gaiola de esquilo do gerador de indução projetado em relação à máquina de indução original. Este fato é resultante da diminuição da área da seção da ranhura, conforme mostrado na Tabela 24, corroborando com o aumento do valor do escorregamento nominal do gerador de indução projetado. Por fim, os valores das resistências referentes às perdas do núcleo magnético ( $R_{fe}$ ) são bastante elevados em comparação com os valores dos outros parâmetros, como esperado,

embora, apresenta-se um valor maior associado ao gerador de indução projetado, apontando para um valor menor de perdas relacionadas ao núcleo ferromagnético.

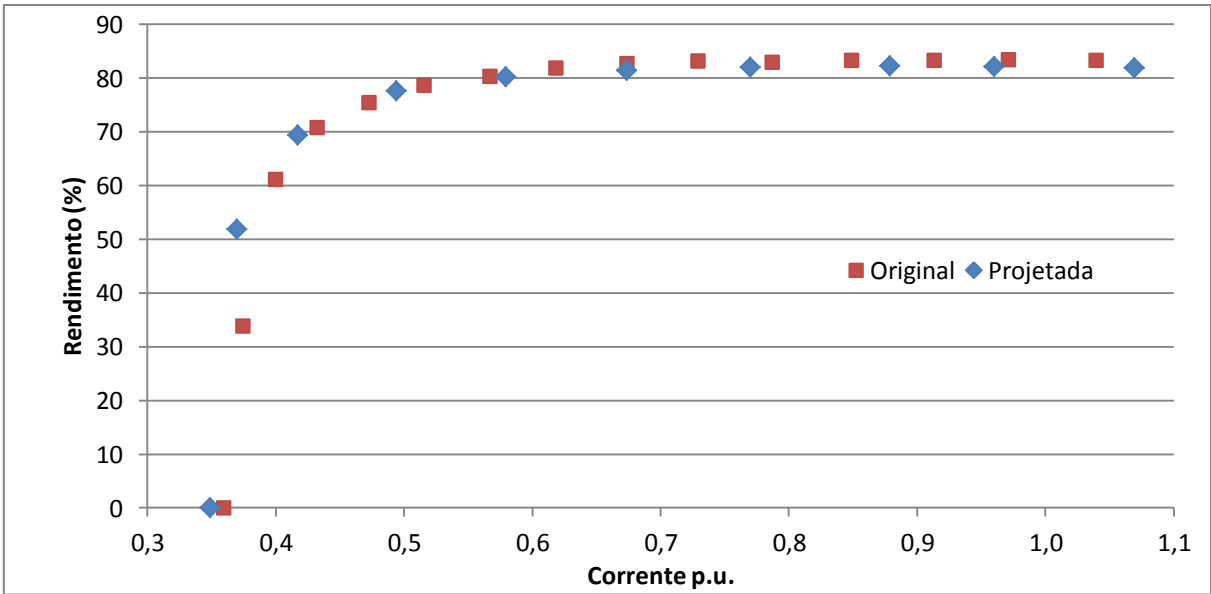
Em relação aos resultados numéricos da máquina e indução original operando como gerador e do gerador de indução projetado, as Figuras 77, 78, 79, 80, 81, 82 e 83 mostram a comparação gráfica entre os valores de conjugado, potência mecânica, rendimento, fator de potência, potência ativa, potência reativa e corrente, respectivamente. Para facilitar, as grandezas analisadas estão em função dos valores de corrente por unidade (p.u.).



**Figura 77 Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Conjugado versus corrente.**

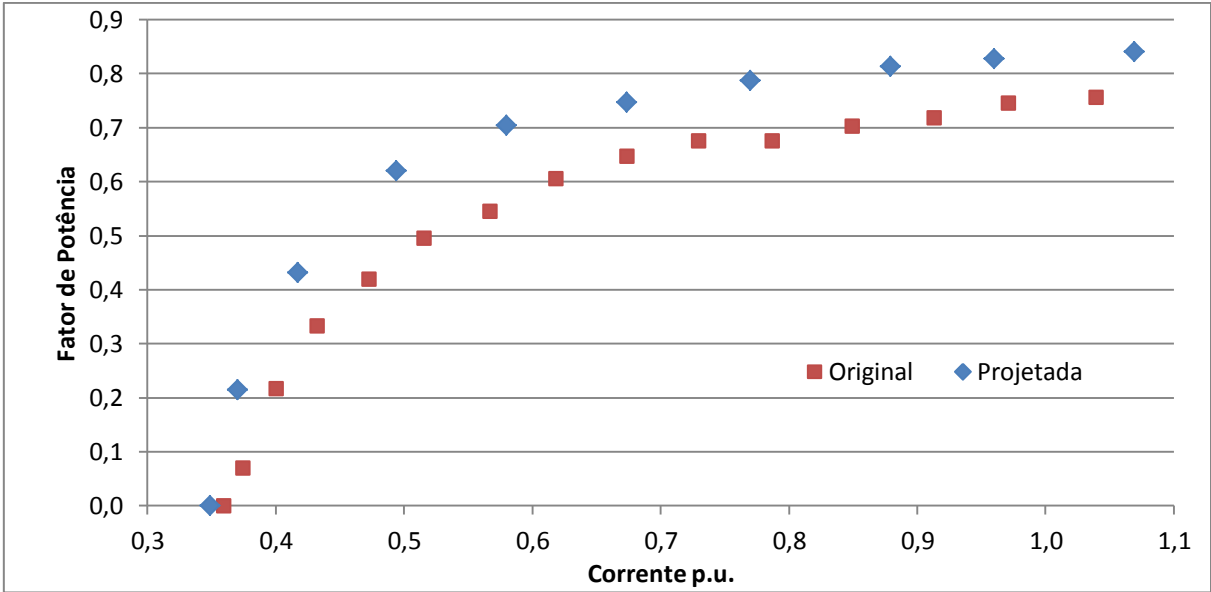


**Figura 78** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência mecânica versus corrente.

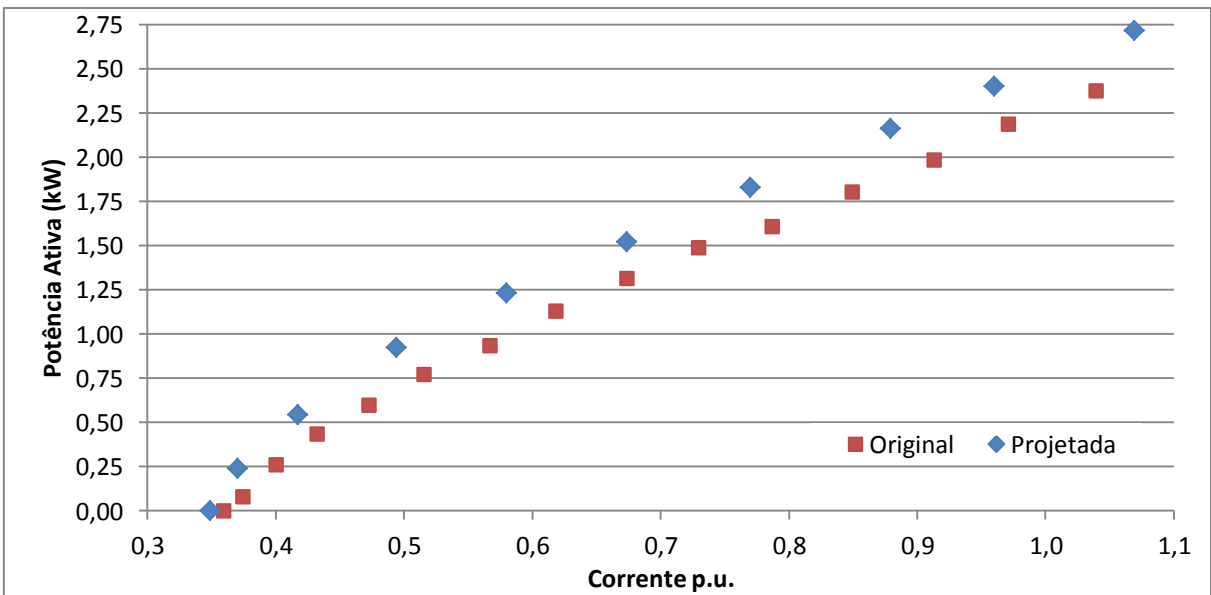


**Figura 79** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Rendimento versus corrente.

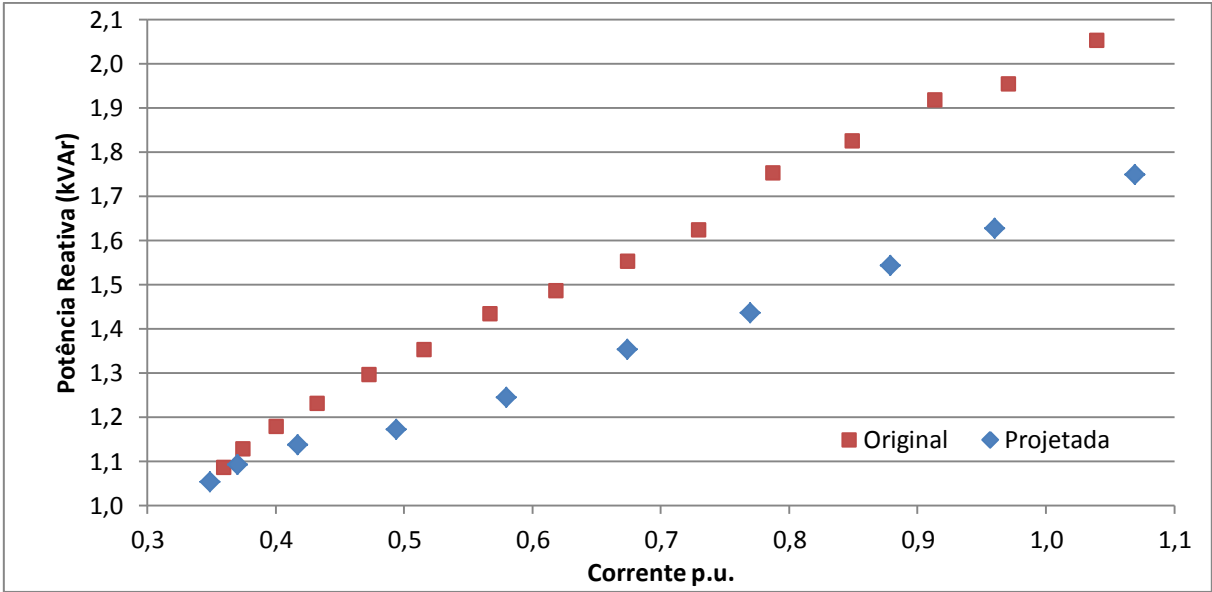




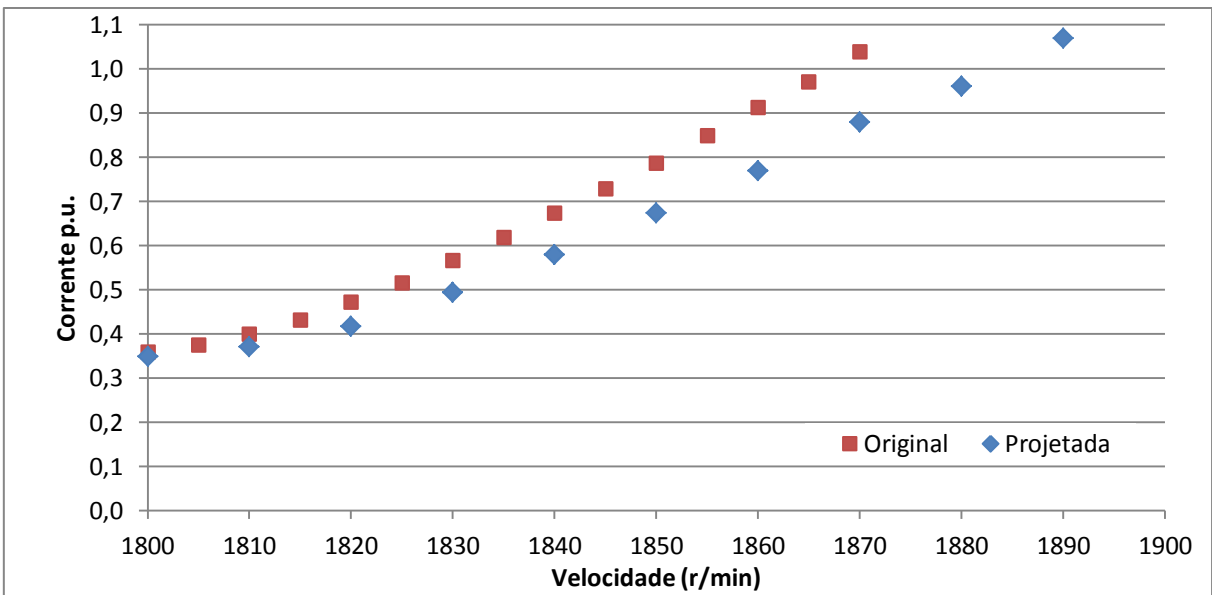
**Figura 80** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Fator de potência versus corrente.



**Figura 81** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência ativa versus corrente.



**Figura 82** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência reativa versus corrente.



**Figura 83** Resultados numéricos da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Corrente versus velocidade.

Os resultados numéricos obtidos por simulação de elementos finitos mostram valores de 0,76 e 83,34% de fator de potência e rendimento, respectivamente, para o funcionamento da máquina original como gerador no ponto de operação próximo a corrente nominal na velocidade sobre síncrona de 1870r/min. Para a máquina de indução projetada como gerador,

os valores nominais de 0,84 e 81,88% de fator de potência e rendimento, respectivamente, foram obtidos no ponto de operação próximo a corrente nominal na velocidade sobre síncrona de 1890r/min. Logo, os resultados numéricos mostram um aumento do valor do fator de potência de 10,52% e uma diminuição de 1,75% do rendimento quando comparado o funcionamento próximo a corrente nominal da máquina original como gerador com a máquina de indução projetada como gerador. Assim, justifica-se a implementação do protótipo do gerador de indução projetado.

## 5 ENSAIOS

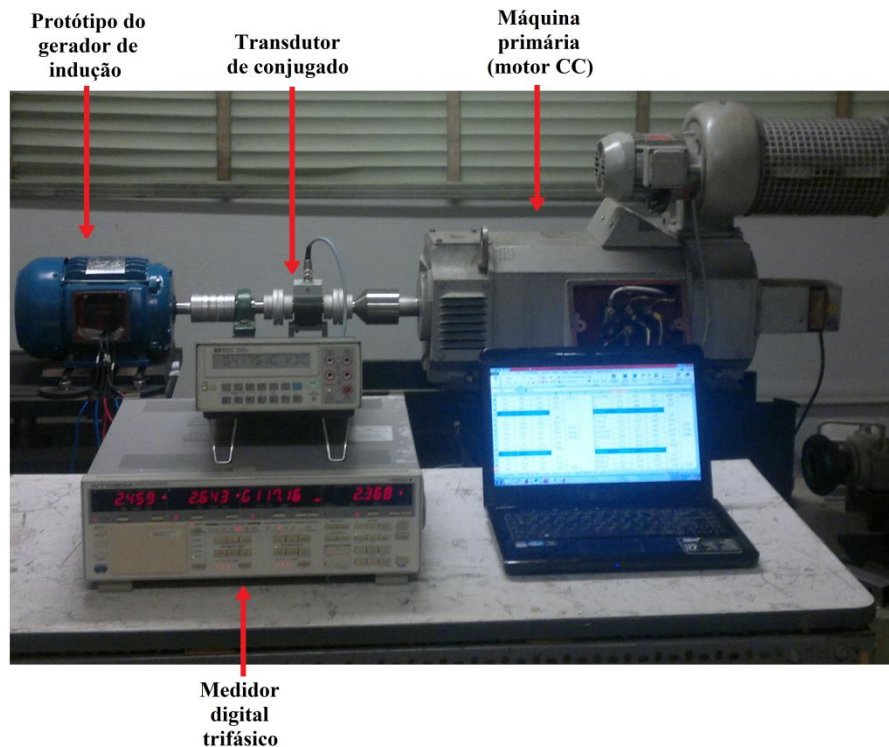
Os ensaios foram realizados numa bancada com o auxílio de uma máquina CC funcionando como máquina primária. Um conversor aciona e alimenta os enrolamentos de campo e armadura, proporcionando o controle de velocidade desta máquina. As Tabelas 31 e 32 mostram os dados da máquina e do conversor, respectivamente. A Figura 84 mostra o momento durante a aquisição de dados nos ensaios de campo.

**Tabela 31 Dados do motor CC utilizado como máquina primária.**

Máquina Primária - Motor CC	
Potência (kW)	10 kW
Velocidade Máxima (r/min)	3600 rpm
Armadura (Tensão/Corrente)	150 V/66,7A
Campo (Tensão/Corrente)	150 V/4,46 A 12 V/0,6 A

**Tabela 32 Dados do conversor CA/CC para acionamento da máquina CC.**

Conversor CA/CC – WEG CTW 03	
Alimentação	120 Vca
Saída	0...260 Vcc/90 A



**Figura 84 Realização dos ensaios campo.**

### 5.1 ENSAIOS DE MEDIÇÕES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS E POTÊNCIAS TRIFÁSICAS

As medições de potência foram realizadas com o wattímetro WT1030, obtendo os valores para cada um dos três elementos (fases) e, também, calculando a média aritmética. As incertezas das medições realizadas encontram-se no apêndice C. A Figura 85 ilustra os bornes de conexão dos amperímetros e voltímetros. Assim, utilizou-se uma topologia das ligações dos elementos do wattímetro para a análise das correntes e das potências internamente na ligação delta do gerador. O objetivo concentra-se em medir os valores das grandezas em cada bobina do gerador individualmente, quando conectado paralelamente à rede de distribuição. Desta forma, pode-se analisar o comportamento e a influência das correntes monofásicas na composição da corrente de linha gerada, bem como o desequilíbrio das tensões da rede.

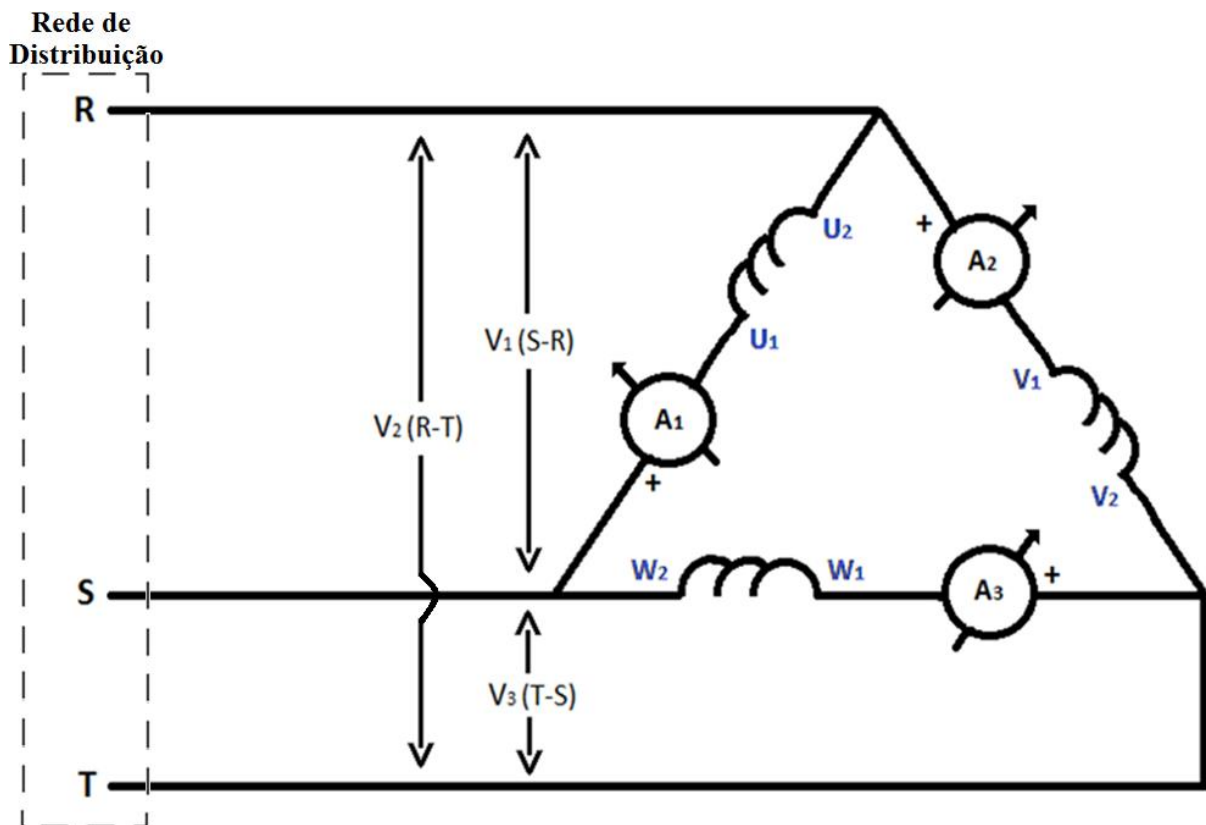


Figura 85 Layout dos elementos do wattímetro para medições internas na ligação delta.

As Tabelas 33 e 34 apresentam os valores de tensão de linha, corrente de fase, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência adquiridos para a máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução, respectivamente. As Figuras 86 e 87 mostram os resultados da corrente de fase, fator de potência, potência ativa e potência reativa da máquina de indução original operando como gerador e as Figuras 88 e 89 mostram os resultados das mesmas grandezas para o protótipo do gerador de indução.

**Tabela 33 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Tensão de fase eficaz, corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

$s$	$n(\text{r/min})$	$V_{\text{linha}}(\text{V})$	$I(\text{p.u.})$	$I_{\text{fase}}(\text{A})$	$P(\text{kW})$	$Q(\text{kVAr})$	$S(\text{kVA})$	$FP$
0,0000	1800	212,93	0,426	1,99	0,067	1,271	1,273	0,05
-0,0028	1805	212,79	0,436	2,04	0,130	1,296	1,303	0,10
-0,0056	1810	212,75	0,460	2,15	0,326	1,332	1,373	0,24
-0,0083	1815	213,03	0,482	2,25	0,459	1,365	1,474	0,32
-0,0111	1820	213,55	0,524	2,45	0,638	1,414	1,553	0,41
-0,0139	1825	213,97	0,550	2,57	0,781	1,453	1,651	0,47
-0,0167	1830	213,98	0,595	2,78	0,968	1,501	1,787	0,54
-0,0194	1835	214,29	0,654	3,06	1,187	1,532	1,965	0,60
-0,0222	1840	214,40	0,699	3,27	1,351	1,613	2,104	0,64
-0,0250	1845	214,49	0,755	3,53	1,538	1,664	2,272	0,68
-0,0278	1850	214,49	0,806	3,77	1,707	1,723	2,427	0,70
-0,0306	1855	214,29	0,853	3,99	1,856	1,769	2,565	0,72
-0,0333	1860	214,33	0,917	4,29	2,055	1,869	2,756	0,75
-0,0361	1865	214,36	0,987	4,61	2,265	1,916	2,968	0,76
<b>-0,0389</b>	<b>1870</b>	<b>214,13</b>	<b>1,044</b>	<b>4,88</b>	<b>2,433</b>	<b>1,976</b>	<b>3,135</b>	<b>0,77</b>

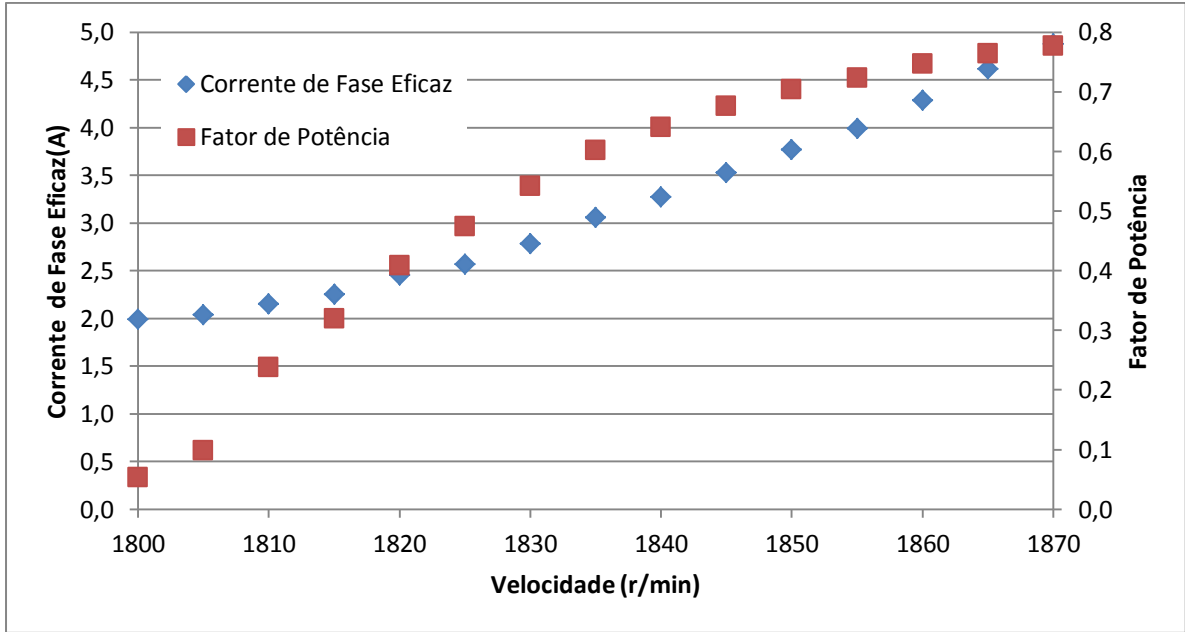


Figura 86 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade.

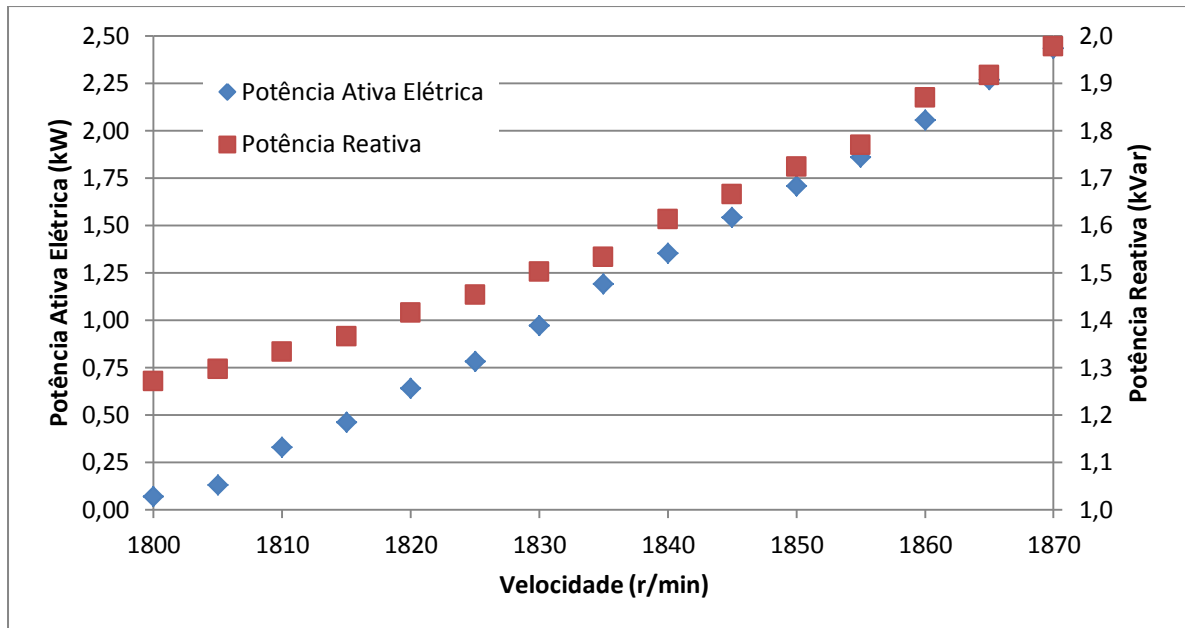
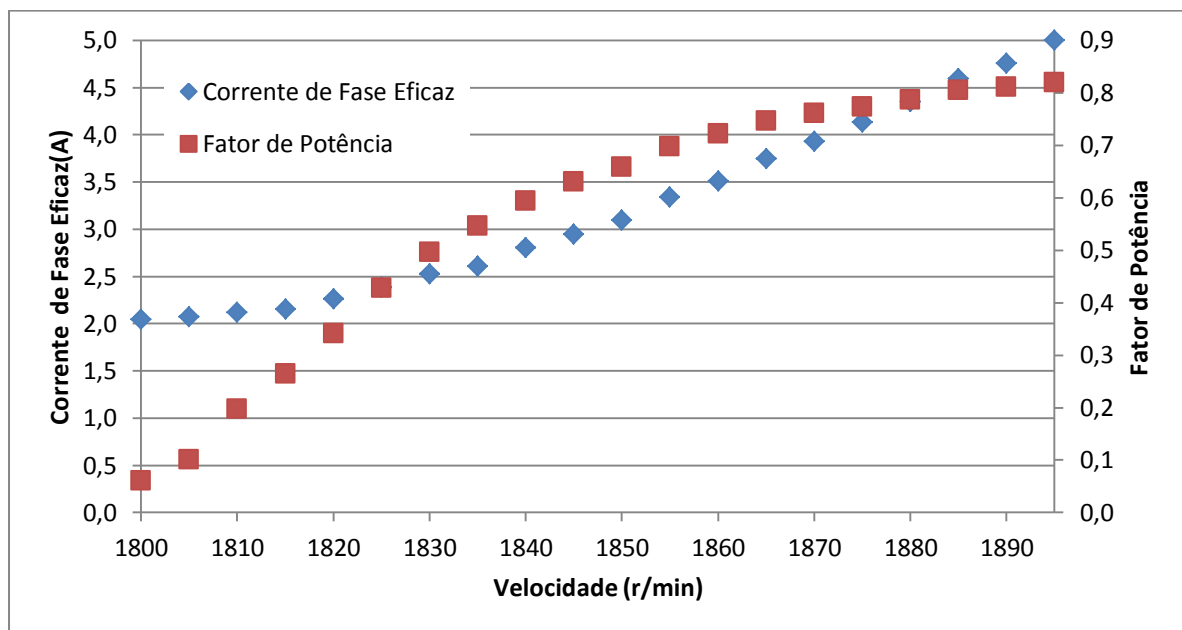


Figura 87 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência ativa e potência reativa versus velocidade.

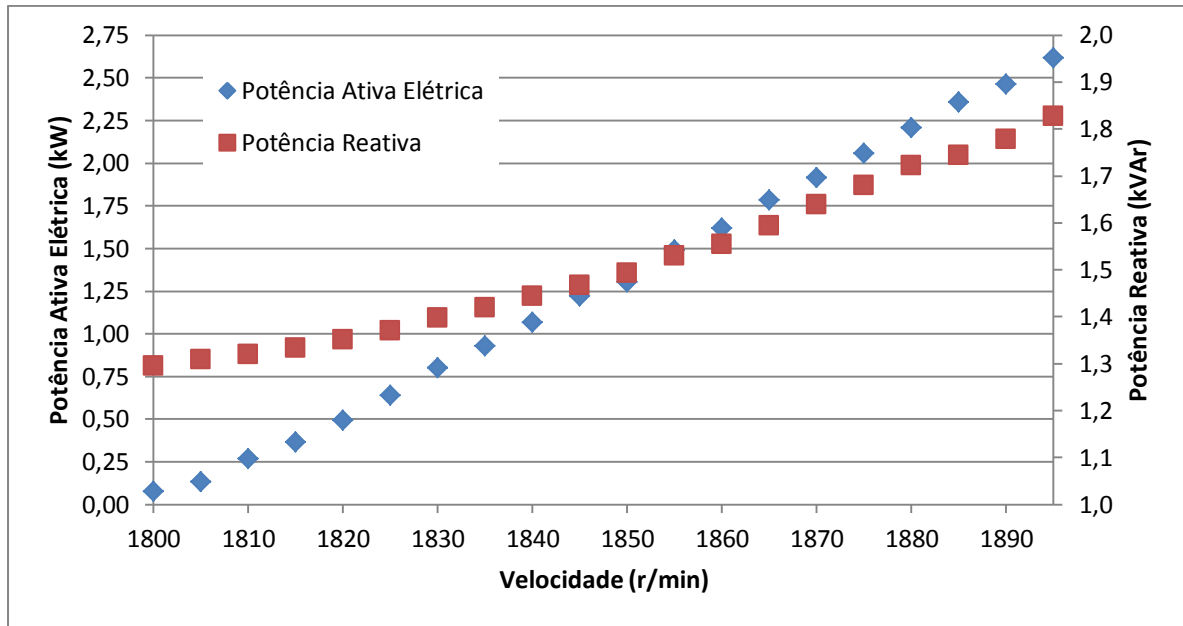
**Tabela 34 Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Tensão de fase eficaz, corrente de fase eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

$s$	$n(\text{r/min})$	$V_{\text{linha}}(\text{V})$	$I(\text{p.u.})$	$I_{\text{fase}}(\text{A})$	$P(\text{kW})$	$Q(\text{kVAr})$	$S(\text{kVA})$	$FP$
0,0000	1800	212,25	0,437	2,04	0,078	1,296	1,299	0,06
-0,0028	1805	212,15	0,443	2,07	0,134	1,310	1,318	0,10
-0,0056	1810	212,07	0,453	2,12	0,267	1,320	1,348	0,20
-0,0083	1815	212,33	0,460	2,15	0,367	1,333	1,384	0,26
-0,0111	1820	212,53	0,483	2,26	0,492	1,351	1,439	0,34
-0,0139	1825	212,71	0,509	2,38	0,641	1,371	1,518	0,43
-0,0167	1830	212,99	0,539	2,52	0,800	1,397	1,611	0,50
-0,0194	1835	213,23	0,558	2,61	0,928	1,419	1,696	0,55
-0,0222	1840	213,58	0,599	2,80	1,069	1,445	1,798	0,59
-0,0250	1845	213,69	0,630	2,95	1,221	1,468	1,889	0,63
-0,0278	1850	213,93	0,661	3,09	1,305	1,494	1,985	0,66
-0,0306	1855	213,80	0,713	3,34	1,490	1,531	2,137	0,70
-0,0333	1860	213,56	0,750	3,51	1,622	1,555	2,248	0,72
-0,0361	1865	213,89	0,800	3,74	1,786	1,595	2,400	0,75
-0,0389	1870	214,37	0,839	3,93	1,917	1,639	2,463	0,76
-0,0417	1875	214,60	0,883	4,13	2,057	1,680	2,660	0,77
-0,0444	1880	214,63	0,930	4,35	2,207	1,723	2,801	0,79
-0,0472	1885	213,11	0,981	4,59	2,358	1,744	2,934	0,80
-0,0500	1890	213,21	1,016	4,75	2,464	1,779	3,040	0,82
-0,0528	1895	213,15	1,068	5,00	2,619	1,828	3,194	0,82



**Figura 88 Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Corrente de fase eficaz e fator de potência versus velocidade.**





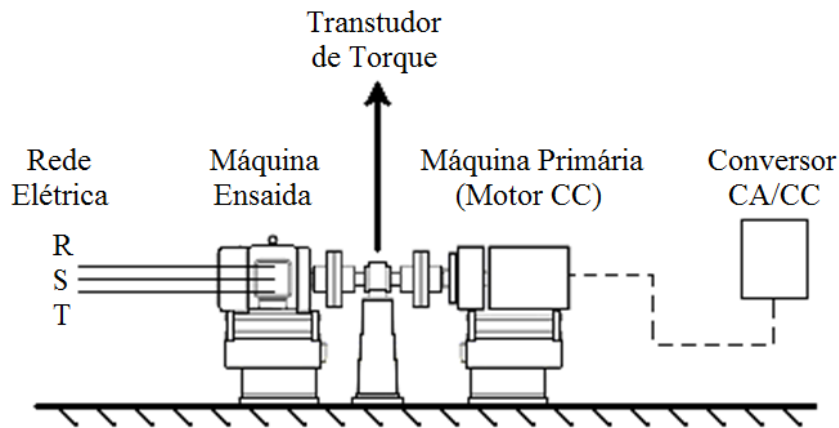
**Figura 89** Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Potência ativa e potência reativa versus velocidade.

As Figuras 88 e 89 mostram os gráficos dos resultados de corrente, fator de potência, potência ativa elétrica e potência reativa para o gerador de indução projetado. No ponto de operação referente ao valor de velocidade de 1890 r/min, próximo à condição de corrente nominal, foi obtido o valor de 0,82 para fator de potência. Observa-se que este valor é menor que o resultado esperado do modelo numérico do gerador de indução projetado para fator de potência (0,84), referente ao mesmo valor de velocidade de operação. Isto se deve, entre outras limitações, ao fato de que modelo numérico 2D desconsidera o fluxo disperso nas cabeceiras de bobina e nos anéis de curto circuito das barras do rotor.

## 5.2 ENSAIOS DE MEDIÇÕES DE CONJUGADO, POTÊNCIA MECÂNICA E RENDIMENTO

Para a medição de conjugado realizado durante os ensaios da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução conectado paralelamente à rede de distribuição, empregou-se o transdutor de torque modelo T22 do fabricante HBM. Conjuntamente, utilizou-se o multímetro modelo 3478a da marca HP para

medir o sinal de saída em tensão, sendo assim, este valor de tensão medido corresponde a um determinado valor de conjugado. Devido ao tensionamento mecânico produzido pela montagem e conexão do transdutor na bancada de ensaios, como mostra a Figura 90, existe um sinal de saída medido, quando a bancada esta imóvel, proporcional a essa força de tensão que compreende valores entre 1 Nm e 1,6 Nm. Assim, a faixa dos valores de conjugado medida apresentada a seguir leva em consideração este efeito. As Tabelas 35 e 36 apresentam os valores de conjugado, potência mecânica e rendimento da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução, respectivamente.

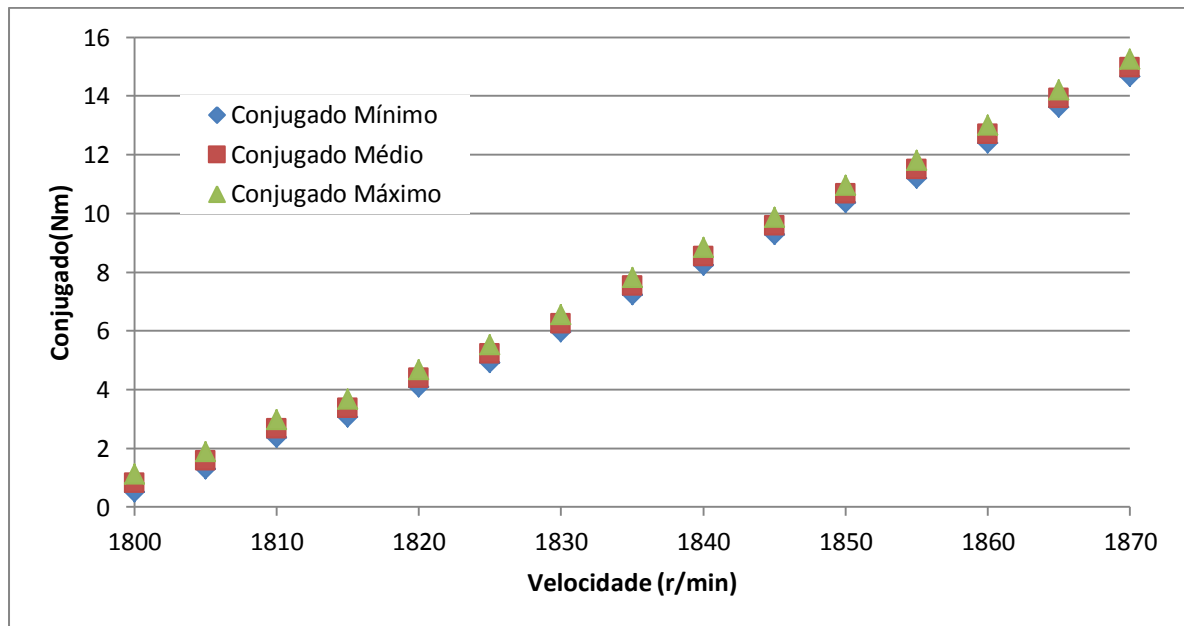


**Figura 90 Ilustração da bancada utilizada para medição de conjugado.**

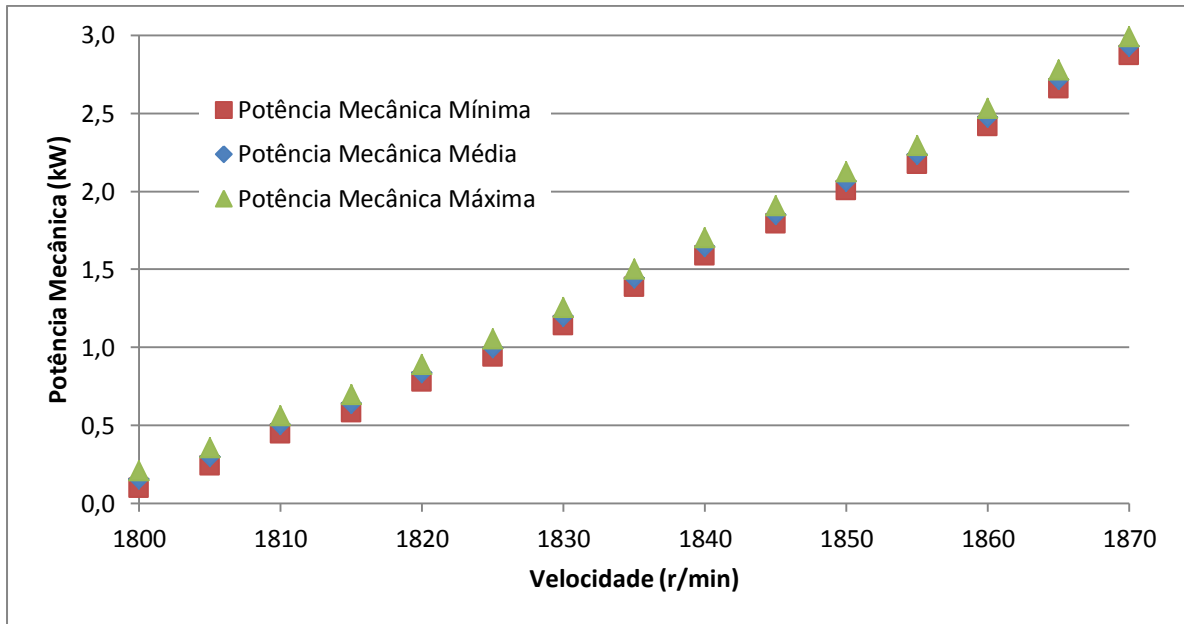
As Figuras 91, 92 e 93 mostram os resultados de conjugado, potência mecânica e rendimento da máquina de indução original operando como gerador, respectivamente, e as Figuras 94, 95 e 96 mostram os resultados das mesmas grandezas para o protótipo do gerador de indução.

**Tabela 35 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado, potência mecânica e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

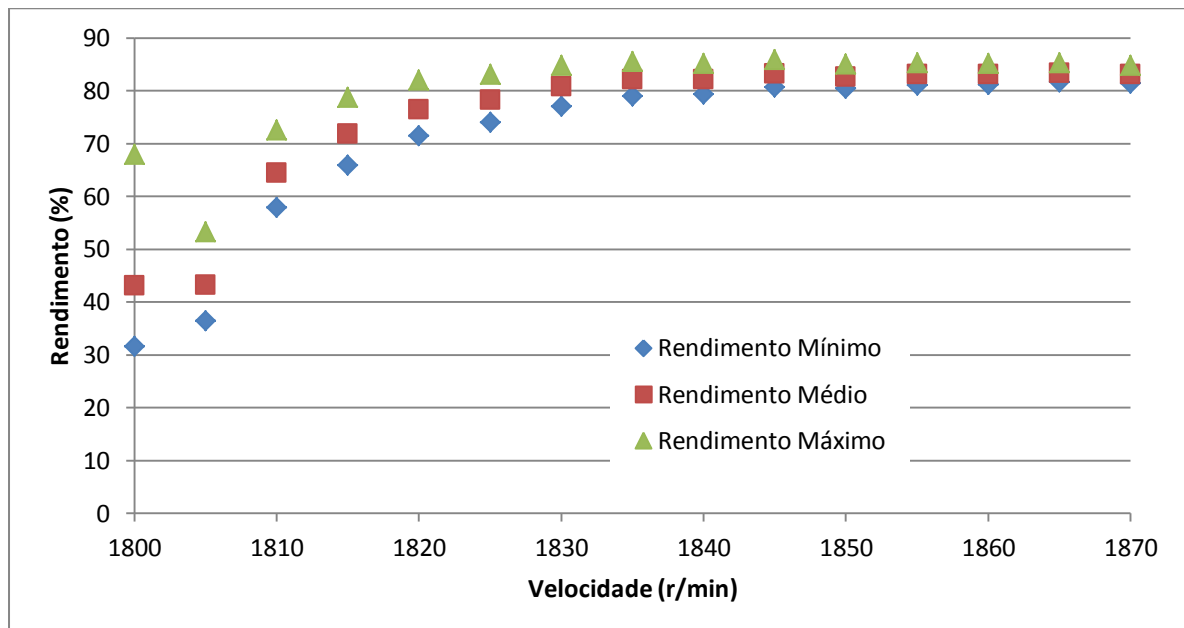
$n(\text{r/min})$	$T(\text{Nm})$			$P_{\text{mec}}(\text{kW})$			$\eta (\%)$		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
1800	0,52	0,82	1,12	0,098	0,155	0,211	31,53	43,07	67,91
1805	1,29	1,59	1,89	0,243	0,300	0,357	36,35	43,22	53,30
1810	2,37	2,67	2,97	0,449	0,506	0,563	57,89	64,40	72,55
1815	3,07	3,37	3,67	0,584	0,641	0,698	65,86	71,73	78,74
1820	4,08	4,38	4,68	0,778	0,835	0,893	71,46	76,35	81,96
1825	4,92	5,22	5,52	0,941	0,998	1,056	74,00	78,25	83,01
1830	5,96	6,26	6,56	1,142	1,199	1,257	77,04	80,73	84,80
1835	7,22	7,52	7,82	1,388	1,446	1,503	78,96	82,11	85,52
1840	8,23	8,53	8,83	1,586	1,644	1,702	79,35	82,14	85,13
1845	9,27	9,57	9,87	1,792	1,850	1,908	80,64	83,17	85,86
1850	10,36	10,66	10,96	2,008	2,066	2,124	80,37	82,63	85,02
1855	11,20	11,50	11,80	2,176	2,235	2,293	80,96	83,08	85,30
1860	12,40	12,70	13,00	2,415	2,473	2,531	81,16	83,08	85,09
1865	13,61	13,91	14,21	2,659	2,717	2,776	81,60	83,36	85,20
1870	14,66	14,96	15,26	2,871	2,930	2,989	81,40	83,04	84,73



**Figura 91 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Conjugado versus velocidade.**



**Figura 92 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Potência mecânica versus velocidade.**



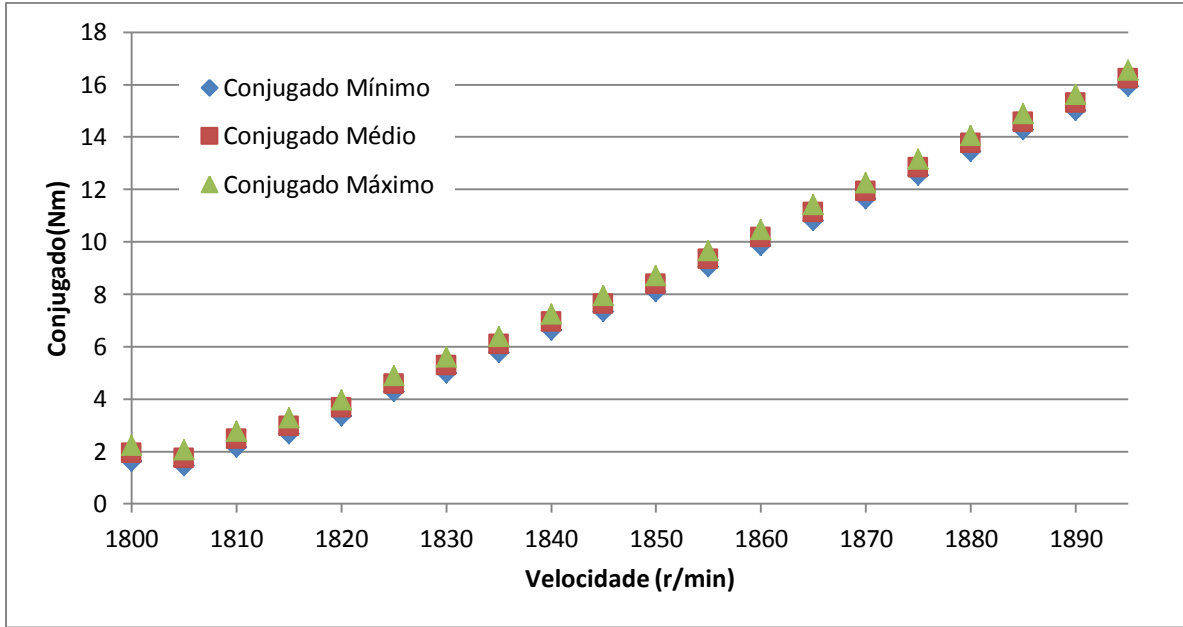
**Figura 93 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede – Rendimento versus velocidade.**

As Figuras 91, 92 e 93 mostram os gráficos dos resultados de conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida e rendimento, respectivamente, para a máquina de indução original. No ponto de operação referente ao valor de velocidade de 1870 r/min, próximo à condição de corrente nominal, a máquina de indução original apresenta rendimento

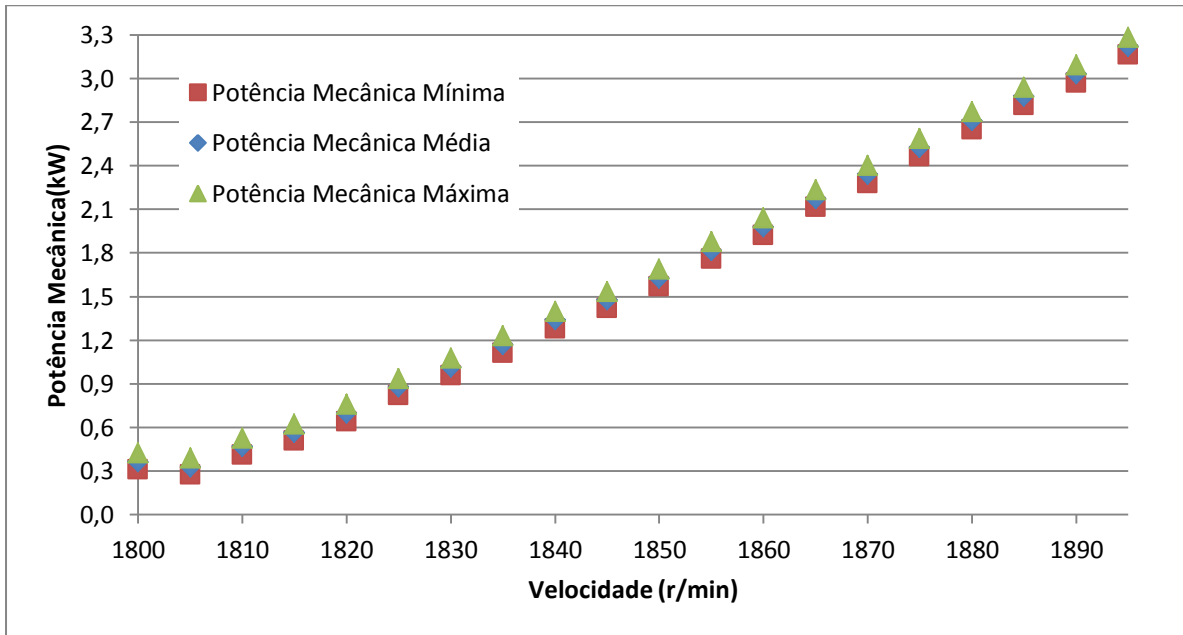
relacionado à faixa de valores entre 81,40% e 84,73%. Observa-se que o valor esperado de rendimento referente ao resultado do modelo numérico (83,34%) situa-se na faixa correspondente.

**Tabela 36 Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Conjugado, potência mecânica e rendimento. A linha destacada apresenta as grandezas na operação próxima à condição de corrente nominal.**

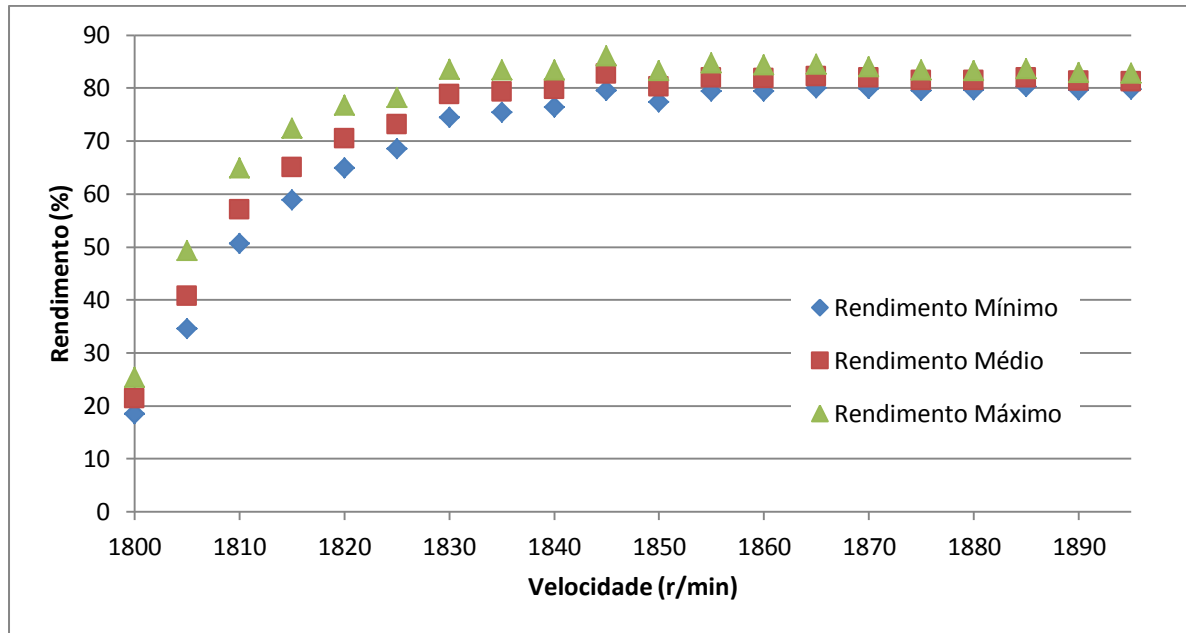
$n(\text{r/min})$	$T(\text{Nm})$			$P_{\text{mec}}(\text{kW})$			$\eta (\%)$		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
1800	1,63	1,93	2,24	0,308	0,364	0,423	18,48	21,44	25,38
1805	1,44	1,74	2,05	0,272	0,329	0,387	34,62	40,79	49,29
1810	2,17	2,47	2,78	0,411	0,468	0,527	50,73	57,10	65,00
1815	2,67	2,97	3,28	0,507	0,564	0,623	58,92	65,07	72,38
1820	3,37	3,67	3,98	0,642	0,699	0,758	64,97	70,47	76,74
1825	4,28	4,58	4,89	0,819	0,876	0,935	68,51	73,14	78,27
1830	5,00	5,30	5,61	0,958	1,015	1,074	74,46	78,81	83,55
1835	5,78	6,08	6,39	1,111	1,169	1,229	75,51	79,36	83,48
1840	6,64	6,94	7,25	1,280	1,338	1,398	76,46	79,87	83,48
1845	7,33	7,63	7,94	1,417	1,475	1,535	79,54	82,77	86,16
1850	8,09	8,39	8,70	1,567	1,625	1,685	77,43	80,29	83,26
1855	9,05	9,35	9,66	1,758	1,816	1,877	79,41	82,05	84,77
1860	9,86	10,16	10,47	1,921	1,980	2,040	79,49	81,91	84,40
1865	10,82	11,12	11,43	2,113	2,171	2,232	80,05	82,28	84,56
1870	11,64	11,94	12,25	2,279	2,338	2,399	79,91	81,99	84,10
1875	12,55	12,85	13,16	2,464	2,523	2,584	79,60	81,52	83,47
1880	13,46	13,76	14,07	2,649	2,708	2,769	79,70	81,49	83,31
1885	14,27	14,57	14,88	2,817	2,876	2,937	80,27	81,98	83,70
1890	15,01	15,31	15,62	2,970	3,030	3,091	79,73	81,35	82,98
1895	15,93	16,23	16,54	3,162	3,221	3,283	79,79	81,31	82,84



**Figura 94** Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Conjugado versus velocidade.



**Figura 95** Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Potência mecânica versus velocidade.



**Figura 96 Resultados experimentais do gerador de indução projetado – Rendimento versus velocidade.**

As Figuras 94, 95 e 96 mostram os gráficos dos resultados de conjugado eletromagnético, potência mecânica líquida e rendimento, respectivamente, para o gerador de indução projetado. No ponto de operação referente ao valor de velocidade de 1890 r/min, próximo à condição de corrente nominal, o gerador de indução projetado apresenta rendimento relacionado à faixa de valores entre 81,40% e 84,73%. Observa-se que o valor esperado de rendimento referente ao resultado do modelo numérico (81,88%) situa-se na faixa correspondente.

### 5.3 ENSAIOS DE MEDIÇÕES DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO E CORRENTE

Conjuntamente com os ensaios experimentais em regime permanente, mediram-se as componentes harmônicas de tensão e corrente para a máquina de indução original operando como gerador e, também, para o protótipo do gerador de indução. As medidas foram adquiridas no ponto de operação nominal, ou seja, quando as máquinas encontravam-se no valor de velocidade sobressíncrona que estabelece o valor de corrente de fase nominal do

estator. Com o wattímetro WT1030, igualmente aos ensaios anteriores, executaram-se três medições trifásicas e realizou-se a média aritmética, sendo este valor adotado como medido.

Conforme a referência (ANEEL, 2014), o espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica. Assim, realizaram-se medidas até a 30ª ordem. Para fins de cálculo da distorção harmônica total de corrente e tensão, usou-se a Equação (82) e para o cálculo da distorção harmônica individual, utilizou-se a Equação (83).

$$TDH = \frac{100 \sqrt{\sum_{h=2}^{h=30} V_h^2}}{V_1} \quad (82)$$

$$TDH_h = \frac{100V_h}{V_1} \quad (83)$$

Onde,

$TDH$  – distorção harmônica total, [%];

$TDH_h$  – distorção harmônica individual, [%];

$V_h$  – componente harmônica de ordem  $h$ ;

$V_1$  – componente fundamental.

A Tabela 37 apresenta os resultados referentes à distorção harmônica total de tensão e corrente da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução no ponto de operação de corrente nominal. A Tabela 38 apresenta os resultados até a 30ª ordem da distorção harmônica individual de tensão e corrente da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução no ponto de operação



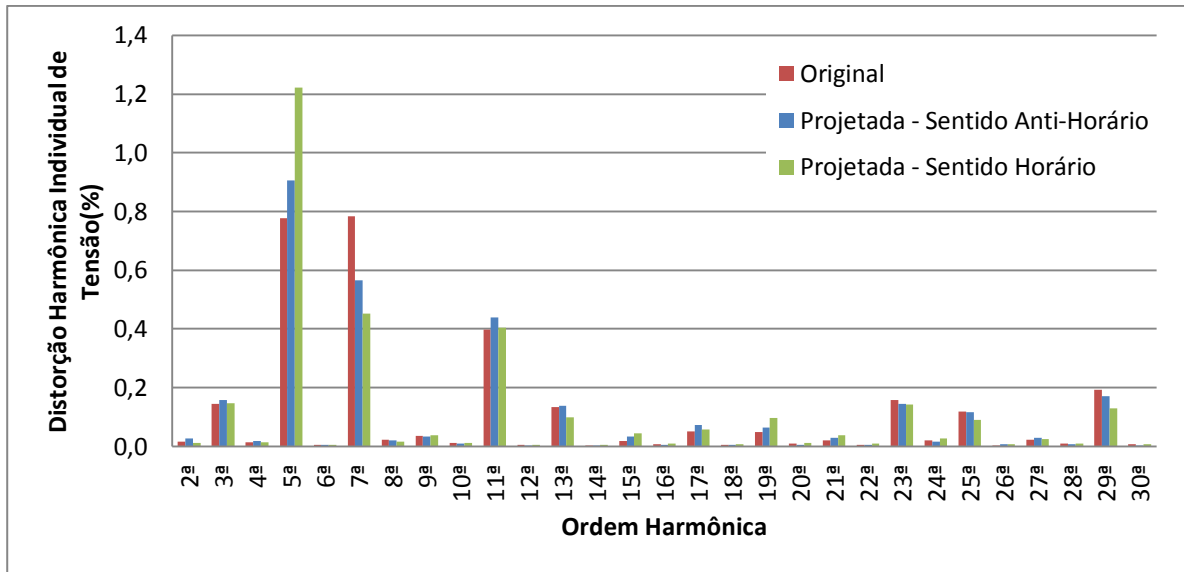
de corrente nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação. As Figuras 97 e 98 apresentam a comparação dos resultados para a taxa de distorção harmônica de tensão e corrente, respectivamente.

**Tabela 37 Resultados experimentais da distorção harmônica total de tensão e corrente da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução no ponto de operação de corrente nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação.**

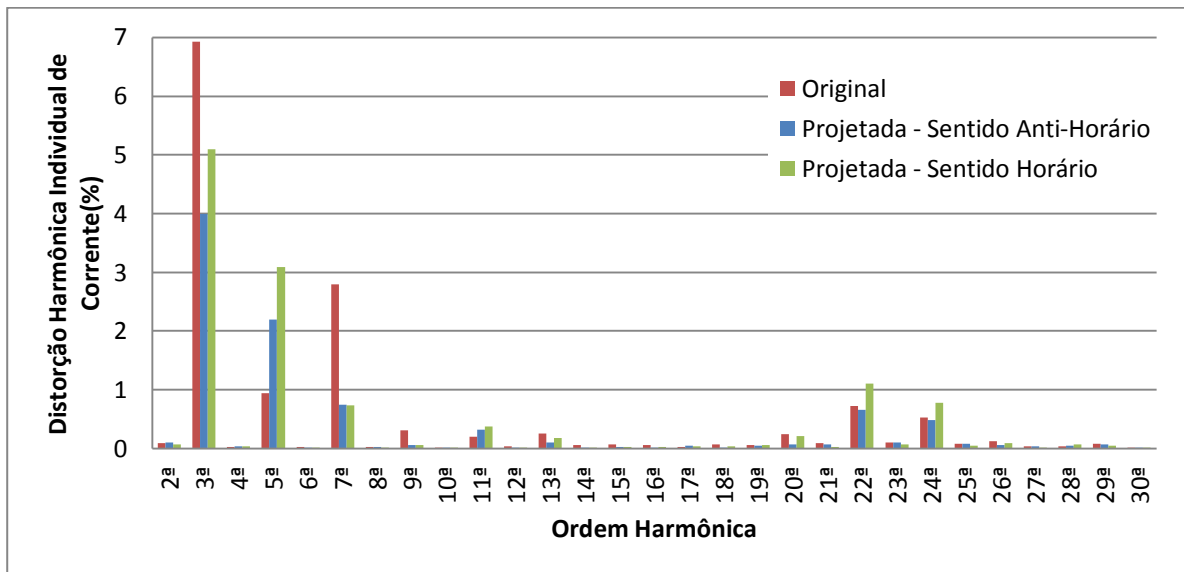
Dado	Máquina de Indução Original Operando como Gerador		Protótipo do Gerador de Indução			
			Rotação Sentido Horário		Rotação Sentido Anti-Horário	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
Valor médio eficaz	214,06	4,71	213,69	4,71	212,75	4,71
Valor eficaz da componente fundamental	214,04	4,70	213,66	4,70	212,73	4,70
Distorção Harmônica Total (até 30 <sup>a</sup> harmônica)	1,24%	7,60%	1,42%	6,25%	1,24%	5,03%

**Tabela 38 Resultados experimentais da distorção harmônica individual (até a 30ª ordem) de tensão e corrente da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução no ponto de operação de corrente nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação.**

Ordem	Distorção Harmônica Individual no Ponto de Operação Nominal					
	Máquina de Indução Original Operando como Gerador		Protótipo do Gerador de Indução			
			Rotação Sentido Horário		Rotação Sentido Anti-Horário	
	Tensão (%)	Corrente (%)	Tensão (%)	Corrente (%)	Tensão (%)	Corrente (%)
2 <sup>a</sup>	0,02	0,09	0,07	0,01	0,03	0,11
3 <sup>a</sup>	0,15	6,92	5,10	0,15	0,16	3,99
4 <sup>a</sup>	0,01	0,03	0,04	0,01	0,02	0,04
5 <sup>a</sup>	0,78	0,94	3,09	1,22	0,91	2,20
6 <sup>a</sup>	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
7 <sup>a</sup>	0,78	2,79	0,73	0,45	0,56	0,75
8 <sup>a</sup>	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
9 <sup>a</sup>	0,04	0,31	0,05	0,04	0,03	0,06
10 <sup>a</sup>	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
11 <sup>a</sup>	0,40	0,20	0,38	0,40	0,44	0,32
12 <sup>a</sup>	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01
13 <sup>a</sup>	0,13	0,25	0,18	0,10	0,14	0,10
14 <sup>a</sup>	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,01
15 <sup>a</sup>	0,02	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03
16 <sup>a</sup>	0,01	0,06	0,02	0,01	0,01	0,02
17 <sup>a</sup>	0,05	0,03	0,04	0,06	0,07	0,04
18 <sup>a</sup>	0,00	0,07	0,04	0,01	0,00	0,02
19 <sup>a</sup>	0,05	0,05	0,06	0,10	0,06	0,04
20 <sup>a</sup>	0,01	0,24	0,21	0,01	0,01	0,07
21 <sup>a</sup>	0,02	0,09	0,03	0,04	0,03	0,07
22 <sup>a</sup>	0,00	0,73	1,11	0,01	0,01	0,66
23 <sup>a</sup>	0,16	0,10	0,07	0,14	0,14	0,10
24 <sup>a</sup>	0,02	0,53	0,78	0,03	0,02	0,49
25 <sup>a</sup>	0,12	0,08	0,05	0,09	0,12	0,08
26 <sup>a</sup>	0,00	0,13	0,09	0,01	0,01	0,06
27 <sup>a</sup>	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03
28 <sup>a</sup>	0,01	0,04	0,07	0,01	0,01	0,05
29 <sup>a</sup>	0,19	0,09	0,05	0,13	0,17	0,07
30 <sup>a</sup>	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01



**Figura 97** Resultados experimentais da taxa de distorção harmônica de tensão da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado no ponto de operação nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação.



**Figura 98** Resultados experimentais da taxa de distorção harmônica de corrente da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado no ponto de operação nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação.

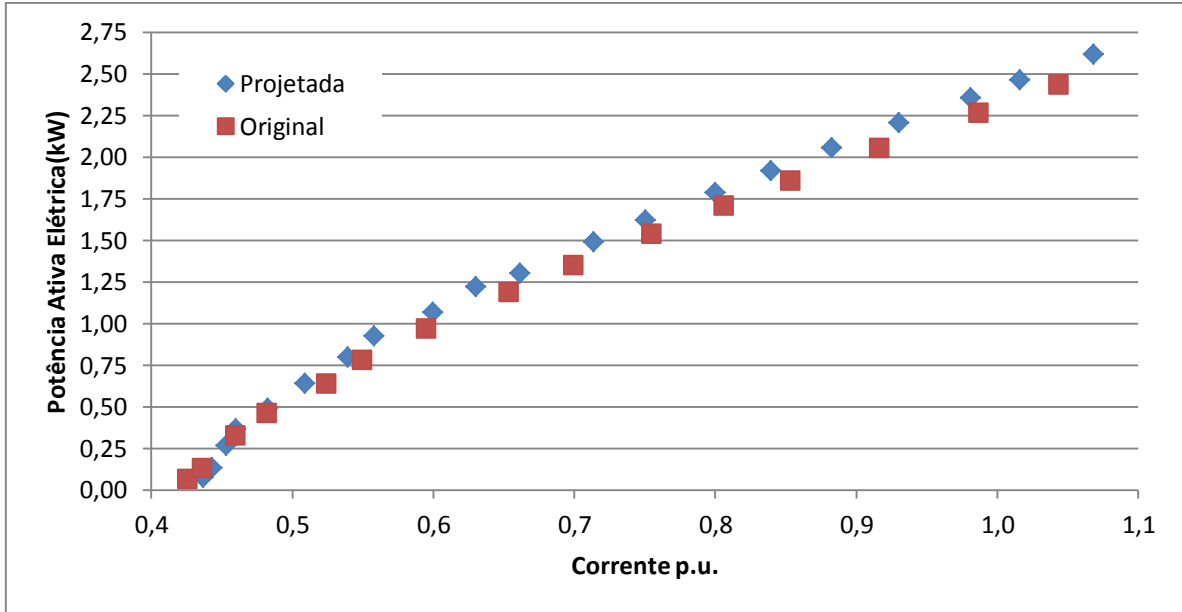
Os resultados da taxa de distorção harmônica total de tensão, conforme apresentados na Tabela 37, mostram valores iguais para a máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e para o gerador de indução projetado no ponto de operação

nominal operando com sentido anti-horário de rotação, e um aumento para o sentido horário. Entretanto, há um aumento da taxa de distorção para a componente de 5ª harmônica em ambos os sentidos de rotação no gerador de indução projetado em comparação com a máquina original, conforme mostra o gráfico da Figura 97. Contudo, os valores apresentados estão abaixo dos estipulados pela referência (ANEEL, 2014) que considera os valores máximos de 10% para distorções harmônicas totais de tensão e 7,5% para a componente de 5ª ordem.

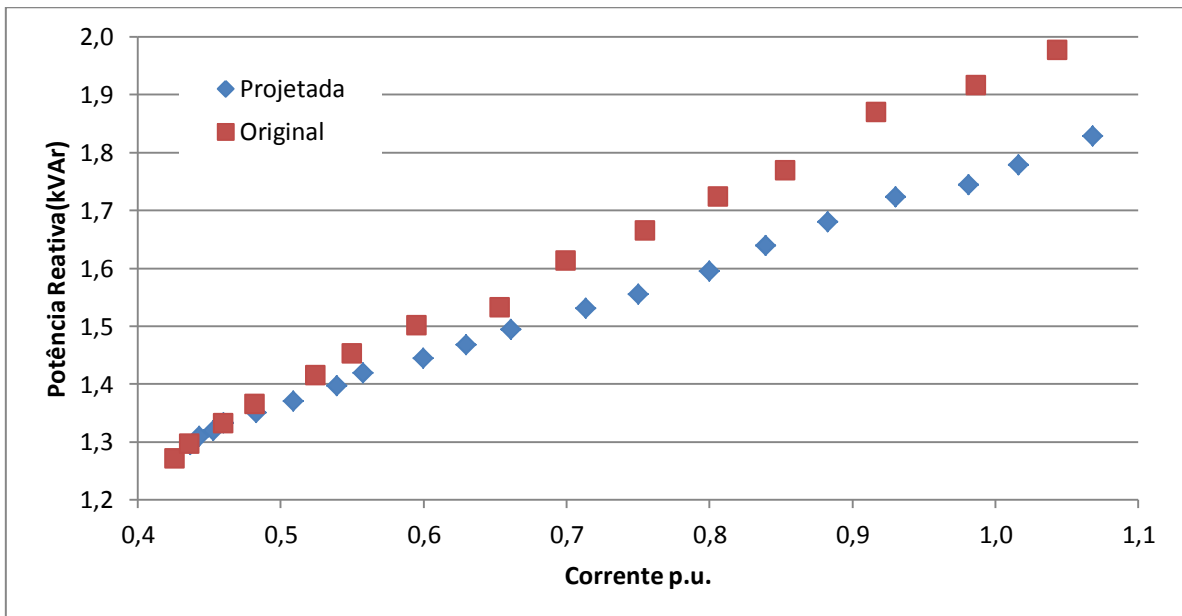
Em relação à distorção harmônica de corrente, a referência (ANEEL, 2014) não apresenta valores. A referência (IEEE, 1993) menciona valores máximos de 5% para distorções harmônicas totais de corrente e 4% para componentes de até 11ª ordem. Logo, o gerador de indução projetado apresentou valores experimentais (5,03%) da taxa de distorção harmônica total, no sentido anti-horário de rotação, ligeiramente superior ao máximo estipulado pela referência (IEEE, 1993). Todavia, os resultados dos ensaios experimentais mostraram que o gerador de indução projetado operando no sentido anti-horário de rotação apresentou melhores valores da taxa de distorção harmônica para componente de até 30ª ordem, como esperado.

#### **5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

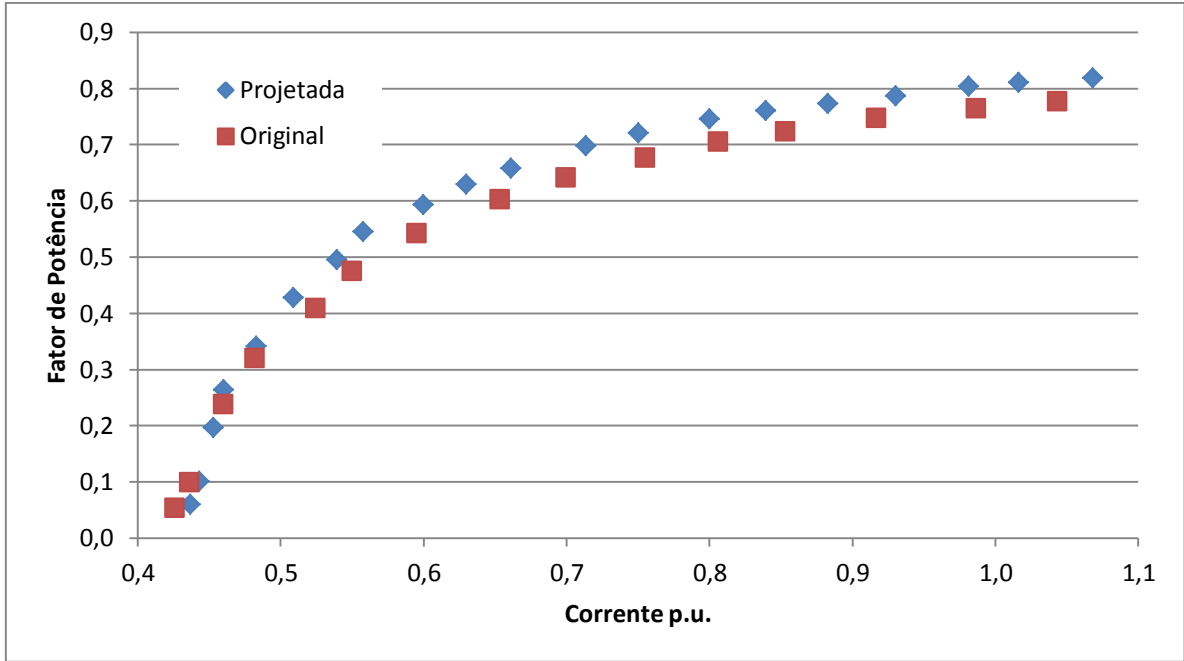
Os gráficos com os resultados dos ensaios experimentais da máquina e indução original operando como gerador e do protótipo do gerando de indução visa mostrar a diferença das grandezas envolvidas para operação em regime permanente interligada à rede de distribuição das máquinas em questão. Para facilitar a comparação, as grandezas analisadas estão em função dos valores de corrente por unidade (p.u.). Logo, as Figuras 99, 100 e 101 mostram os valores da potência ativa, potência reativa e fator de potência, respectivamente.



**Figura 99** Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência ativa versus corrente.

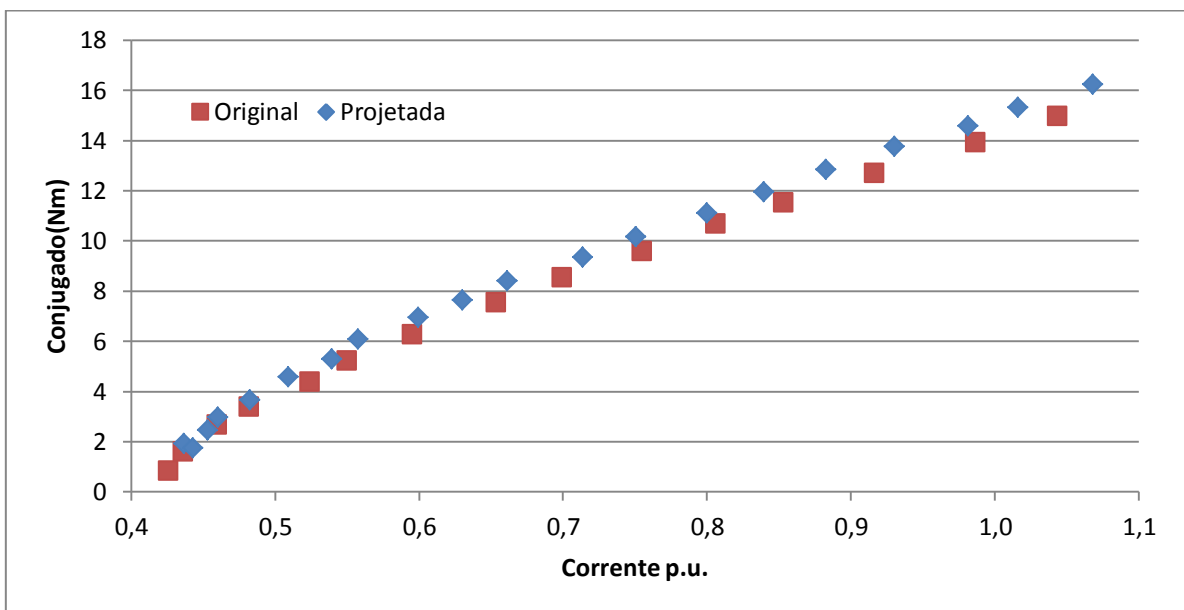


**Figura 100** Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência reativa versus corrente.

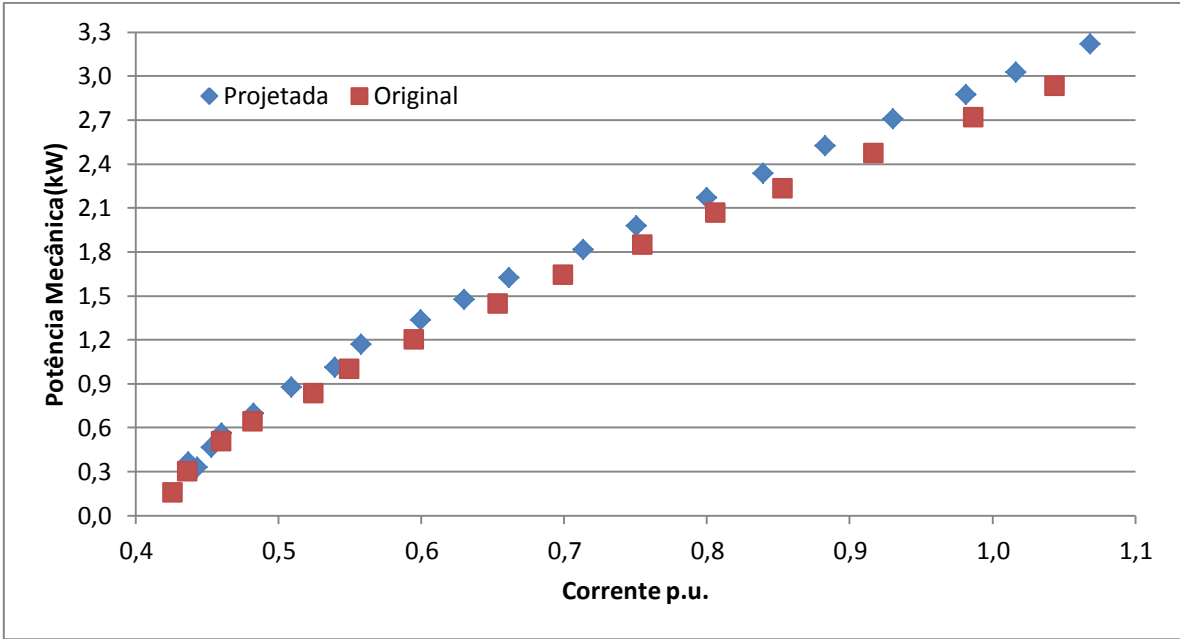


**Figura 101** Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Fator de potência versus corrente.

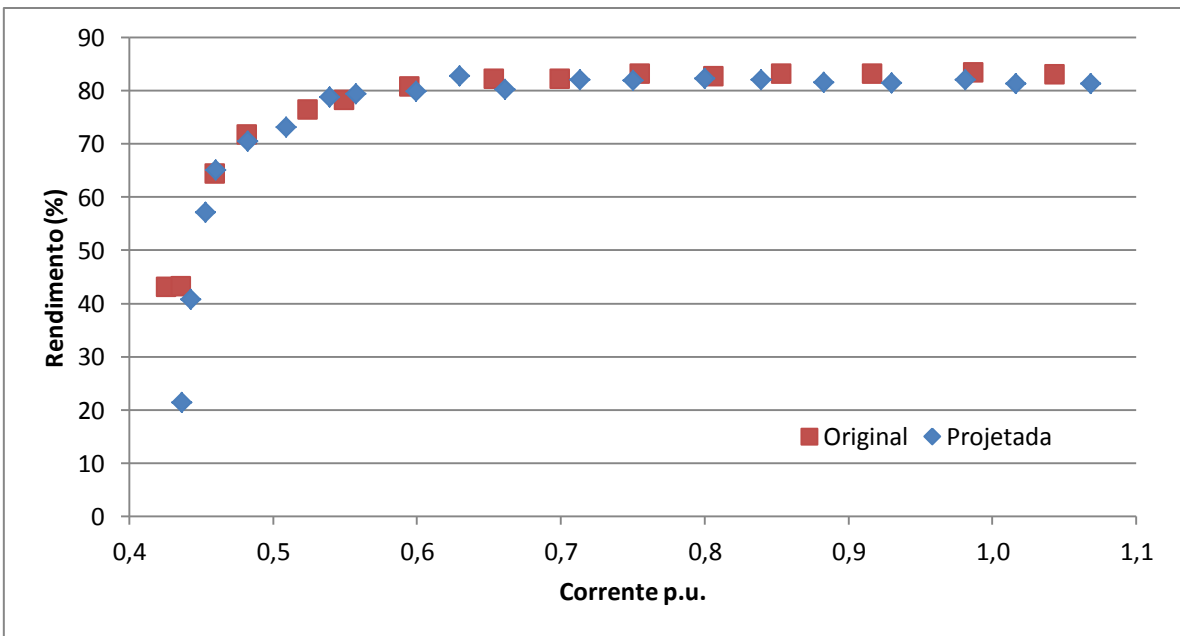
Os valores médios do conjugado, potência mecânica e rendimento são apresentados nas Figuras 102, 103, e 104, respectivamente. Por fim, os valores de corrente p.u. versus velocidade são comparados na Figura 105.



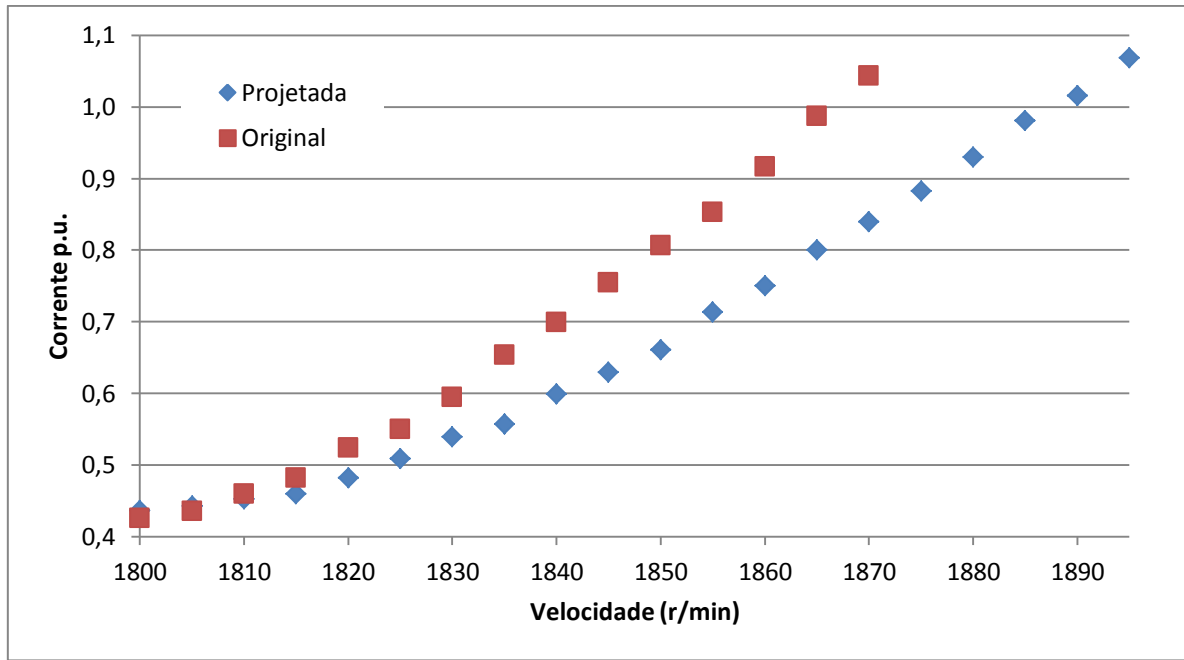
**Figura 102** Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Conjugado versus corrente.



**Figura 103** Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Potência mecânica versus corrente.



**Figura 104** Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Rendimento versus corrente.



**Figura 105 Resultados experimentais da máquina de indução original operando como gerador interligado à rede e do gerador de indução projetado – Corrente versus velocidade.**

Os resultados experimentais obtidos mostram valores nominais de 0,77 e 83,04% de fator de potência e rendimento, respectivamente, para o funcionamento da máquina convencional no ponto de operação que o valor de corrente de 4,88A é estabelecido no modo de operação como gerador, referente ao valor de velocidade de 1870r/min. Para a máquina de indução projetada como gerador, os valores nominais de 0,82 e 81,35% de fator de potência e rendimento, respectivamente, foram obtidos no ponto de operação que o valor de corrente de 4,75A é estabelecido, referente ao valor de velocidade de 1890 r/min. Assim, conclui-se que os valores dos resultados experimentais são muito próximos dos obtidos da modelagem numérica por elementos finitos, corroborando os modelos propostos. Também, evidencia-se o aumento do valor de fator de potência no protótipo do gerador de indução em comparação com a máquina de indução original operando como gerador.



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O projeto de uma máquina de indução trifásica de 2,2 kW com rotor gaiola de esquilo com ranhuras assimétricas concebida para funcionar como gerador interligado a rede foi investigada. Simulações por elementos finitos 2D foram executadas para investigação do comportamento em regime permanente de uma máquina de indução trifásica convencional, projetada para operar como motor, e da máquina de indução trifásica com rotor gaiola de esquilo com ranhuras assimétricas. Os resultados simulações para faixa de operação como gerador interligado à rede, ou seja, acima da velocidade síncrona, das duas máquinas foram obtidos.

Os resultados numéricos obtidos por simulação de elementos finitos mostram valores de 0,76 e 83,34% de fator de potência e rendimento, respectivamente, para o funcionamento da máquina original como gerador no ponto de operação próximo a corrente nominal na velocidade sobre síncrona de 1870r/min. Para a máquina de indução projetada como gerador, os valores nominais de 0,84 e 81,88% de fator de potência e rendimento, respectivamente, foram obtidos no ponto de operação próximo a corrente nominal na velocidade sobre síncrona de 1890 r/min. A questão do fator de potência, como aqui considerado, é fruto do projeto do rotor, os valores dimensionais da ranhura foram obtidos por processos de análises paramétricas. Assim, o método dos elementos finitos usado na análise e projeto de máquinas de indução disponibiliza a montagem e simulação de um modelo virtual, considerando as propriedades físicas do modelo real, tais como, entre outras, a linearidade ou não da permeabilidade magnética relativa, as condições de contorno, a magnetização de peças geradoras de campo magnético, condutividade elétrica e velocidade.

Os resultados experimentais obtidos mostram valores nominais de 0,77 e 83,04% de fator de potência e rendimento, respectivamente, para o funcionamento da máquina convencional no ponto de operação que o valor de corrente de 4,88A estabelece no modo de

operação como gerador, referente ao valor de velocidade de 1870r/min. Para a máquina de indução projetada como gerador, os valores nominais de 0,82 e 81,35% de fator de potência e rendimento, respectivamente, foram obtidos no ponto de operação que o valor de corrente de 4,75A é estabelecido, referente ao valor de velocidade de 1890r/min. Assim, conclui-se que os valores dos resultados experimentais são muito próximos dos obtidos da modelagem numérica por elementos finitos, corroborando os modelos propostos. Além disso, evidencia-se o maior valor de fator de potência no protótipo do gerador de indução em comparação com a máquina de indução original operando como gerador, embora, tenha havido um decréscimo muito pequeno no valor de rendimento. Entretanto, de acordo com as incertezas nas medições apresentadas neste estudo, não há diferença significativa entre os valores de rendimento.

Os resultados experimentais obtidos da taxa de distorção harmônica, considerando até a 30ª ordem, mostram valores de 1,24% e 7,6% de tensão e corrente, respectivamente, para a máquina de indução original funcionando como gerador no ponto de operação que a corrente de 4,71A é estabelecida. Para a máquina de indução projetada como gerador, os valores de 1,24% e 5,03% da taxa de distorção harmônica de tensão e corrente, respectivamente, são obtidos no ponto de operação que a corrente de 4,71A é estabelecida. Logo, conclui-se que o projeto do gerador com ranhuras assimétricas promoveu uma diminuição da taxa de distorção harmônica de corrente, principalmente, nas componentes de 3ª e 7ª ordem. Entretanto, de acordo com os valores das incertezas nas medições apresentadas no apêndice C, mostram que não há diferença significativa nos valores da taxa de distorção harmônica, considerando até a 30ª ordem, para o protótipo do gerador de indução funcionando no sentido horário e no sentido anti-horário. Logo, este estudo não conclui que a assimetria da ranhura promova características de desempenho diferentes no gerador de indução relacionado ao sentido de rotação.

Os resultados analíticos obtidos pela análise do circuito equivalente mostram valores nominais de 0,77 e 72,87% de fator de potência e rendimento, respectivamente, para o funcionamento da máquina convencional no ponto de operação que o valor de corrente de 4,24A é estabelecido no modo de operação como gerador, referente ao valor de velocidade de 1870r/min. Para a máquina de indução projetada como gerador, os valores nominais de 0,79 e 73,99% de fator de potência e rendimento, respectivamente, foram obtidos no ponto de operação que o valor de corrente de 4,40A é estabelecido, referente ao valor de velocidade de 1890r/min. Assim, conclui-se que os resultados analíticos diferem significativamente dos resultados experimentais devido a não linearidade dos parâmetros envolvidos no circuito equivalente como a reatância de magnetização, por exemplo, que não são levados em consideração na obtenção de resultados por circuito equivalente.

A partir do estudo realizado sobre geradores de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo e de projeto de rotores com ranhuras assimétricas, observa-se que há pontos a serem investigados em trabalhos futuros. Também, há características e análises que podem ser melhoradas. Logo, sugerem-se os seguintes pontos a serem estudados em trabalhos futuros:

- Pesquisar novos formatos de assimetrias para ranhuras - a topologia de desenho assimétrico estudada nesta tese é simples. Certamente, há topologias com maiores ganhos de fator de potência e rendimento;
- Estudar o efeito de ranhuras assimétricas no estator – similarmente a este estudo realizado com ranhuras assimétricas, pode haver ganhos com projetos de estator com ranhuras assimétricas e, talvez, maiores com a combinação das duas topologias;
- Desenvolver um modelo analítico que aborde o efeito do desenho assimétrico na ranhura – não há na literatura estudos realizados com ranhuras assimétricas.

Assim, uma contribuição importante é o estudo deste efeito em termos de dispersão de fluxo magnético.

- Desenvolver modelos numéricos 3D de geradores de indução – os modelos numéricos 2D abordados neste estudo não levam em consideração o efeito das cabeceiras de bobina, por exemplo. Logo, modelos 3D podem ser mais realistas e exatos para estas análises.
- Estudo de otimização – aplicar otimização multiobjectivo com base no estudo paramétrico. Assim, poder-se-ia averiguar resultados ótimos para as escolhas dimensionais da ranhura,

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL 469/2011**. PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de Energia. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 1 fev. 2014.
- AGUIAR, F.J.P; ANTUNES, F. Influência da não conformidade senoidal da tensão de suprimento nas perdas em vazio de transformadores de potência. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 6., 2005, Belém, PA. **Anais . . .** [S.l. : s.n], 2005.
- ALGER, P.L.; ANGST, G.; DAVIES, E.J. Stray-load losses in polyphase induction machines. **Power apparatus and systems, part III. Transaction of the American Institute of Electrical Engineers**, [S. l.], v. 78, p. 349-355, Apr. 1959.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/IEEE Std 519**: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. New York, 1993.
- ANDRADE, Cássio T. de C. **Análise de métodos para determinação da eficiência de motores trifásicos**. 2009. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7094**: máquinas elétricas girantes: motores de indução: especificação. Rio de Janeiro, 2003.
- BATISTELA, N. J. et al. Uma metodologia de caracterização magnética de aço silício e aplicações na predição das perdas magnéticas sob regimes de indução senoidal e distorcido. In: CONGRESO REGIONAL DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y ESTRUCTURALES, 2000, Buenos Aires. **Anales . . .** [S.l. : s.n.], 2000. p.283-288.
- BEAN, C.P.; PRY, R.H. Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model. **Journal Applied Physics**, [S. l.], v. 29, p. 532-533, 1958.
- BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 621-630, jan. 1988.
- BOGLIETTI, A. et al. Preliminary Induction Motor Electromagnetic Sizing Based on a Geometrical Approach. **IET Electric Power Applications**, [S. l.], v. 6, p. 583-592, jul. 2003.
- BOLDEA, I.; NASAR S. A. **The induction machine handbook**. [S.l.]: CRC Press LLC, 2002.

CAMPOS, M.F.; FALLEIROS, I. G. S.; LANDGRAF, F. J. G.. Análise crítica do modelo das perdas em excesso. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAS, 58., 2003, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** [S.l. : s.n], 2003, p. 2237-2246.

CHAPALLAZ, J. et al. **Manual on induction motors used as generators**. Braunschweig: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-Gate, 1992. (Mhpg series harnessing water power on a small scale; v.10).

CHAPMAN, S. J. **Electric machinery fundamentals**. 4th. ed. Nova Déli: Tata McGraw-Hill, 2010.

COGO, J. R.; JÚNIOR, A.S.; PONZETTO, E. S. Análise e determinação das perdas no ferro do estator em motores de indução trifásicos. **Revista Eletricidade Moderna**, [S. l.], ano XXVI, n. 295, out. 1998.

CUNHA, L. **Radiografia - Motores elétricos: movendo o mundo**. 2009. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/132-radiografia-motores-eletricos-movendo-o-mundo.html>>. Acesso em 19 jan. 2012.

ESPÍNDOLA, A. A. **Avaliação das perdas magnéticas em dispositivos submetidos a campos magnéticos girantes**. 2003. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. **Integration of alternative sources of energy**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

FITZGERALD, A. E. et al. **Máquinas elétricas**. 6. ed. New York: McGrawHill, 2003.

FOLLY K. A.; SHEETEKETA S. P. N. Impact of Fixed and Variable Speed Wind Generators on the Transient Stability of a Power System Network, In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2009, Seattle. **Proceedings...** [S.l. : s.n.], 2009, p. 1-7.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003. 127 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GMYREK, Z.; BOGLIETTI, A.; CAVAGNINO, A. Estimation of iron losses in induction motors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S. l.], v. 57, p. 161-171, 2010.

HITACHI Ltda. (Japão). Masanori Sawahata et al. **Rotating electric machine**. US8692435 B2, 8 abr. 2014 .

HODGE, C.; WILLIAMSON, S.; SMITH S. Direct drive marine propulsion motors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES, 15., 2002, Bruges. **Proceedings . . .** [S.l. : s.n.], 2002. p. 1421-1427.

IVANOV, A. **Electrical machines**. Moscou: Mir Publishers , 1982. v.1

JIMOH, A.A.; FINDLAY, R.D.; POLOUJADOFF, M. Stray losses in induction machines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S. l.], v. PAS-104, n. 6, p. 1500-1505, jun. 1985.

KÖFLER, H. **Stray load losses in induction machines: a review of experimental measuring methods and a critical performance evaluation.** Austria: Institute für Elektrische Maschinen und Antriebstechnik, 2008.

KOTHARI, D.P., NAGRATH, I.J. **Electric machines.** 4th.ed. Nova Déli: Tata McGraw-Hill, 2010. 913p.

LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. In: BOTT, I.; RIOS, P.; PARANHOS, R. (Org.). **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos.** 1. ed. Rio de Janeiro, 2002. p. 109-128.

LIUZZI, G. et al. Multiobjective Optimization Techniques for the Design of Induction Motores. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S. l.], v. 39, n. 3, maio 2003.

MACHADO, Adilson Carlos. **Determinação das perdas suplementares em motores de indução trifásicos pelo método EHStar.** 2008. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MECROW, B.C. Electromagnetic design of turbo generator stator end regions. **IEE PROCEEDINGS**, v. 136, n. 6, nov. 1989.

MEURER, Evandro Jacob. **Estudo das perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas.** 2005. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

NASCIMENTO, C. S. C. **Proposta para implantação de microcentrais de geração a gás com utilização de geradores de indução.** 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

OLIVEIRA, L. F. C.. **A influência dos tirantes de fixação do estator nas perdas das máquinas de indução trifásicas.** 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PIRES, W.L. **Estudo do comportamento das perdas no ferro em motores de indução alimentados por conversores de frequência.** 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PYRHÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V. **Design of rotating electrical machines.** 1.ed. Wiltshire: John Wiley & Sons, 2008. 503p.

SANTOS, J.P. **Influências do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos – o efeito textura.** 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

SANTOS, S. R. **Proposta para implantação de micro-centrais hidrelétricas automatizadas com o emprego de geradores assíncronos.** 2003. 114 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SAWETSAKULANOND, B.; HOTHONGKHAM, P.; KINNARES, V. Design and Construction of a Three Phase of Self-Excited Induction Generator. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES (ICSET), 2008, Singapura. **Proceedings . . .** [S.l. : s.n.], 2008. p. 1227-1232.

SAWETSAKULANOND, B.; HOTHONGKHAM, P.; KINNARES, V. Investigation on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Grid Connected Induction Generator. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES (ICSET), 2008, Singapura. **Proceedings . . .** [S.l. : s.n.], 2008. p. 848-853.

SAWHNEY, A.K. **A course in electrical machine design.** 6th ed. Déli: Dhanpat Rai & Co., 2006. 1199p.

SENJYU, T. et al. Speed and position sensor-less maximum power point tracking control for wind generation system with squirrel cage induction generator, In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2006, Atlanta. **Proceedings. . .** [S. l. : s.n.], nov. 2006, p. 2038-2043.

SHINDO, R.. **Cálculo de parâmetros de motor de indução trifásico utilizando o método dos elementos finitos.** 2003. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Alternative Energy Systems:** design and analysis with induction generators. [S.l.]: CRC Press LLC, 2008.

SOBRINHO, A.P. **CrITÉrios de projeto e construção de motores de indução trifásicos de alta rotação.** 2008. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.

SUEBKINORN W.; NEAMMANEE B. An Implementation of Field Oriented Controlled SCIG for Variable Speed Wind Turbine. In: IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 2011, Beijing. **Proceedings...** [S.l. : s.n], 2011. p. 34-44.

WEG. **Avanços tecnológicos nos motores elétricos.** Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-avancos-tecnologicos-nos-motores-eletricos-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em 01 mar. 2014.

WEG. **MÓDULO 4:** geração de energia. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/52261261/132/PERDAS>>. Acesso em 31 mar. 2012.



## ANEXO I:

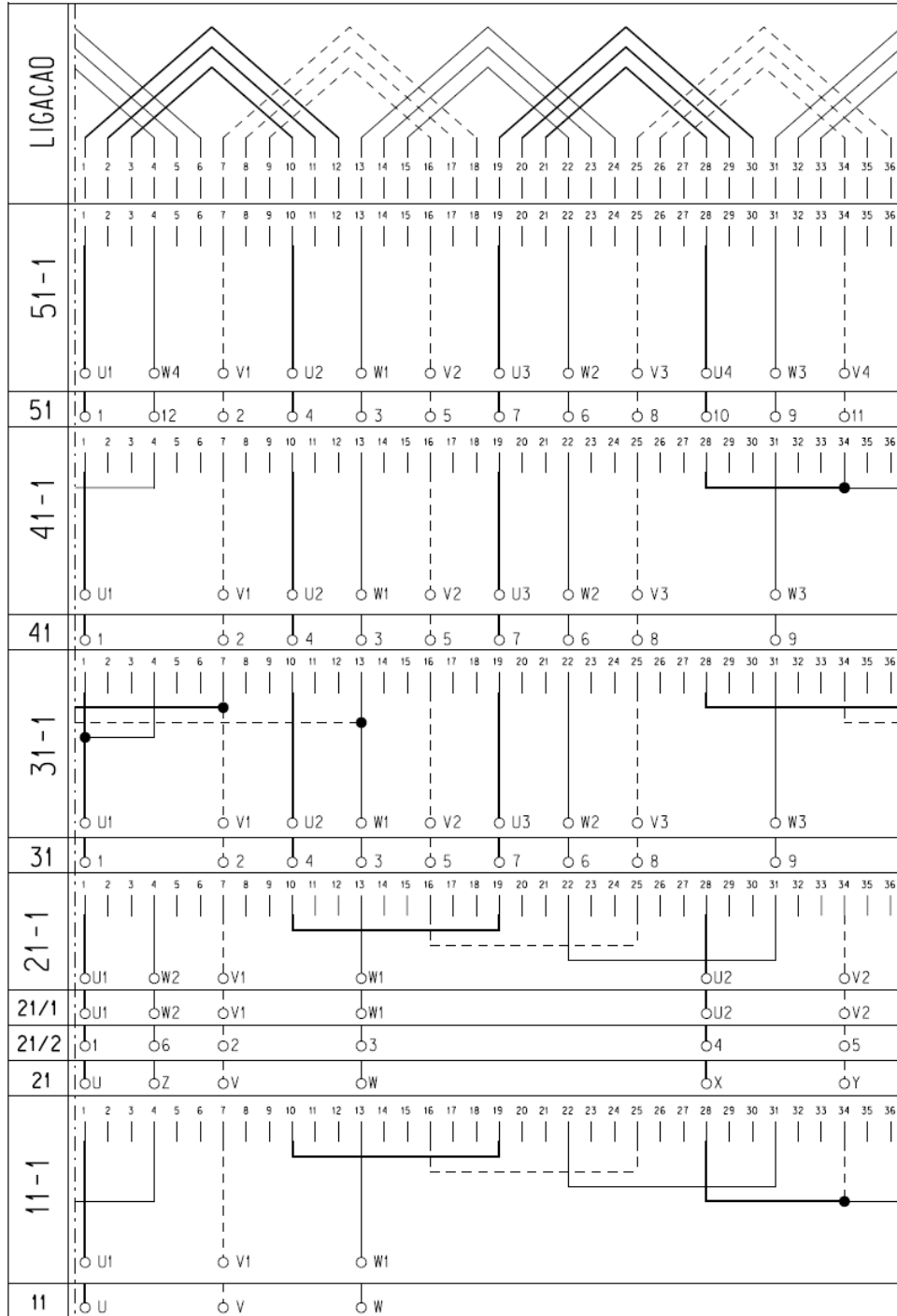
Características Construtivas da Máquina de Indução Original.

## ANEXO I: CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO ORIGINAL

A máquina de indução original utilizada neste trabalho apresenta as seguintes características construtivas fornecidas pelo fabricante, conforme mostra a Tabela 1. As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram o estator e o rotor da máquina original. O esquema de bobinagem é apresentado na Figura 1.

**Tabela 1 Características construtivas da máquina de indução original.**

Dado	Valor
Comprimento axial do pacote (mm)	100
Espessura das lâminas (mm)	0,5
Nº de camadas do enrolamento do estator	1
Passo do enrolamento	1:8:10:12
Nº de espiras por bobina	37
Composição do fio do enrolamento	1 x 21 AWG + 1 x 22 AWG
Número de ranhuras do estator	36
Número de ranhuras do rotor	44
Área do anel de curto circuito (mm <sup>2</sup> )	250
Inclinação nas barras do rotor (°)	0
Condutividade do cobre (S/m)	58000000
Condutividade do alumínio (S/m)	38000000



**Figura 1** Esquema de bobinagem do enrolamento do estator.

As Figuras 2 e 3 mostram os detalhes construtivos do estator e as dimensões da ranhura fornecidas pelo fabricante. Estes dados são necessários e inseridos no modelo por elementos finitos para a obtenção de resultados numéricos computacionais. Também, as

Figuras 4 e 5 mostram os desenhos com as dimensões referentes ao rotor e a ranhura do rotor da máquina de indução original.

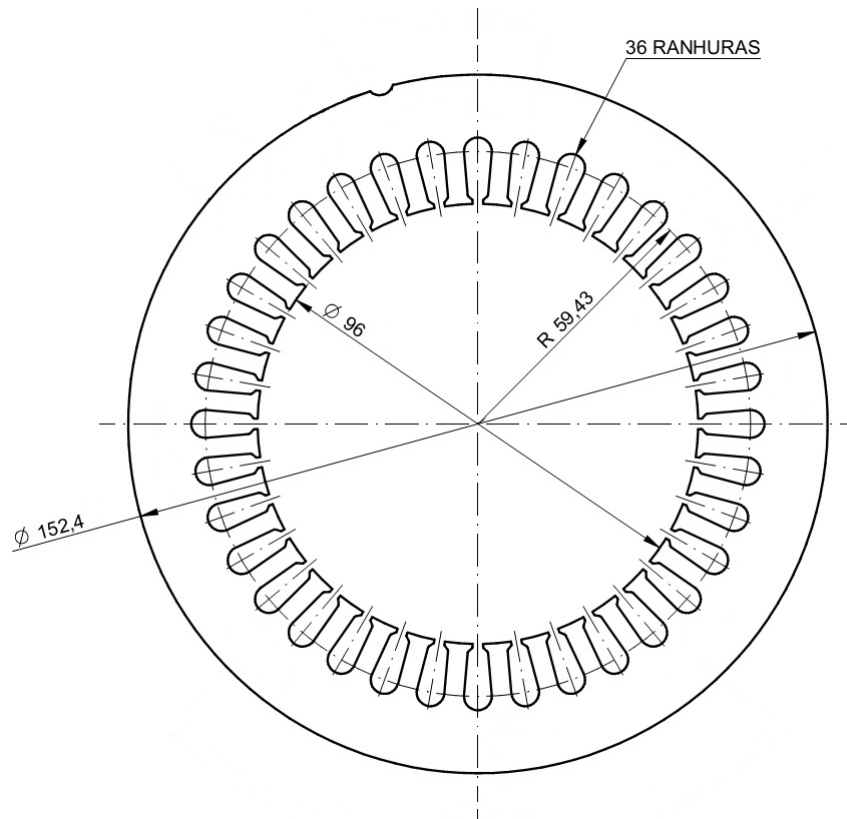


Figura 2 Desenho com as dimensões do estator da máquina de indução original.

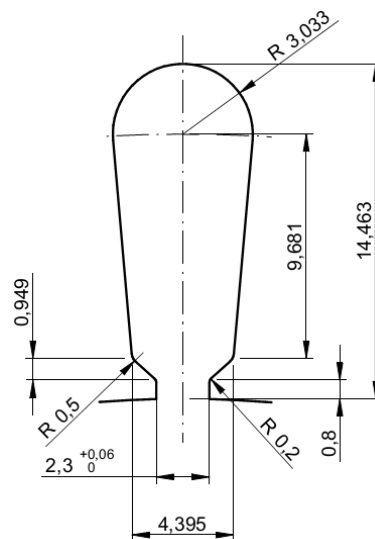


Figura 3 Desenho com as dimensões da ranhura do estator da máquina de indução original.

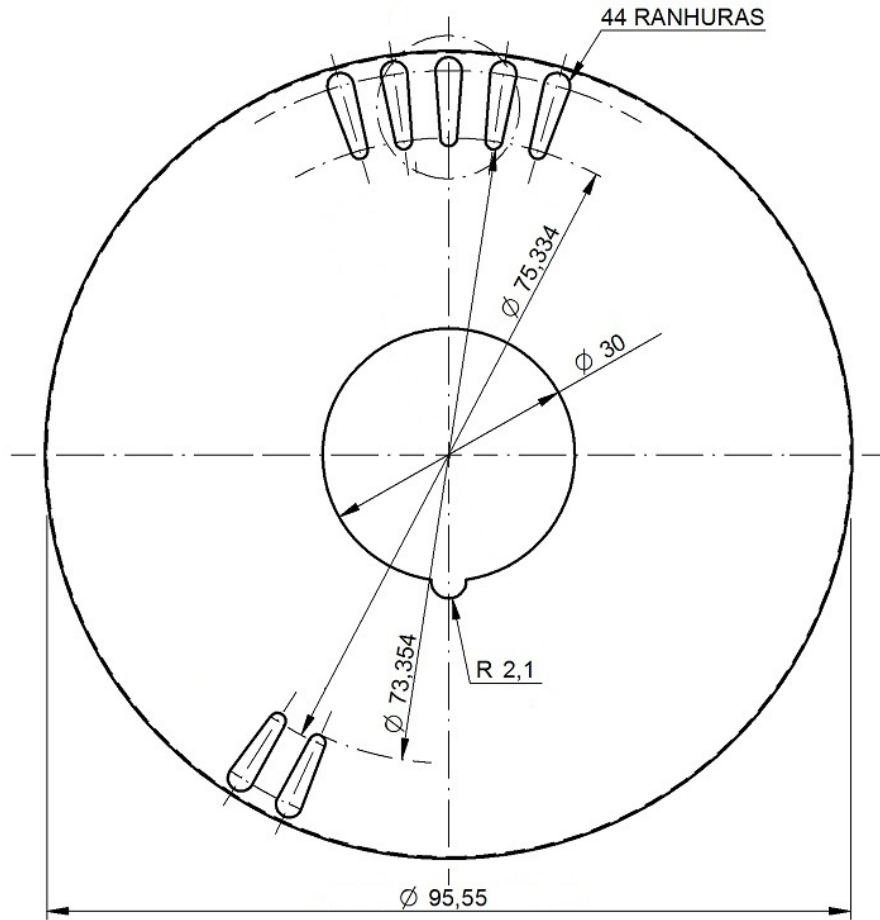


Figura 4 Desenho com as dimensões do rotor da máquina de indução original.

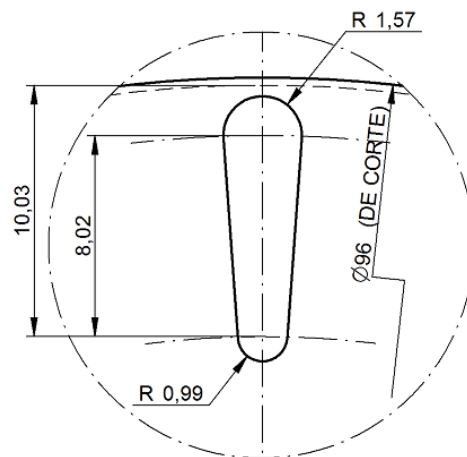


Figura 5 Desenho com as dimensões da ranhura do rotor da máquina de indução original.

## APÊNDICE A:

Resultados dos Ensaio de Rotina para a Máquina de Indução Projetada para Atuar como Gerador Interligado à Rede (Gerador de Indução).

**APÊNDICE A: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ROTINA PARA A MÁQUINA DE INDUÇÃO PROJETADA PARA ATUAR COMO GERADOR INTERLIGADO À REDE (GERADOR DE INDUÇÃO)**

As Tabelas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mostram os resultados dos ensaios de rotina para a máquina de indução projetada para atuar como gerador interligado à rede (gerador de indução).

**Tabela 1 Resultados do ensaio a vazio para o gerador de indução.**

Enrolamento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa(W)	Potência Reativa (VAr)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	220,49	2,15	28,10	427,80
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	220,87	2,10	70,97	459,10
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	221,71	2,31	71,67	506,70
Média	221,022	2,187	56,911	479,511

**Tabela 2 Resultados do ensaio a rotor bloqueado para o gerador de indução.**

Enrolamento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa(W)	Potência Reativa (Var)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	35,43	4,65	111,2	121,60
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	35,48	4,82	123,03	128,90
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	36,00	4,62	109,53	125,20
Média	35,634	4,697	114,589	121,922

**Tabela 3 Resultados do ensaio a velocidade síncrona para o gerador de indução.**

Enrolamento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa(W)	Potência Reativa (Var)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	220,63	2,13	38,90	468,20
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	221,06	2,24	32,00	494,60
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	220,30	2,17	20,40	477,10
Média	220,663	2,178	30,433	479,967

**Tabela 4 Medidas da resistência do estator.**

Enrolamento	Medidas da resistência do estator R1 para 26°C (Ω)			
	1ª medida	2ª medida	3ª medida	Média
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	2,4289	2,4299	2,4302	2,430
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	2,4375	2,4369	2,4363	2,437
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	2,432	2,4338	2,4341	2,433
Média	2,433	2,434	2,434	2,433

**Tabela 5 Perdas rotacionais, perdas no ferro e perdas suplementares para o gerador de indução.**

Enrolamento	Perdas Rotacionais + Perdas no Ferro ( $R_{fe}$ ) + Perdas Suplementares (W)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	16,85
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	60,20
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	58,72
Soma	135,774

**Tabela 6 Parâmetros calculados para reatância a vazio, reatância a rotor bloqueado e resistência a rotor bloqueado para o gerador de indução.**

Enrolamento	Reatância para ensaio a vazio $X_{vz}$ ( $\Omega$ )	Reatância para ensaio a rotor bloqueado $X_{bl}$ ( $\Omega$ )	Resistência para ensaio a rotor bloqueado $R_{bl}$ ( $\Omega$ )
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	102,28	5,63	5,15
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	103,77	5,11	5,29
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	95,22	5,87	5,13
Média	100,425	5,537	5,190

**Tabela 7 Parâmetros de reatâncias e resistências calculados para o gerador de indução.**

Enrolamento	Reatâncias do estator e do rotor $X_1 = X_2$ ( $\Omega$ )	Reatância de magnetização $X_m$ ( $\Omega$ )	Resistência do rotor $R_2$ ( $\Omega$ )
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	2,86	99,42	2,88
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	2,59	101,19	3,00
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	2,98	92,25	2,88
Média	2,808	97,617	2,918

**Tabela 8 Perdas no núcleo do estator para o gerador de indução.**

Enrolamento	Perdas no núcleo do estator $P_{nucleo(estator)}$ (W)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	27,865
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	19,770
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	8,967
Soma	56,602



**Tabela 9 Resistência referente às perdas no núcleo do estator para o gerador de indução.**

Enrolamento	Resistência referente às perdas no núcleo do estator $R_{fe}$ ( $\Omega$ )
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	975,547
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	1556,510
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	2701,792
Média	1744,616

**Tabela 10 Perdas rotacionais e perdas suplementares para o gerador de indução.**

Enrolamento	Perdas Rotacionais + Perdas Suplementares ( $\approx$ 1800 rpm) (W)
U <sub>1</sub> -U <sub>2</sub>	11,01
V <sub>1</sub> -V <sub>2</sub>	40,43
W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub>	38,74
Soma	79,17

## APÊNDICE B:

Ensaio para Caracterização do Material Ferromagnético do Rotor.

## **APÊNDICE B: ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FERROMAGNÉTICO DO ROTOR**

Este projeto de experimentos visa a caracterização das propriedades magnéticas do material ferromagnético. Estes ensaios experimentais fornecem informações suplementares as já adquiridas junto ao fabricante no início da tese, além de avaliar o material pelo método de amostras de núcleos toroidais, ao invés do método do quadro de Epstein realizada pelo fabricante VOGES. Também, de comum objetivo, são averiguadas as diferenças das propriedades magnéticas entre o material cru (sem tratamento térmico) e o material que sofreu tratamento térmico. Ressalva-se que todos os procedimentos e ensaios foram realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE).

Para a realização dos experimentos, foram confeccionadas seis amostras (núcleos toroidais) com dimensões iguais, três receberam tratamento térmico e, os outros três, não. As dimensões seguem o padrão fornecido pelo fabricante da máquina de caracterização adquirida pelo LMEAE. O número de espiras do primário e do secundário foram calculados de acordo com o equacionamento descrito neste apêndice. A Figura 1 mostra os núcleos já enrolados prontos para o processo de caracterização. A Tabela I apresenta os principais atributos das amostras.



Figura 1 – Amostras (núcleos toroidais) com enrolamentos do primário e secundário inseridos.

Tabela I – Características físicas das amostras (núcleos toroidais).

Características Físicas:	Amostra (núcleo toroidal)					
	01	02	03	04	05	06
Nº de Lâminas:	15	15	15	15	15	15
Cumprimento do Pacote (mm):	8,135	7,82	7,82	7,83	7,76	7,74
Raio Interno (mm):	45	45	45	45	45	45
Raio Externo (mm):	55	55	55	55	55	55
Peso Total do Núcleo (g):	184,82	184,16	184,33	184,02	183,51	183,51
Peso Específico (mg/mm <sup>3</sup> ):	7,232	7,496	7,503	7,481	7,527	7,546
Volume (mm <sup>3</sup> ):	25557	24567	24567	24599	24379	24316
Tratamento Térmico:	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Fio do Primário (AWG):	24	24	24	24	24	24
Nº de Espiras do Primário:	400	400	400	400	400	400
Fio do Secundário (AWG):	24	24	24	24	24	24
Nº de Espiras do Secundário:	45	45	45	45	45	45

A obtenção das curvas de magnetização das amostras foi feita através do software RemaGraph. A Figura 2 mostra uma amostra conectada ao equipamento durante o procedimento da obtenção da curva de magnetização. Os parâmetros definidos no software

para os testes encontram-se neste apêndice. As Figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8 mostram os resultados das amostras para curva de magnetização e de permeabilidade.

Figura 3 – Curva de magnetização e curva de permeabilidade para a amostra número um (não tratado termicamente).

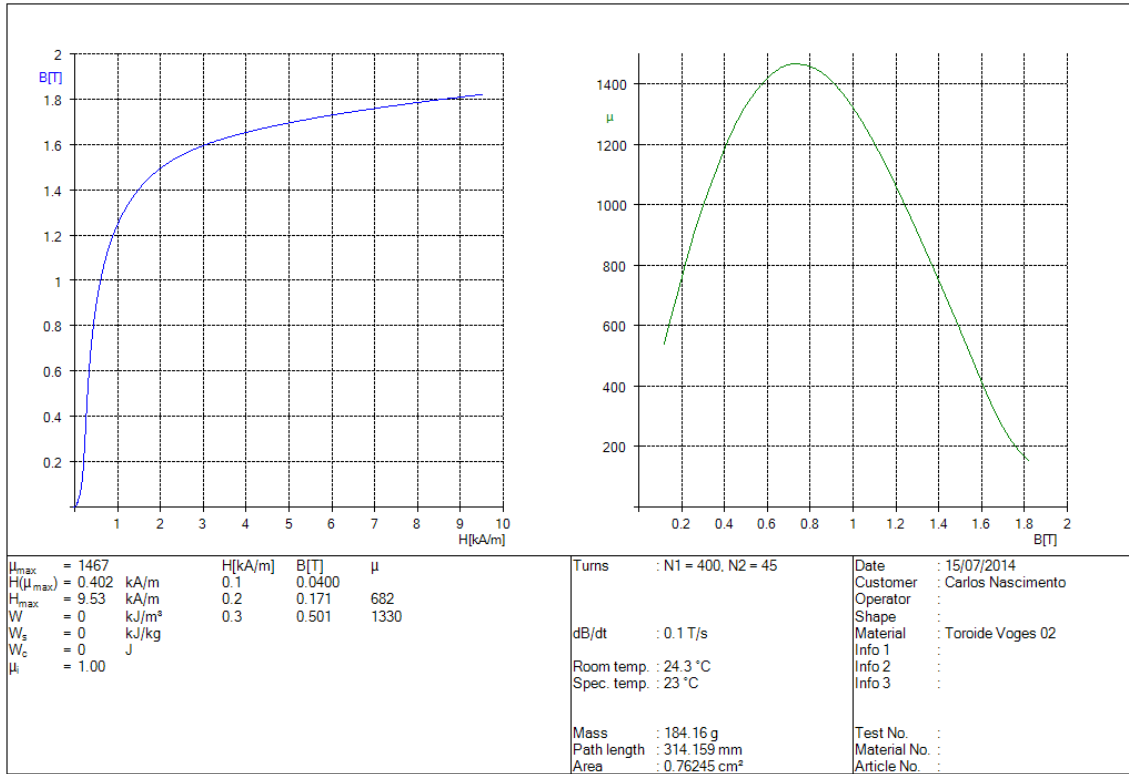


Figura 4 – Curva de magnetização e curva de permeabilidade para a amostra número dois (não tratado termicamente).

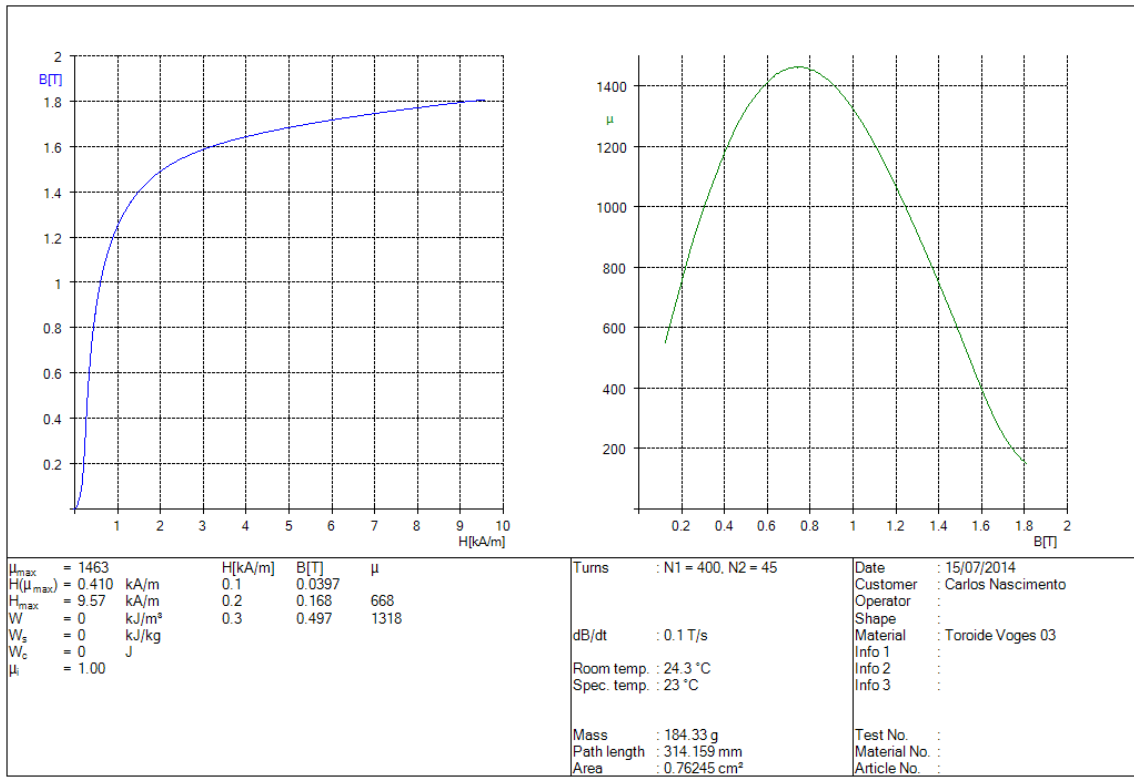


Figura 5 – Curva de magnetização e curva de permeabilidade para a amostra número três (não tratado termicamente).

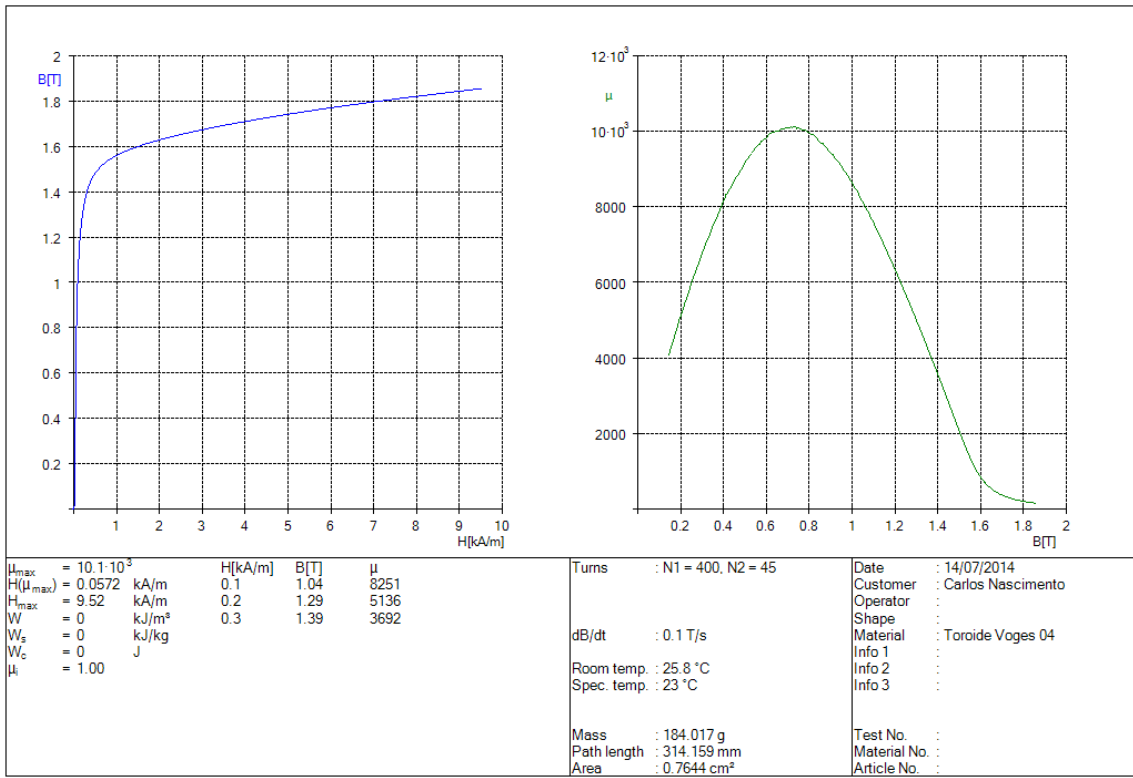


Figura 6 – Curva de magnetização e curva de permeabilidade para a amostra número quatro (tratado termicamente).

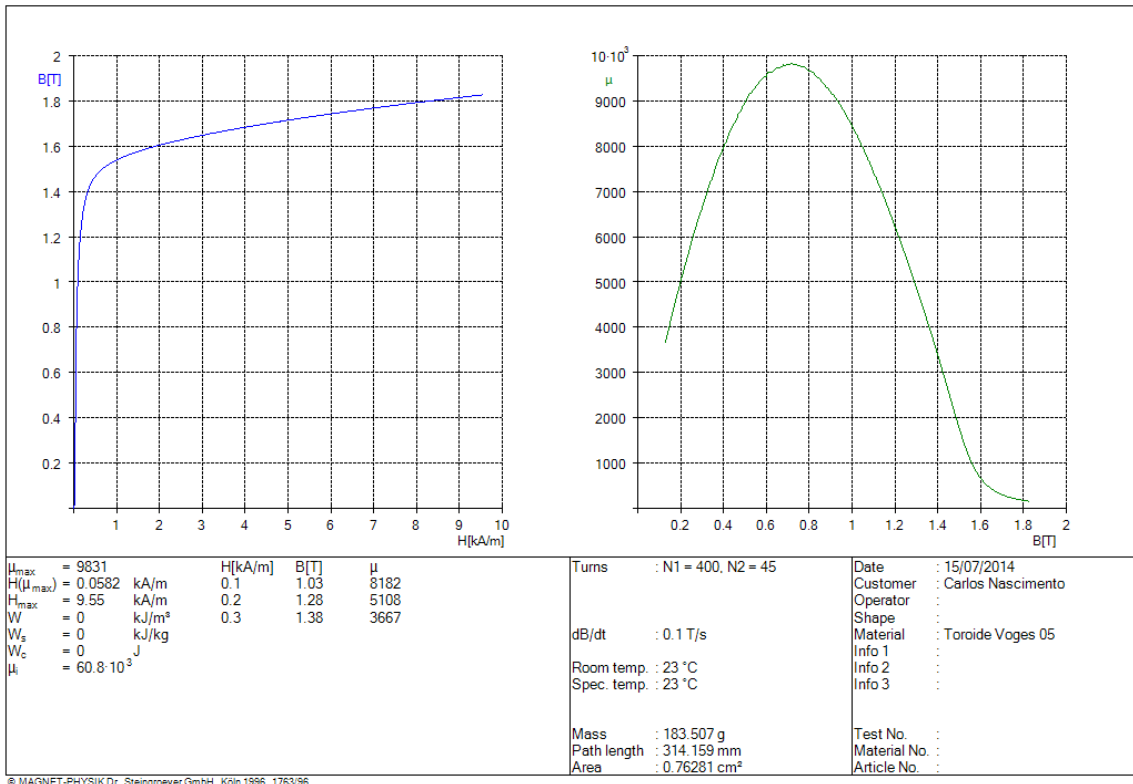


Figura 7 – Curva de magnetização e curva de permeabilidade para a amostra número cinco (tratado termicamente).

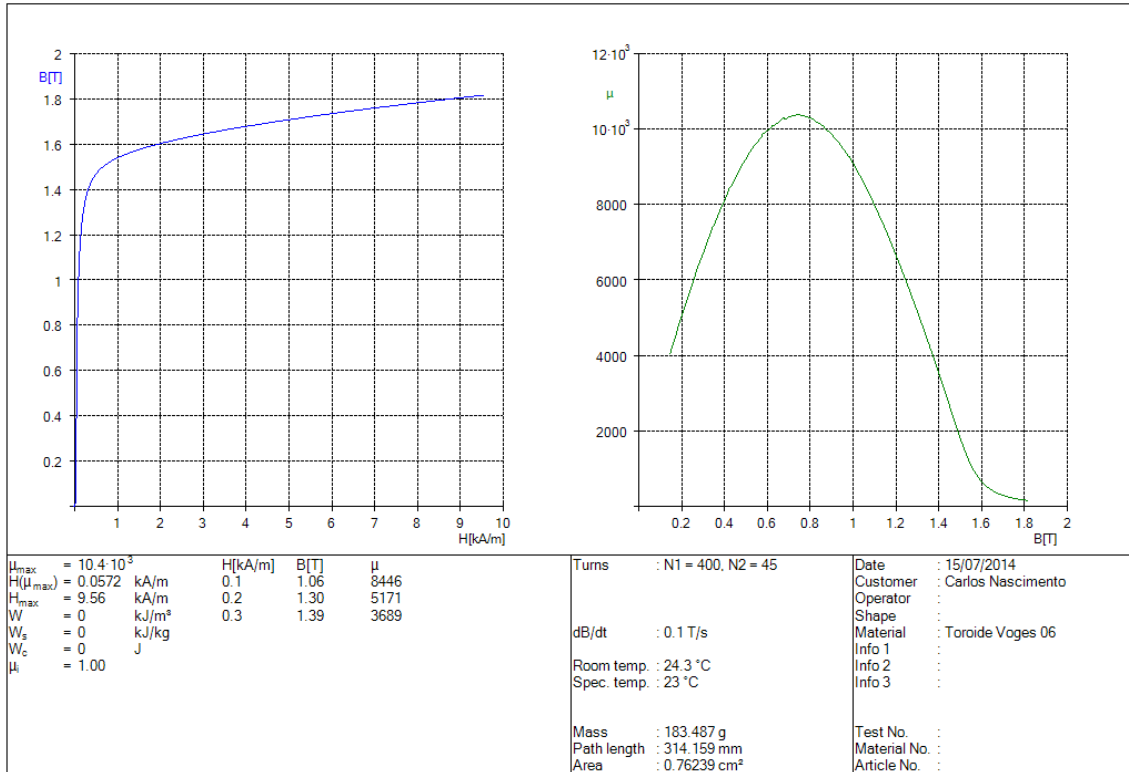


Figura 8 – Curva de magnetização e curva de permeabilidade para a amostra número seis (tratado termicamente).

Através da obtenção dos dados tabulados das curvas de magnetização fornecidos pelo software, traçou-se o gráfico comparativo entre as amostras, conforme apresenta a Figura 9. A Figura 10 apresenta a comparação da média das curvas dos núcleos não tratados termicamente e dos tratados termicamente.



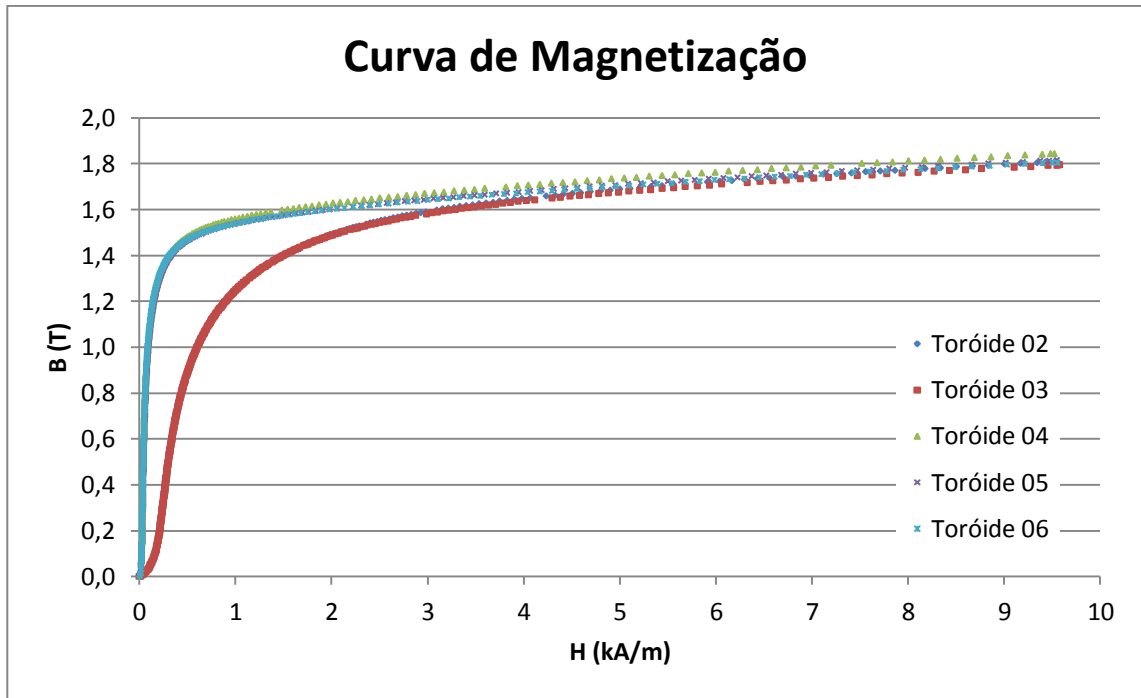


Figura 9 – Curvas de magnetização das amostras (núcleos toroidais).

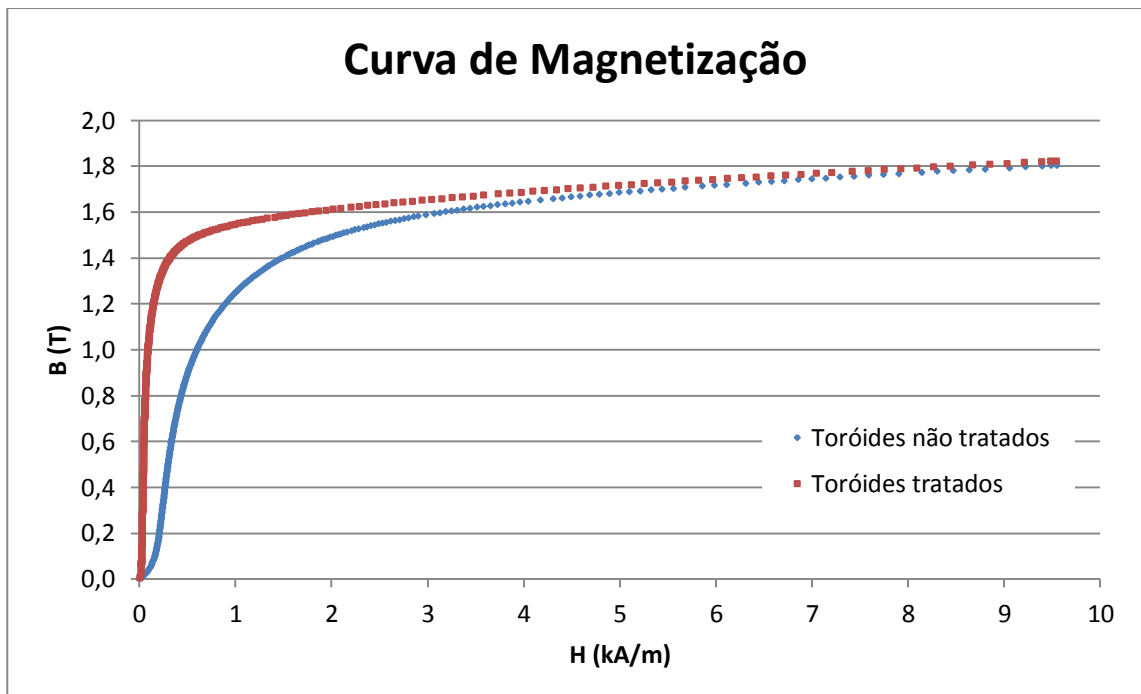


Figura 10 – Curvas de magnetização médias das amostras (núcleos toroidais) não tratadas e tratadas termicamente.

## Equacionamento para o calculo de espiras realizados no MATLAB

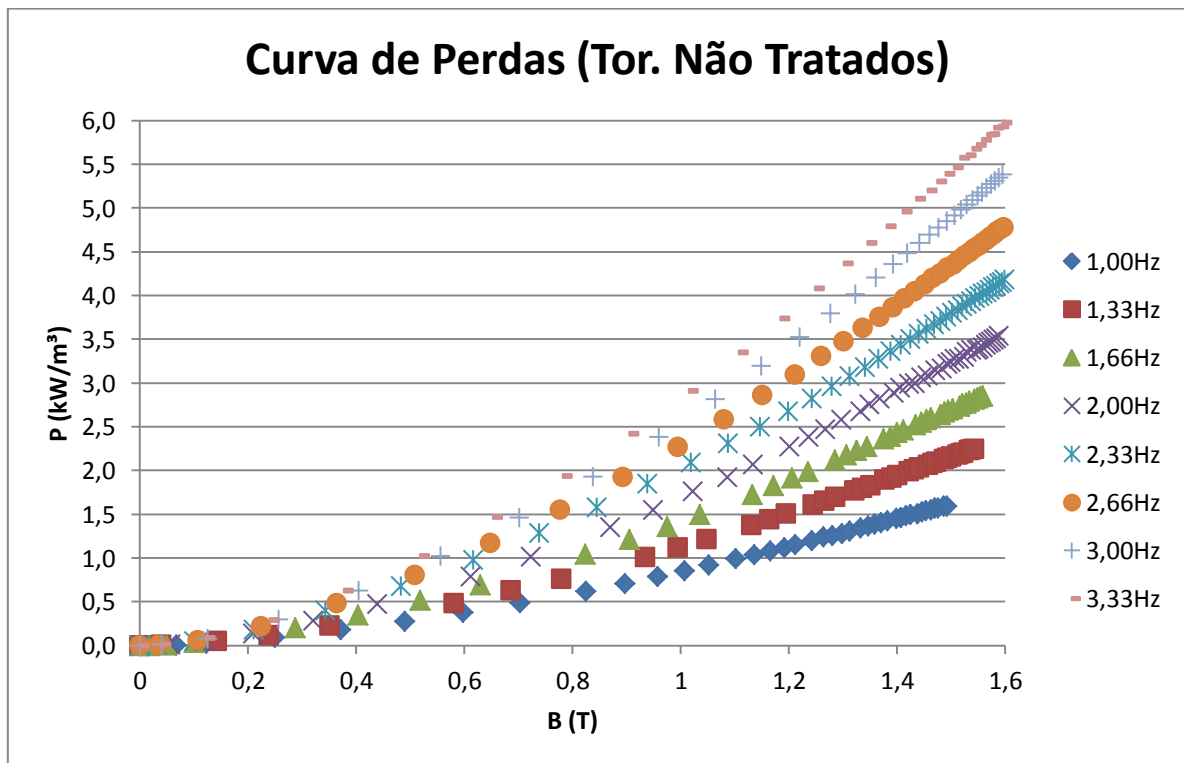
```

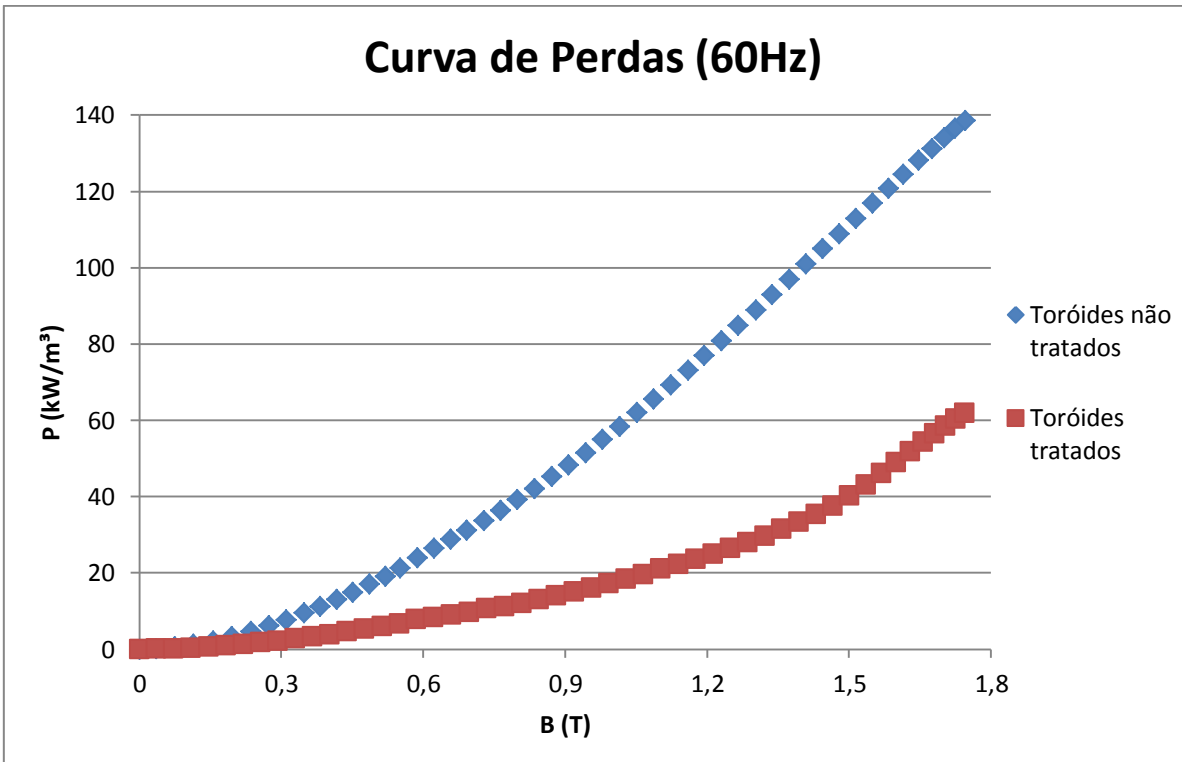
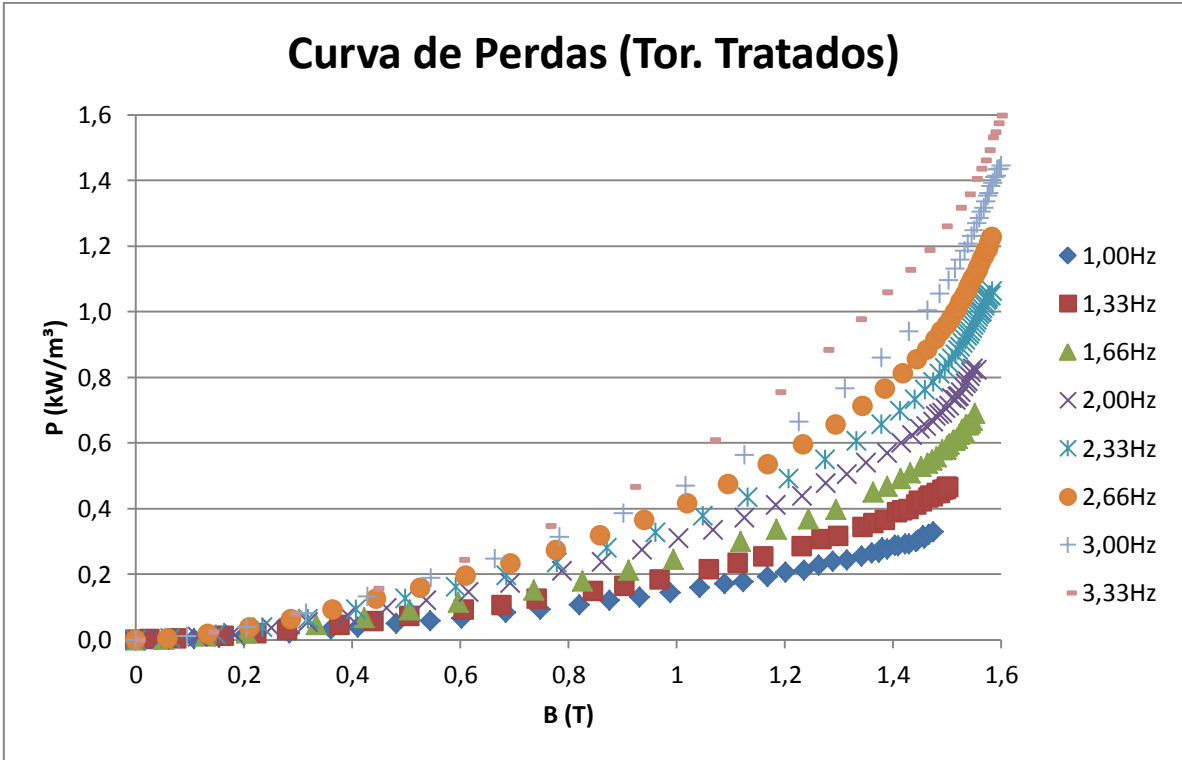
clear all
clc
I=12; %corrente maxima do amplificador
V=36; %tensao maxima do amplificador
ro=1.72e-8;%resistividade do cobre a 20graus passivel de correcao
m0=4*pi*1e-7;% permeabilidade magnetica do vacuo
%% parametros do teste
fmax=60; %frequencia maxima do teste
fmin=2; %frequencia minima do teste
kep=0.95%fato de emprilhamento
e=kep*8e-3;%espessura do toroide medida (m)
r_o=5.5e-2; %raio externo do toroide(m)
r_i=4e-2;%raio interno do toroide(m)
D=0.051e-2%diametro do condutor de cobre(m)
mr=140;%permeabilidade relativa esperada
B_sat=1.5;%inducacao magnetica de saturacao esperada(T)
B_teste=2;%inducacao magnetica maxima de teste(T)
%% Calculo de R e L resistencia e indutancia por espira

R=4*ro*(2*e+2*(r_o-r_i)/(pi*D^2))
L=e*(r_o-r_i)*m0*mr/(pi*(r_o+r_i))

%% Calculo de N
syms N1;
%y=(R^2*N1^2+4*pi^2*fmin^2*L^2*N1^4)-(V/I)^2;
f=[4*(pi*fmin*L)^2 0 R^2 0 -(V/I)^2];
roots(f)

```





### APÊNDICE C:

Incertezas das Medições Realizadas nos Ensaios Experimentais.

## APÊNDICE C: INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES REALIZADAS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

As Tabelas 1, 2 e 3 mostram os resultados das incertezas das medições realizadas nos ensaios experimentais da máquina de indução original e do gerador de indução prototipado.

Tabela I – Incertezas (desvio padrão) das medições realizadas nos ensaios experimentais da máquina de indução original.

$n(r/min)$	$T(Nm)$	$V(V)$	$I_{fase}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$FP$
1800	0,05	2,00	0,03	17,36	33,75	34,28	0,01
1805	0,09	2,04	0,04	7,18	37,10	37,32	0,01
1810	0,50	1,67	0,08	82,05	45,09	62,75	0,05
1815	0,26	1,55	0,06	45,54	36,23	104,88	0,02
1820	0,66	2,30	0,11	97,07	63,57	98,53	0,04
1825	0,30	2,61	0,07	39,43	53,27	65,81	0,01
1830	0,20	2,64	0,05	24,21	48,33	53,04	0,01
1835	0,39	2,55	0,11	75,77	109,15	88,87	0,02
1840	0,38	2,51	0,09	58,80	58,49	82,58	0,01
1845	0,31	2,29	0,06	40,29	38,54	63,88	0,01
1850	0,27	2,10	0,07	50,14	49,10	69,71	0,01
1855	0,20	1,07	0,07	47,25	22,56	46,75	0,01
1860	0,13	1,13	0,02	11,93	78,24	20,86	0,01
1865	0,36	1,03	0,09	56,43	30,69	61,72	0,01
1870	0,39	0,57	0,08	53,89	29,96	60,60	0,01

Tabela II – Incertezas (desvio padrão) das medições realizadas nos ensaios experimentais do gerador de indução prototipado.

$n(r/min)$	$T(Nm)$	$V(V)$	$I_{fase}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$FP$
1800	0,16	1,85	0,05	9,34	42,47	42,53	0,01
1805	0,11	1,83	0,04	33,92	36,32	34,95	0,03
1810	0,27	1,65	0,05	33,23	39,24	45,33	0,02
1815	0,17	1,64	0,00	8,78	35,49	35,51	0,01
1820	0,21	1,77	0,04	22,86	36,38	36,89	0,02
1825	0,08	1,47	0,01	27,93	26,21	15,49	0,02
1830	0,12	1,39	0,06	37,87	34,64	46,88	0,01
1835	0,22	1,91	0,12	25,91	40,31	47,85	0,01
1840	0,20	1,75	0,05	27,76	34,15	40,94	0,01
1845	0,14	1,50	0,05	61,02	34,01	41,29	0,01
1850	0,06	1,75	0,03	16,60	36,09	37,91	0,01
1855	0,18	1,62	0,05	33,39	35,75	47,68	0,01
1860	0,41	1,75	0,08	59,87	39,05	64,47	0,01
1865	0,50	1,77	0,12	87,97	34,81	85,34	0,01
1870	0,65	1,90	0,17	111,12	37,71	13,97	0,02
1875	0,23	2,10	0,05	35,70	39,02	37,97	0,01
1880	0,57	2,02	0,12	85,79	54,43	99,68	0,01
1885	0,73	1,58	0,16	112,31	58,29	124,88	0,01
1890	0,94	1,84	0,24	163,24	79,06	178,67	0,01
1895	1,00	0,93	0,24	153,39	67,71	165,02	0,01

Tabela III – Incertezas (desvio padrão) das medições realizadas nos ensaios experimentais da distorção harmônica total de tensão e corrente da máquina de indução original operando como gerador e do protótipo do gerador de indução no ponto de operação de corrente nominal operando com sentido horário e anti-horário de rotação.

Dado	Máquina de Indução Original Operando como Gerador		Protótipo do Gerador de Indução			
	Tensão (V)	Corrente (A)	Rotação Sentido Horário		Rotação Sentido Anti-Horário	
			Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
Valor médio eficaz	0,61	0,01	1,94	0,02	1,08	0,01
Distorção Harmônica Total (%) (até 30ª harmônica)	0,02	0,14	0,30	0,93	0,02	0,29