

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Rogério Aparecido da Silva**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO AUTOEXCITADO POR  
CAPACITORES**

**Taubaté – SP**

**2016**

**Rogério Aparecido da Silva**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO AUTOEXCITADO POR  
CAPACITORES**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

**Taubaté – SP**

**2016**

**ROGÉRIO APARECIDO DA SILVA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO  
AUTOEXCITADO POR CAPACITORES**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.  
Área de concentração: Automação

Data: 22/10/2016

Resultado: Aprovado

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes

Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Leonardo Mesquita

Assinatura: \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho à minha esposa Sandra Regina, meus filhos Roger Baroni e Henzo Baroni.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela saúde e força interior na superação das dificuldades, por me mostrar o caminho nos momentos de incertezas, por me ensinar que a cada dia podemos recomeçar e construir um novo fim. Obrigado meu Deus pela oportunidade da escolha e acima de tudo, obrigado pela vida.

Agradeço à minha esposa Sandra, meus filhos Roger Baronni e Henzo Baronni, pelo apoio e compreensão da minha ausência, pelo esforço dedicado para que eu pudesse superar cada obstáculo.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis, pela sua orientação, conduzida com muito profissionalismo e dedicação. Sua fundamentação teórica aliada ao domínio da prática foi de extrema importância para a conclusão dos objetivos.

Ninguém nasce odiando outra pessoa pela cor de sua pele, por sua origem ou ainda por sua religião. Para odiar, as pessoas precisam aprender, e se podem aprender a odiar, elas podem ser ensinadas a amar.

Nelson Mandela

## RESUMO

Neste estudo serão demonstrados os resultados de uma pesquisa e ensaio em laboratório de uma máquina de indução utilizada na geração de energia elétrica. A pesquisa foi baseada na máquina de indução com rotor tipo gaiola de esquilo com o propósito de explorar as vantagens oferecidas por este equipamento e incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias que viabilizem a aplicação do gerador de indução (GI) como alternativa ao aproveitamento dos potenciais de geração de energia elétrica, como é o caso das centrais de geração eólica e micro usinas hidrelétricas operando isoladas do sistema interligado nacional. Serão abordadas as vantagens e desvantagens desta aplicação comparando-as com o emprego dos geradores síncronos, que é o equipamento destinado para tal finalidade. O objetivo do estudo é avaliar a viabilidade da aplicação do GI em substituição aos geradores síncronos como alternativa de redução de custos na implantação de micro usinas de geração de energia elétrica em áreas rurais afastados dos centros de geração e distribuição e permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais. Primeiramente foram realizados os testes em vazio e rotor bloqueado a fim de determinar os parâmetros da máquina de indução. Em seguida foram realizados vários ensaios utilizando a máquina de indução na função gerador, com diferentes valores de cargas, capacitores para fornecimento de energia reativa, variação da velocidade do gerador, entre outros. Para os ensaios foram utilizados uma máquina de indução de 2,2 KW na função gerador, banco de capacitores, cargas resistivas, instrumentos de medição, motor de corrente contínua e gerador síncrono para emulação da máquina primária.

**Palavras-chave:** Energia elétrica. Novas tecnologias. Gerador de indução. Usinas hidrelétricas.

## ABSTRACT

In this study will be demonstrated the results of research and testing in the laboratory of an induction machine used to generate electricity. The research was based on the squirrel cage rotor induction machine in order to exploit the advantages offered by this product and encourage the development of new technologies that make possible the application of induction generator as an alternative to the use of the potential of power electric generation, as in the case of plants of wind power and micro hydro power plants operating isolated from the national grid. The advantages and disadvantages of this application comparing them with the use of synchronous generators, which is the equipment used for this purpose will be addressed. The objective of the study is to evaluate the feasibility of application of IG to replace the synchronous generators as cost-saving alternative to deploying micro power plants for electricity generation in rural areas away from the generation and distribution centers and allow the appreciation of the characteristics and regional and local potential. Initially no load and locked rotor tests to determine the parameters of the induction machine were performed. Then various tests were performed using the induction machine in the generator function, to different values of load, capacitors for supply reactive power, variation in the generator speed, and others. For the tests were used a 2.2kW induction machine in the generator function, capacitor bank, resistive loads, measuring instruments, DC motor and synchronous generator to emulation primary machine.

**Key words:** Electricity; New Technologies; Induction generation; Hydropower Plants.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz energética Brasileira.....	22
Figura 1.2 - Matriz energética Brasileira.....	22
Figura 1.3 - Evolução do Custo Marginal de Operação - Subsistema Sudeste/Centro-Oeste.....	23
Figura 1.4 - Matriz de Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica.....	25
Figura 2.1 - Circuito simplificado do gerador de indução autoexcitado .....	29
Figura 2.2 - Processo de auto excitação do gerador de indução .....	31
Figura 2.3 - Característica do torque da máquina de indução.....	33
Figura 2.4 - Operação da máquina assíncrona: (a) como motor de indução em carga; (b) como gerador de indução .....	34
Figura 2.5 - Máquina assíncrona funcionando como gerador .....	35
Figura 2.6 - Diagrama fasorial da máquina assíncrona funcionando como motor.....	36
Figura 2.7 - Circuito equivalente do rotor. ....	37
Figura 2.8 - Diagrama fasorial - Máquina assíncrona operando como gerador.....	40
Figura 2.9 - Unifilar representando o fluxo de potência em um sistema elétrico de potência, sem controle de energia reativa.....	41
Figura 2.10 - Unifilar representando o fluxo de potência em um sistema elétrico de potência, com controle de energia reativa.....	42
Figura 2.11 - Comportamento da tensão de entreferro em função da variação da frequência síncrona.....	46
Figura 2.12 - Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução .....	47
Figura 2.13 - Circuito equivalente monofásico da máquina de indução com os componentes do rotor referidos ao estator.....	48
Figura 2.14 - Circuito equivalente monofásico com os componentes do rotor referidos ao estator – desmembramento da resistência $R'r/s$ (autoria própria) .....	49
Figura 3.1 - Dissipação térmica do motor de indução .....	54
Figura 3.2 - Lâmina de material ferromagnético do estator e rotor.....	56
Figura 3.3 - Núcleo do estator com seis ranhuras, Faculdade de Engenharia de Sorocaba – Máquinas Elétricas.....	56
Figura 3.4 - Rotor gaiola de esquilo .....	57
Figura 3.5 - Perdas na máquina de indução na operação como motor .....	59

Figura 3.6 - Perdas em função da carga .....	61
Figura 3.7 - Rendimento em função da potência de saída.....	64
Figura 4.1 - Bancada de ensaio .....	65
Figura 4.2 - Bancada de ensaio .....	65
Figura 4.3 - Circuito equivalente no ensaio em vazio.....	67
Figura 4.4 - Ensaio a vazio.....	70
Figura 4.5 - Circuito equivalente no ensaio de rotor bloqueado .....	71
Figura 5.1 - Determinação da faixa de capacitância para fornecimento de energia reativa .....	74
Figura 5.2 - Determinação da faixa de capacitância .....	76
Figura 6.1 - Determinação da faixa de capacitância .....	79
Figura 6.2 - Frequência e tensão no gerador em função da carga.....	79
Figura 6.3 - Corrente em função da carga .....	80
Figura 6.4 - Variação da tensão de linha na carga para diferentes valores de capacitância .....	82
Figura 6.5 - Variação da frequência em função da carga para diferentes valores de capacitância .....	82
Figura 6.6 - Resultados dos ensaios .....	83
Figura 6.7 - Resultados dos ensaios .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil .....	24
Tabela 2.1 - Comparação entre características do motor de indução/síncrono ...	28
Tabela 4.1 - Resultados do ensaio a vazio .....	68
Tabela 4.2 - Ensaio de rotor bloqueado .....	71
Tabela 4.3 - Distribuição empírica de reatância de dispersão em motores de indução .....	72
Tabela 4.4 - Relação de equipamentos para bancada de ensaios .....	73
Tabela 6.1 - Resultados do ensaio com banco de capacitores de 35 $\mu$ F .....	78
Tabela 6.2 - Resultados do ensaio com banco de capacitores de 40 $\mu$ F .....	81

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Frequência do gerador de indução .....	30
Equação 2.2 - Velocidade angular do rotor do gerador de indução .....	30
Equação 2.3 - Velocidade relativa.....	32
Equação 2.4 - Escorregamento.....	32
Equação 2.5 - Forças induzidas no rotor (Forças de Lorentz) .....	33
Equação 2.6 - Perdas no motor de indução em vazio .....	35
Equação 2.7 - Corrente do rotor da máquina assíncrona (componente ativa) .....	37
Equação 2.8 - Corrente do rotor da máquina assíncrona (componente reativa) ....	37
Equação 2.9 - Corrente do rotor da máquina assíncrona .....	37
Equação 2.10 - Corrente do rotor da máquina assíncrona (em módulo) .....	37
Equação 2.11 - FEM rotórica na condição de operação .....	38
Equação 2.12 - Reatância do rotor.....	38
Equação 2.13 - Impedância do rotor .....	38
Equação 2.14 - Impedância do rotor .....	38
Equação 2.15 - Ângulo do fator de potência .....	38
Equação 2.16 - Fator de potência do rotor.....	38
Equação 2.17 - Seno do ângulo do fator de potência .....	38
Equação 2.18 - Corrente do rotor (componente ativa) .....	39
Equação 2.19 - Corrente do rotor (componente reativa) .....	39
Equação 2.20 - Potência ativa (motor de indução) .....	39
Equação 2.21 - Potência reativa (motor de indução) .....	39
Equação 2.22 - Potência ativa (gerador de indução) .....	39
Equação 2.23 - Potência reativa (gerador de indução) .....	39
Equação 2.24 - Frequência do rotor em (Hz) .....	43
Equação 2.25 - Tensão induzida no rotor .....	44
Equação 2.26 - Torque no motor de indução .....	45
Equação 2.27 - Perdas mecânicas.....	48
Equação 2.28 - Perdas Joule na máquina de indução .....	49
Equação 2.29 - Corrente do estator .....	49
Equação 2.30 - Perdas Joule no rotor.....	50
Equação 2.31 - Escorregamento .....	50

Equação 2.32 - Resistência que representa as perdas no ferro .....	51
Equação 2.33 - Reatância de magnetização por fase.....	51
Equação 2.34 - Perdas no ferro .....	51
Equação 3.1 - Potência elétrica (ativa).....	62
Equação 3.2 – Potência eletromagnética.....	62
Equação 3.3 - Perda do cobre no estator.....	62
Equação 3.4 - Perda do cobre no rotor .....	62
Equação 3.5 - Perdas mecânicas.....	62
Equação 3.6 - Perdas mecânicas.....	62
Equação 3.7 - Perdas eletromagnéticas .....	62
Equação 3.8 - Potência mecânica útil .....	62
Equação 3.9 – Rendimento do motor de indução .....	63
Equação 4.1 - Resistência que representa as perdas no ferro.....	69
Equação 4.2 - Reatância de magnetização.....	69
Equação 4.3 - Perdas no ferro .....	69
Equação 4.4 - Potência de rotor bloqueado .....	72
Equação 4.5 - Resistência de rotor bloqueado.....	72
Equação 4.6 - Impedância de rotor bloqueado.....	72
Equação 4.7 - Reatância de rotor bloqueado.....	72
Equação 4.8 - Reatância de rotor bloqueado.....	72
Equação 4.9 - Reatância de rotor bloqueado.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*ANEEL* - Agência Nacional de Energia Elétrica;

*MME* - Ministério de Minas e Energia;

*PROCEL* - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica;

*PROINFA* - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica;

*BEN* - Balanço Energético Nacional;

*CMO* - Custo Marginal de Operação;

*ONS* - Operador Nacional do Sistema;

*UNITAU* - Universidade de Taubaté;

*GI* - Gerador de Indução;

*W* - Unidade de medida de potência elétrica (potência ativa);

*KW* - Unidade de medida de potência elétrica (potência ativa);

*MW* - Unidade de medida de potência elétrica (potência ativa);

*MWh* - Unidade de medida de potência elétrica baseado no tempo (potência ativa);

*TWh* - Unidade de medida de potência elétrica baseado no tempo (potência ativa);

*KVA* - Unidade de medida de potência elétrica (potência aparente);

*P* - Potência ativa [KW];

*S* - Potência aparente [KVA];

$P_{mec}$  - Potência mecânica [KW];

$P_m$  - Potência mecânica [KW];

$P_{mec\ útil}$  - Potência mecânica útil [KW];

$P_{in}$  - Potência de entrada [KW];

$P_e$  - Potência de entrada [KW];

$P_{out}$  - Potência de saída [KW];

$P_{gap}$  - Potência de entreferro [KW];

$P_{rb}$  - Potência de rotor bloqueado [KW];

*hp* - Unidade de medida de potência elétrica (horse Power);

*CV* - Unidade de medida de potência elétrica (cavalo vapor);

*FP* - Fator de Potência;

$\mu$  - Rendimento [%];

$P_{em}$  - Perdas eletromagnéticas [KW];

$P_{mec}$  - Perdas mecânicas [KW];

$P_j$  - Perdas Joule no motor [KW];

$P_{fe}$  - Perdas no ferro [KW];

$P_{rotor}$  - Perdas Joule no rotor [KW];

$P_{cu}$  - Perdas no cobre [KW];

$P_{cu,s}$  - Perdas no cobre do estator [KW];

$P_{cu,r}$  - Perdas no cobre do rotor [KW];

$P_{a,v}$  - Perdas por atrito e ventilação [KW];

$P_a$  - Perdas adicionais [KW];

CA - Corrente Alternada [A];

CC - Corrente Contínua [A];

VCA - Unidade de medida da tensão elétrica em corrente alternada;

A - Unidade de medida de corrente elétrica (Ampère);

I - Corrente elétrica [A];

$I_f$  - Corrente de fase [A];

$I_p$  - Corrente de partida [A];

$I_n$  - Corrente nominal [A];

$I_g$  - Corrente no gerador de indução [A];

$I_c$  - Corrente no banco de capacitores [A];

$I_l$  - Corrente na carga [A];

$I_m$  - Corrente de magnetização [A];

$I_{mf}$  - Corrente de magnetização por fase [A];

$I_{fe}$  - Corrente que atravessa a resistência associada às perdas no material ferromagnético [A];

V - Unidade de medida da tensão elétrica (Volt);

$V_f$  - Tensão de fase [V];

$V_L$  - Tensão de linha [V];

$V_e$  - Tensão de entreferro [V];

$V_r$  - Tensão induzida no rotor [V];

$V_{rb}$  - Tensão induzida com rotor bloqueado [V];

FEM - Força Eletromotriz [V];

FCEM - Força Contra Eletromotriz [V];

E1 - FCEM induzida pelo fluxo de entreferro [V];

$E_2$  - Tensão induzida no rotor [V];

$\Omega$  - Unidade de medida de resistência elétrica (Ohms);

$R$  - Resistência elétrica [ $\Omega$ ];

$R_s$  - Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];

$R_r$  - Resistência das barras do rotor [ $\Omega$ ];

$R'_r$  - Resistência das barras do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];

$R_1$  - Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];

$R_2$  - Resistência das barras do rotor [ $\Omega$ ];

$R'_2$  - Resistência das barras do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];

$R_{fe}$  - Resistência que representa a perda no ferro [ $\Omega$ ];

$R_{rb}$  - Resistência de rotor bloqueado [ $\Omega$ ];

$X_s$  - Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];

$X_r$  - Reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];

$X'_r$  - Reatância de dispersão do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];

$X_1$  - Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];

$X_2$  - Reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];

$X'_2$  - Reatância de dispersão do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];

$X_m$  - Reatância de magnetização [ $\Omega$ ];

$X_{mf}$  - Reatância de magnetização por fase [ $\Omega$ ];

$X_{vz}$  - Reatância em vazio [ $\Omega$ ];

$X_{rb}$  - Reatância de rotor bloqueado [ $\Omega$ ];

$X_c$  - Reatância capacitiva [ $\Omega$ ];

$Z_{rb}$  - Impedância de rotor bloqueado [ $\Omega$ ];

$n$  - Velocidade rotativa [RPM];

$n_s$  - Velocidade síncrona [RPM];

$n_r$  - Velocidade do rotor [RPM];

$n_2$  - Velocidade relativa, diferença entre velocidade síncrona e velocidade do rotor [RPM];

$RPM$  - Unidade de medida de velocidade rotativa (Rotações Por Minuto);

$\omega$  - Velocidade angular [rad/s];

$\omega_s$  - Velocidade angular síncrona [rad/s];

$\omega_r$  - Velocidade angular do rotor [rad/s];



$\omega_2$  - Velocidade angular relativa, diferença entre velocidade angular síncrona e velocidade angular do rotor [rad/s];

$s$  - Escorregamento [%];

$Hz$  - Unidade de medida de frequência (Hertz);

$f$  - Frequência [Hz];

$f_s$  - Frequência síncrona [Hz];

$f_r$  - Frequência do rotor [Hz];

$f_2$  - Frequência relativa, diferença entre a frequência síncrona e frequência do rotor [Hz];

$T$  - Torque [Nm];

$T_{mec}$  - Torque mecânico [Nm];

$Nm$  - Unidade de medida de torque mecânico (Newton metro);

$^{\circ}C$  - Unidade de medida de temperatura (grau Celsius);

$F$  - Unidade de medida de capacitância (Farad);

$\mu F$  - Unidade de medida de capacitância (micro Farad);

$C$  - Capacitância [F];

$t$  - Temperatura [ $^{\circ}C$ ];

$t_a$  - Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ];

$t_{max}$  - Temperatura máxima [ $^{\circ}C$ ];

$t_{ext}$  - Temperatura externa [ $^{\circ}C$ ];

$mm$  - Unidade de medida de comprimento (milímetro);

$\pi$  - Constante (3,1416);

$pp$  - Par de polos.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Contextualização .....	20
1.2 Formulação do Problema .....	21
1.3 Justificativa .....	25
1.4 Objetivo .....	26
2 A MÁQUINA DE INDUÇÃO .....	27
2.1 Gerador de indução.....	27
2.2 Gerador de indução autoexcitado .....	29
2.3 Escorregamento e velocidade do rotor .....	31
2.4 Análise da máquina de indução sob carga.....	33
2.5 Diagrama vetorial da máquina assíncrona .....	35
2.6 Análise do fluxo de potência na máquina assíncrona.....	40
2.7 Frequência e tensão induzida.....	43
2.8 Regulação de tensão/frequência e torque .....	44
2.9 Circuito equivalente.....	46
3 PERDAS E RENDIMENTO .....	52
3.1 Agentes químicos .....	52
3.2 Agentes mecânicos .....	53
3.3 Agentes térmicos .....	53
3.4 Agentes elétricos .....	55
3.4.1 Perdas magnéticas.....	55
3.4.1.1 Núcleo magnético.....	56
3.4.1.2 Barramento da gaiola .....	57
3.4.2 Perdas por efeito joule .....	58
3.4.3 Perdas mecânicas .....	58
3.4.4 Rendimento .....	63
4 ENSAIOS PRÁTICOS.....	65
4.1 Ensaio em vazio.....	66
4.2 Ensaio com rotor bloqueado .....	70
4.3 Equipamentos da bancada de ensaios .....	73
5 CAPACITÂNCIA REQUERIDA .....	74
6 RESULTADOS .....	77

7 CONCLUSÃO .....	86
8 TRABALHOS FUTUROS .....	87
REFERÊNCIAS .....	88

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Nos últimos anos tem-se observado grandes alterações climáticas em todo o planeta, sendo a queima de combustíveis fósseis um dos principais motivos causadores de tal fenômeno. O resultado da emissão de determinados gases na atmosfera tem provocado o aquecimento do planeta (efeito estufa). Entidades especializadas no assunto têm atribuído tais alterações ao progresso desenfreado e desenvolvimento econômico não sustentável. A geração de energia elétrica, por meio das usinas termelétricas e hidrelétricas, enquadra-se entre os empreendimentos que produzem impactos ecológicos. A crescente demanda por energia elétrica tem sido uma grande preocupação para os órgãos do setor elétrico, sejam: consumidores industriais, comerciais e residenciais. Soluções como construção de grandes centrais de geração de energia elétrica demandam muito tempo, grandes investimentos, e são ecologicamente inviáveis. Recursos naturais próximos aos centros consumidores, não mais existem. É, portanto, necessário que se adotem alternativas baseadas em novas tecnologias de produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis. O Brasil é um país com potencial para geração de energia elétrica em grande escala, pois possui bacias hidrográficas favoráveis à construção de usinas hidrelétricas. Entretanto faltam investimentos para exploração de unidades com menor capacidade de geração, como é o caso das pequenas e micros centrais hidrelétricas, ou ainda sistemas de geração isolados do sistema interligado, que possam fornecer energia limpa a baixo custo para localidades afastadas dos sistemas de distribuição. Muito se tem estudado a respeito dos sistemas de geração de energia de baixos custos de implantação e manutenção, visando à substituição dos sistemas de geração convencionais. Considerando estes aspectos, o principal objetivo deste estudo é avaliar o desempenho da aplicação das máquinas de indução com rotor tipo gaiola de esquilo na operação como gerador de indução. Estudos e pesquisas comprovam que apesar do gerador de indução possuir rendimento bem inferior ao gerador síncrono, à utilização deste torna-se viável em pequenas instalações devido ao baixo custo de aquisição, manutenção reduzida, simplicidade na construção e robustez da máquina [9].

## 1.2 Formulação do Problema

A expansão acentuada do consumo de energia elétrica aliada à escassez das fontes de geração convencionais, incluindo redução contínua do limitado recurso dos combustíveis fósseis tem sido motivo de preocupação dos órgãos responsáveis pelo setor de abastecimento de energia elétrica no Brasil e em todo o mundo. Com a evolução tecnológica, apesar dos equipamentos de auto desempenho, a cada ano tem-se evidenciado crescentes aumentos na demanda por energia elétrica, o que em determinados períodos do ano, considerando-se as fontes convencionais (hídricas), tem provocado um déficit entre setor de geração e consumo. As usinas termelétricas, movidas a combustíveis fósseis, têm um papel importante para o Operador Nacional do Sistema (ONS), elas suprem o déficit de demanda em períodos com falta de chuvas, porém as mesmas possuem elevado custo de geração além da emissão dos gases de efeito estufa. Diversos países têm adotado medidas para contenção do uso da energia elétrica sem comprometer o desenvolvimento econômico e tecnológico. Uma das contramedidas é o estímulo ao uso eficiente da demanda disponível, combatendo o desperdício, através da utilização de equipamentos de melhor rendimento e incentivo ao desenvolvimento de tecnologias que proporcionem a fabricação de máquinas de melhor desempenho. Países como Canadá e Estados Unidos adotaram medidas que interditam a importação de motores de baixa tensão com rendimentos inferiores a determinados valores [10]. No Brasil, em 1995 o Ministério de Minas e Energia (MME) criou o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Na última década, com o aquecimento da economia do país, a demanda por energia elétrica aumentou exponencialmente, causando preocupações nos órgãos do governo responsáveis pelo setor. Preocupado com esta situação, em 2004 o Ministério de Minas e Energia lançou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) [7]. O objetivo é promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais.

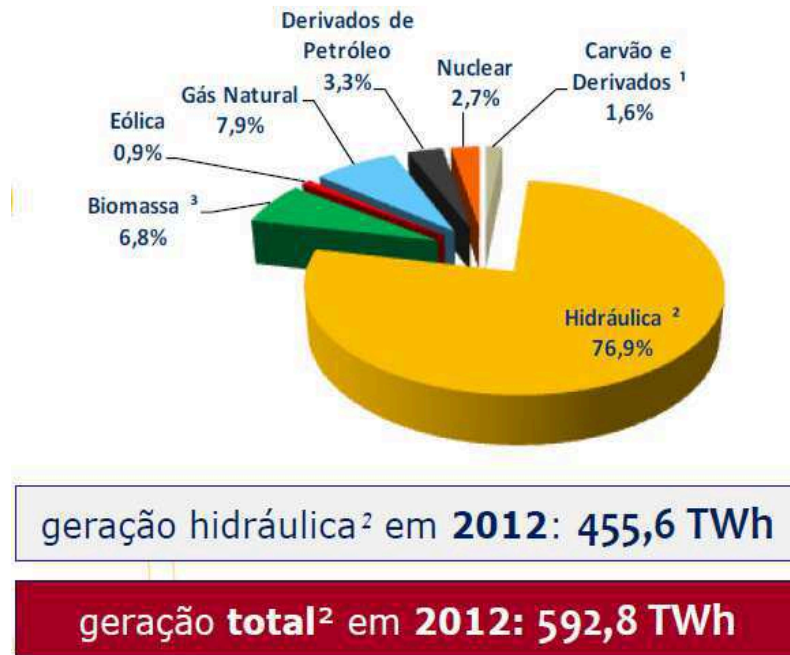


Figura 1.1: Matriz energética Brasileira

Fonte: MME, 2012

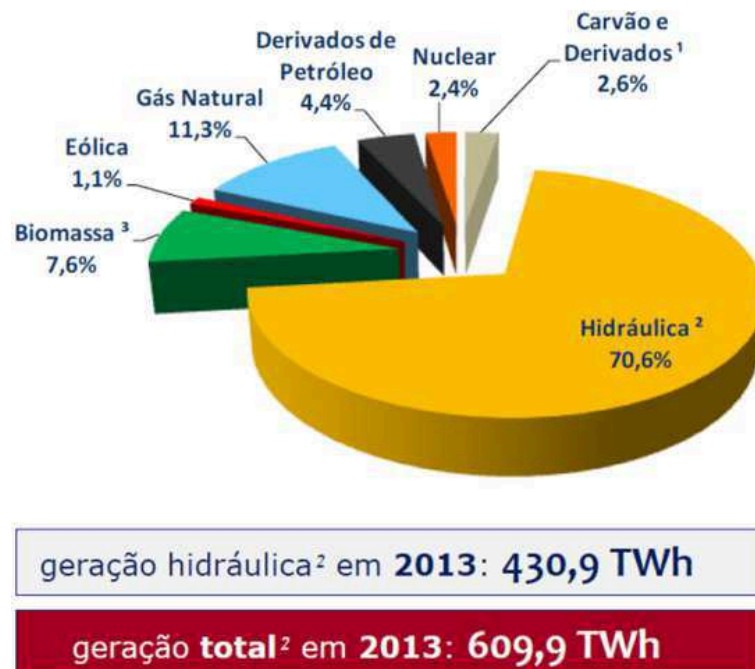


Figura 1.2: Matriz energética Brasileira

Fonte: MME, 2013

Os gráficos das Figuras 1.1 e 1.2 ilustram o panorama de geração de energia elétrica no Brasil nos anos de 2012 e 2013, segundo relatório “Balanço Energético Nacional” (BEN) [7]. Comparando-se os resultados do referido período, nota-se que houve uma redução significativa no percentual de geração de energia hidráulica, não em função da redução da energia gerada pelas usinas hidrelétricas, mas em função de maior utilização das usinas térmicas, alimentadas por gás natural e derivados de petróleo. Apesar de maior custo de geração, as usinas térmicas é um recurso utilizado pelo setor de geração para suprir o déficit e se evitar o colapso no sistema de geração e distribuição de energia, pois mais de 70% da energia gerada no país são provenientes das usinas hidrelétricas que estão com os níveis dos reservatórios bem abaixo do valor quando comparados com anos anteriores. Analisando os dados da ONS, Figura 1.3, fica evidente o aumento nos custos de geração a cada ano.

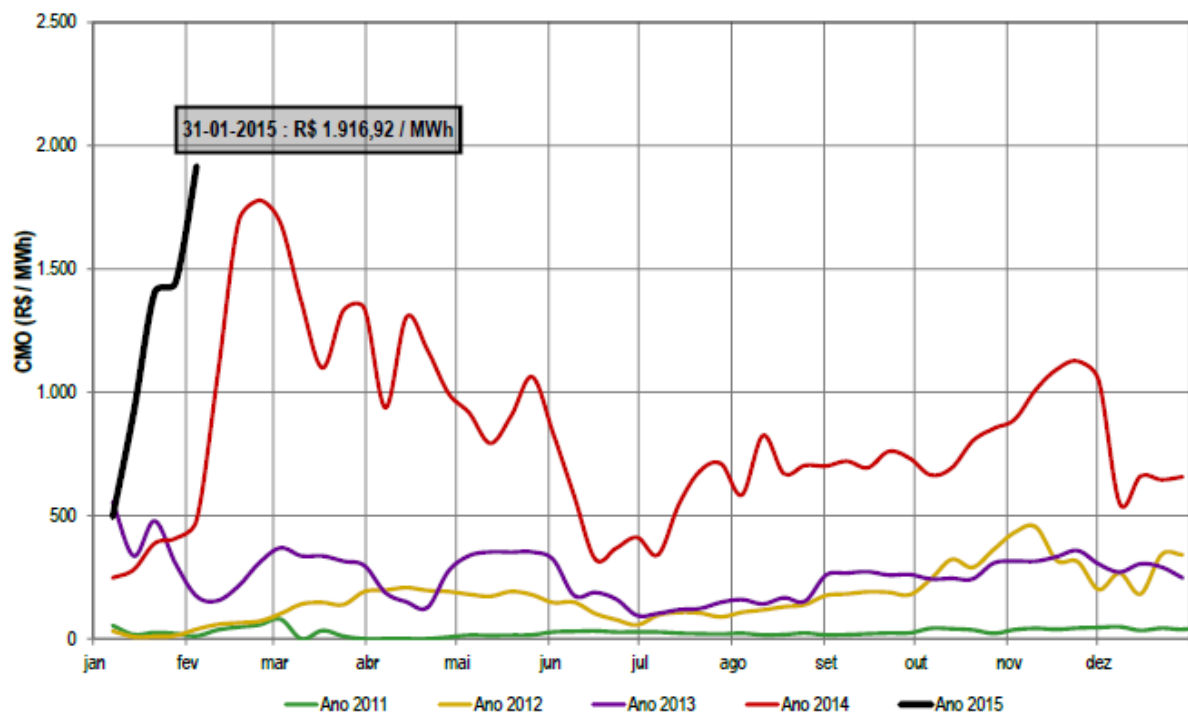


Figura 1.3: Evolução do Custo Marginal de Operação - Subsistema Sudeste/Centro-Oeste

Fonte: ONS, 2015

Na última década o Brasil viveu um momento de expansão econômica acentuada. A oferta de energia oriunda das usinas hidrelétricas não tem acompanhado com a mesma velocidade a demanda de consumo, sendo necessário

operar com as usinas térmicas. Esta medida até então necessária, tem impactado no Custo Marginal de Operação (CMO), que é a variação do custo operativo necessário para atender um MWh adicional de demanda, utilizando os recursos existentes [7]. A Figura 1.3 apresenta o histórico da variação nos últimos quatro anos, enfatizando o crescente aumento em 2014 em função da falta de chuvas no período. Pelos dados apresentados, fica claro que se o Brasil retomar os índices de crescimento de anos anteriores, a base instalada terá dificuldades em atender a demanda solicitada.

No mês de janeiro de 2015 a capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 134.008 MW. Em comparação com o mesmo mês em 2014, houve expansão de 3.277 MW de geração de fonte hidráulica, de 1.429 MW de fontes térmicas e de 2.729 MW de geração eólica, porém o percentual de geração pelas fontes térmicas foi superior à expansão de geração hidráulica, resultando na queda do percentual de geração hidráulica para 66,6% (MME – Ministério de Minas e Energia). Este cenário pode ser visto na Tabela 1.1 e Figura 1.4.

Tabela 1.1 - Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil

Fonte	Jan/14	Jan/15			Evolução da Capacidade Instalada (Jan/15 / Jan/14)
	Capacidade Instalada (MW)	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	% Capacidade Instalada	
<b>Hidráulica</b>	<b>85.950</b>	<b>1.158</b>	<b>89.227</b>	<b>66,6%</b>	<b>3,8%</b>
<b>Térmica</b>	<b>38.357</b>	<b>1.891</b>	<b>39.786</b>	<b>29,7%</b>	<b>3,7%</b>
Gás Natural	13.896	122	12.776	9,5%	-8,1%
Biomassa	11.410	504	12.341	9,2%	8,2%
Petróleo *	7.672	1.241	9.085	6,8%	18,4%
Carvão	3.389	22	3.593	2,7%	6,0%
Nuclear	1.990	2	1.990	1,5%	0,0%
<b>Eólica</b>	<b>2.252</b>	<b>232</b>	<b>4.981</b>	<b>3,7%</b>	<b>121,2%</b>
<b>Solar Fotovoltaica</b>	<b>5</b>	<b>317</b>	<b>15</b>	<b>0,01%</b>	<b>206,9%</b>
<b>Capacidade Total - Brasil</b>	<b>126.563</b>	<b>3.598</b>	<b>134.008</b>	<b>100,0%</b>	<b>5,9%</b>

Fonte: ANEEL, 2015



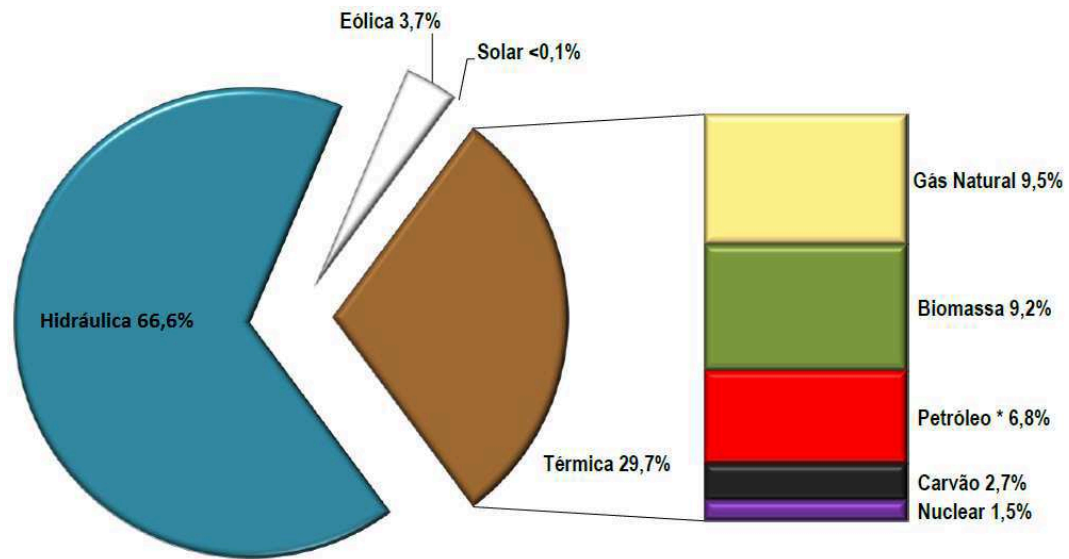


Figura 1.4: Matriz de Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica

Fonte: ANEEL, Jan/2015

### 1.3 Justificativa

Este trabalho foi motivado pelo interesse do autor em um estudo aprofundado das características técnicas/construtivas e desempenho da máquina de indução com rotor tipo gaiola de esquilo, objetivando a aplicação da mesma no aproveitamento de fontes convencionais de geração de energia elétrica em aplicações isoladas afastadas dos centros de distribuição com potências de até 100KW. O tema exposto tem sido objeto de pesquisa de muitos estudiosos, pois os equipamentos convencionais destinados a este tipo de aplicação possuem elevados custos de aquisição e manutenção, inviabilizando a exploração das unidades de menor capacidade de geração. A expansão acentuada do consumo de energia, embora seja um indicador de melhoria na qualidade de vida e aquecimento econômico, tem efeitos negativos para o setor de abastecimento. As fontes convencionais de geração estão se esgotando. Construção de grandes centrais de geração está praticamente inviável devido aos efeitos colaterais que as mesmas causam ao meio ambiente. A busca por fontes renováveis de geração é uma necessidade, o gerador de indução é um dos equipamentos que possui características técnicas/econômicas extraordinárias na exploração destes recursos, embora apresente problemas na regulação da tensão e frequência.

## 1.4 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo comprovar através de ensaios práticos, explorando o fenômeno da autoexcitação, o comportamento da máquina de indução com rotor tipo gaiola de esquilo na função gerador autoexcitado, além de fomentar o interesse de pesquisadores no desenvolvimento de tecnologias que viabilize a aplicação do gerador de indução, aproveitando as vantagens deste extraordinário equipamento. A busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, haja visto que as fontes convencionais de geração (hidrelétricas) estão praticamente esgotadas ou causam impactos ambientais de grande magnitude. A escassez deste recurso natural preocupa consumidores e agentes do setor, pois as unidades de geração não tem acompanhado com a mesma velocidade a crescente demanda por energia, indispensável para o crescimento econômico e tecnológico. A máquina de indução possui características interessantes para o tipo de aplicação em estudo, apesar das deficiências apresentadas na regulação de tensão e frequência. De acordo com o trabalho apresentado por Chapallaz, 1990, o gerador de indução pode ser uma opção técnica e economicamente viável para potências de até 100KVA.

As análises foram efetuadas a partir dos resultados obtidos nas diversas simulações com velocidade constante, carga variável e diferentes valores para o banco de capacitores em uma arquitetura *stand alone* (operando desconectado da rede elétrica).

Busca-se também a apresentação de um método prático para cálculo do banco de capacitores, o qual desempenha importante função no sistema, pois além de fornecer energia reativa para magnetização do gerador de indução, o mesmo pode ser utilizado para correção do nível de tensão nos terminais do estator.

## 2 A MÁQUINA DE INDUÇÃO

### 2.1 Gerador de indução

O motor de indução trifásico é a máquina elétrica de corrente alternada mais utilizada em acionamentos de equipamentos eletromecânicos. Seu princípio de funcionamento é baseado na geração de um campo magnético com rotação constante (campo girante) [5]. Este campo magnético interage com as barras do rotor e anéis que curto-circuitam as mesmas nas extremidades do rotor. A interação entre campo magnético e barras do rotor induz tensões nas mesmas e pelo fato de estarem curto-circuitadas por anéis nas extremidades, haverá um fluxo de corrente nas barras, produzindo um campo magnético no rotor. A interação entre os campos magnéticos do estator e rotor dará origem ao torque. Na função gerador, a máquina de indução é acionada por uma máquina primária, que pode ser uma turbina hidráulica, um motor de combustão interna ou mesmo uma roda d'água. Este estudo é baseado na máquina de indução com rotor tipo gaiola de esquilo, de forma a explorar as características técnicas deste extraordinário equipamento, vislumbrando a aplicação do mesmo em pequenos empreendimentos para geração de energia elétrica onde os recursos financeiros para aquisição de equipamentos de alto desempenho são limitados. Dentre as principais vantagens oferecidas por este equipamento, destacam-se a robustez, baixo custo de instalação/manutenção e simplicidade de instalação.

Embora apresente inúmeras vantagens, quando comparado com os sofisticados geradores síncronos, o gerador de indução, sem nenhuma técnica adicional para controle, não possui as características ideais para operar em sistemas isolados (desconectado das redes de distribuição), pois possui má regulação de tensão e frequência em função da variação de velocidade da máquina primária e principalmente pela influência exercida pela potência da carga, mesmo quando acionado com velocidade constante [6]. Portanto, para exploração das vantagens oferecidas por esta máquina, se faz necessário o uso de mecanismos de controle para regulação da tensão e frequência. O desenvolvimento desta tecnologia tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores. Atualmente, com a evolução tecnológica dos dispositivos eletrônicos, principalmente dos dispositivos semicondutores de potência, é

possível fazer a regulação de tensão e frequência empregando técnicas simples de controle com custos reduzidos, quando comparados com os sofisticados e dispendiosos reguladores de velocidade e tensão. Muito se tem estudado a respeito destas técnicas como forma de viabilizar e obter o melhor desempenho dos geradores de indução neste tipo de aplicação.

Tabela 2.1 - Comparação entre características do motor de indução/síncrono

TIPO	MOTOR DE INDUÇÃO	MOTOR SÍNCRONO
Projeto	Rotor Gaiola	Rotor Bobinado
Alimentação do Estator	Rede trifásica CA	Rede trifásica CA
Alimentação do Rotor	CA sempre por indução	Excitação CC pelo sistema brushless, sem a utilização de escovas Excitação CC por excitatriz estática, com a utilização de escovas
Velocidade	Próxima da velocidade síncrona, quase constante, variando com a carga	Sempre igual a velocidade síncrona, constante independentemente da carga
Escorregamento	Geralmente a plena carga $\leq 5\%$	Sempre = 0
Fator de Potência	Sempre indutivo	Unitário, se excitação normal Indutivo, se subexcitado Capacitivo, se superexcitado
Rendimento	Bom	Ótimo com o FP = 1
Corrente de Partida $I_p / I_n$	Alta, para rotor gaiola Baixa, para rotor bobinado	Baixo, para enrolamento amortecedor tipo rotor gaiola Alto, para enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado
Equipamento de Partida	Se rotor gaiola, não precisa Se rotor bobinado, reostato trifásico	Enrolamento amortecedor tipo gaiola Enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado e reostato trifásico
Manutenção	Se rotor gaiola, pequena Se rotor bobinado, frequente nos anéis	Se enrolamento amortecedor gaiola e excitação sem escovas, pequena Se enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado e excitação com escovas, frequente nos anéis
Custo	Baixo, com rotor gaiola Alto, com rotor bobinado	Alto, com enrolamento amortecedor tipo rotor gaiola Muito alto, com enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado

## 2.2 Gerador de indução autoexcitado

O Gerador de indução autoexcitado é a máquina de indução comum, excitada por banco de capacitores conectados aos terminais do estator, operando no joelho da curva de saturação. A combinação desta tecnologia aliada a recursos de controle suprem a deficiência de regulação da tensão e frequência, recaindo na escolha ideal para a produção de eletricidade em sistemas isolados. O gerador de indução é autoexcitado utilizando-se banco de capacitores externo. Uma vez que o rotor já dispõe de um pequeno campo magnético remanescente, é possível à geração de uma pequena tensão inicial. No modo autoexcitado, a frequência e tensão de saída do gerador são afetadas pela velocidade, pela carga e pelo valor da capacitância do banco de capacitores. A Figura 2.1 ilustra o circuito simplificado de um gerador de indução autoexcitado acionado por uma máquina de corrente contínua. O circuito não apresenta um sistema para o controle de velocidade, ou de energia reativa, visto que estes são os principais fatores que influenciam as variações da tensão e frequência nos terminais do estator.

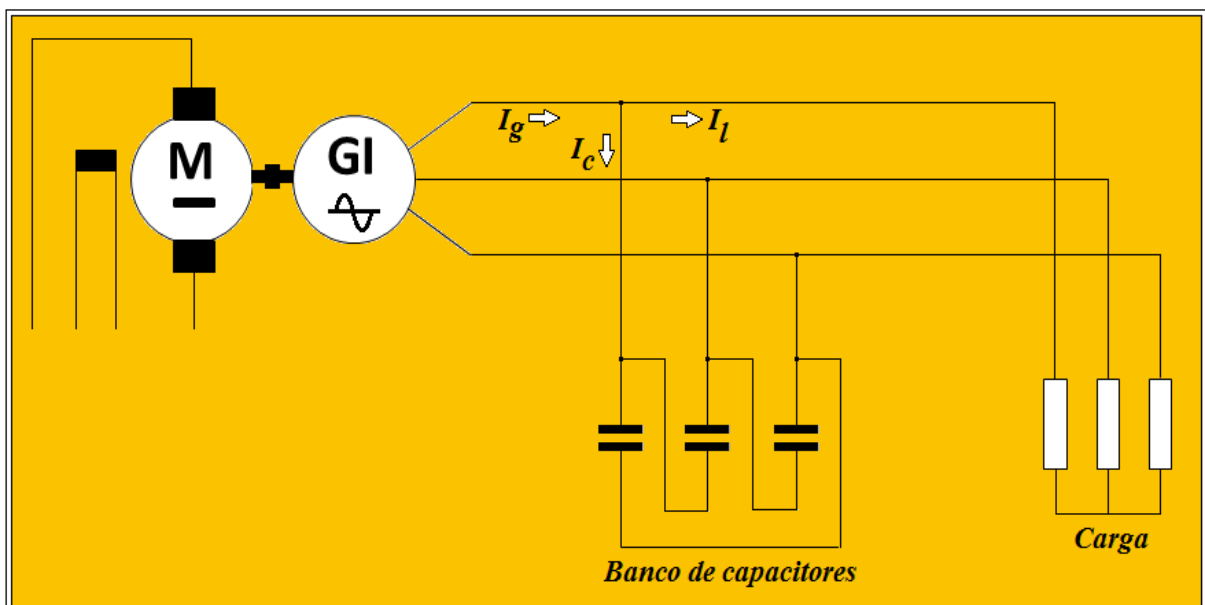


Figura 2.1: Circuito simplificado do gerador de indução autoexcitado

O processo da autoexcitação ocorre quando capacitores são ligados entre os terminais do estator da máquina de indução, que ao ser acionada por uma máquina primária externa, induz tensões nos seus terminais. A força eletromotriz (FEM) e a corrente induzida nos enrolamentos do estator aumentam até que a condição de regime permanente seja atingida. Neste ponto de operação a tensão e corrente estabilizam-se a um dado valor de tensão e frequência. Para que ocorra a autoexcitação, há um valor de capacitância mínima, relacionado a uma velocidade mínima (frequência), sendo esta maior que a velocidade síncrona [8]. Uma vez que o gerador de indução para ser excitado necessita de uma fonte de energia reativa para estabelecer o campo magnético, esta fonte pode ser o sistema elétrico ou um banco de capacitores quando operando em um sistema isolado. Caso o motor perca o magnetismo remanescente este pode ser recuperado pela simples conexão de uma fonte CC nas bobinas do estator.

O processo de autoexcitação para magnetização da máquina de indução está ilustrado na Figura 2.2. A tensão (V) em função da corrente de magnetização ( $I_m$ ) cresce até que o ponto de saturação do núcleo magnético seja atingido. A frequência de saída do gerador autoexcitado é calculada pela Equação (2.1), sendo a velocidade angular dependente desta frequência e pode ser calculada conforme Equação (2.2):

$$f = \frac{1}{2\pi C X_m} \quad (2.1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2)$$

Onde:

- $f$  → Frequência [Hz];
- $C$  → Capacitância [F];
- $X_m$  → Reatância de magnetização [ $\Omega$ ];
- $\omega$  → Velocidade angular [rad/s].

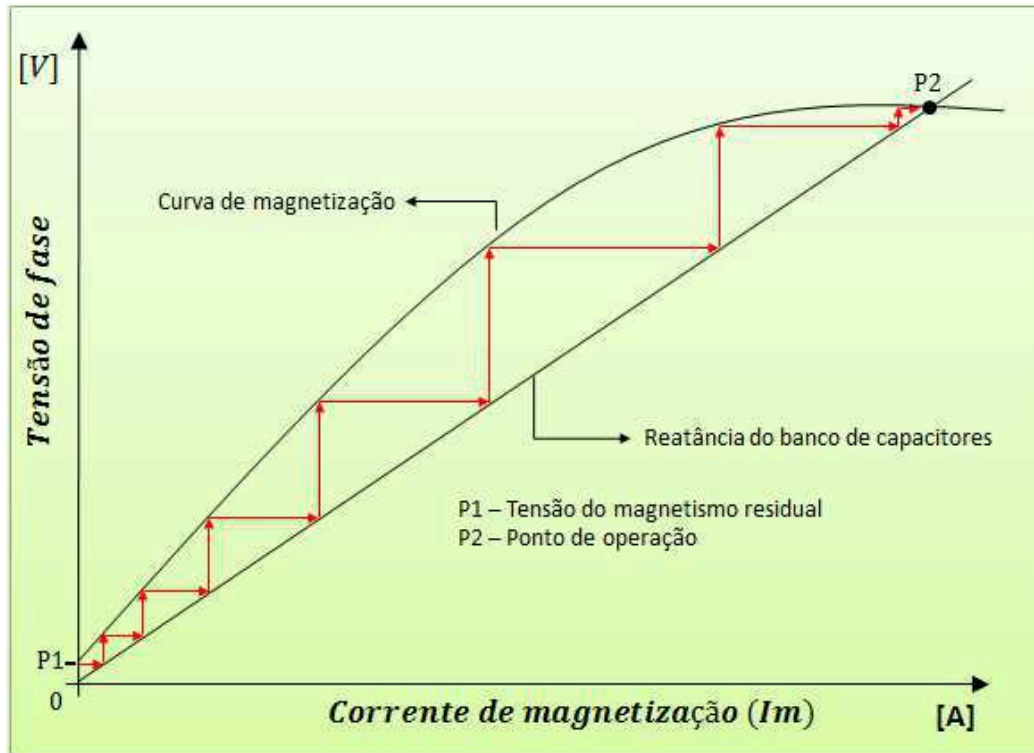


Figura 2.2: Processo de auto excitação do gerador de indução

### 2.3 Escorregamento e velocidade do rotor

Em uma máquina de indução, operando como motor, o campo magnético girante estabelecido no estator, corta as barras das bobinas rotóricas e induz corrente nas mesmas. Quando o rotor está em repouso, a frequência da corrente rotórica é a mesma do campo magnético rotativo do estator. O fluxo de corrente nas espiras formadas pelas barras e anéis de curto circuito produz um campo rotativo similar ao do estator. As interações entre os campos magnéticos estabelecem uma força de acoplamento ou torque nas barras do rotor, impulsionando o movimento do rotor no mesmo sentido do campo magnético do estator. Entretanto, deve sempre haver um movimento relativo entre o campo rotativo do estator e rotor. Se ambos girassem na mesma velocidade, ou seja, na velocidade síncrona, não haveria variação das linhas de fluxo sobre as barras do rotor e, como consequência, não seria induzida corrente no rotor que não produziria o respectivo campo magnético, não existindo torque eletromagnético [1].

Normalmente a velocidade da máquina de indução é quase constante e muito próxima à velocidade do campo girante, havendo apenas uma pequena defasagem que varia de acordo com a carga acoplada ao seu eixo. A diferença entre a velocidade síncrona ( $n_s$ ) e a velocidade do rotor ( $n_r$ ) é denominada velocidade relativa ( $n_2$ ) e representa a velocidade do campo rotativo vista pelo rotor. Relacionando a velocidade relativa ( $n_2$ ) à velocidade síncrona, obtém-se o então chamado escorregamento ( $s$ ), conforme Equação (2.3). O escorregamento também pode ser calculado relacionando-se as frequências da tensão e corrente do rotor e estator conforme pode ser visto a Equação (2.4).

$$n_2 = n_s - n_r \Rightarrow s = \frac{n_2}{n_s} \quad (2.3)$$

$$s = \frac{f_s - f_r}{f_s} \Rightarrow s = \frac{f_2}{f_s} \quad (2.4)$$

- $n_s$     ➔ Velocidade síncrona [RPM];
- $n_r$     ➔ Velocidade do rotor [RPM];
- $n_2$     ➔ Velocidade relativa [RPM];
- $f_s$     ➔ Frequência síncrona [Hz];
- $f_r$     ➔ Frequência do rotor [Hz];
- $f_2$     ➔ Frequência relativa [Hz];
- $s$       ➔ Escorregamento [%].

O escorregamento pode ser negativo, se a velocidade do rotor for acima da velocidade síncrona, nesse tipo de aplicação, a máquina de indução opera como gerador. A Figura 2.3 ilustra o desenvolvimento de torque da máquina de indução para diferentes aplicações, seja operando como motor, gerador ou em frenagens por contracorrente.



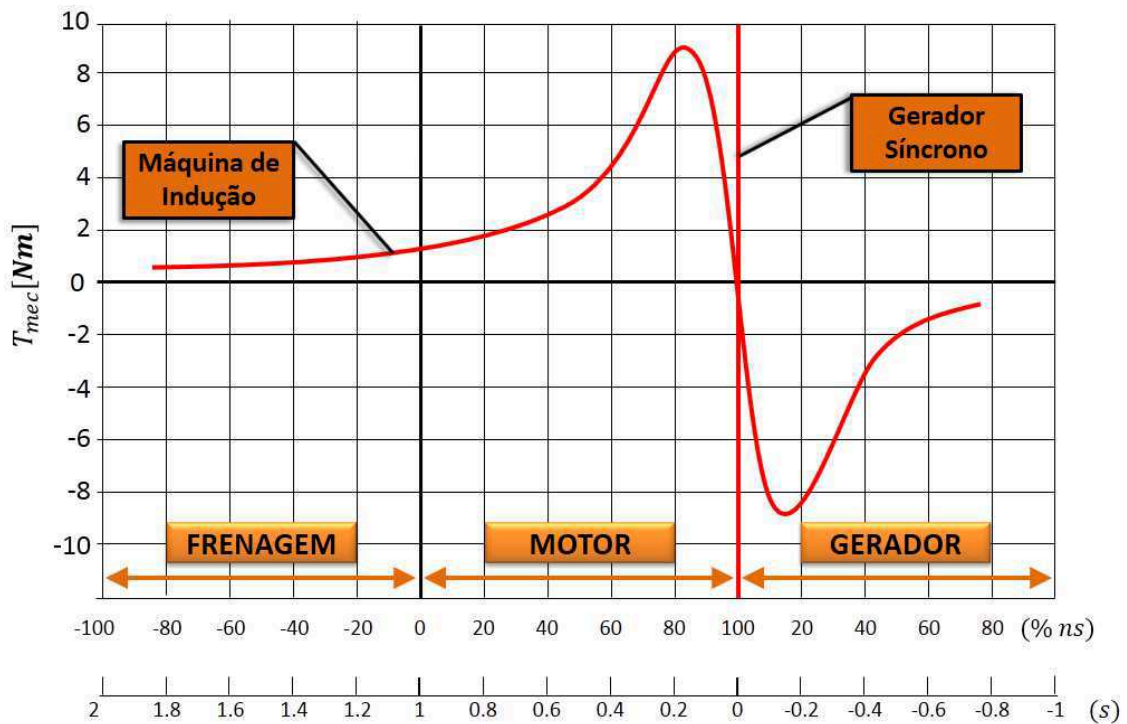


Figura 2.3: Característica do torque da máquina de indução

## 2.4 Análise da máquina de indução sob carga

Se por meio de uma máquina primária, o motor de indução for acelerado até que a velocidade rotórica ( $\omega_R$ ) ultrapasse a velocidade síncrona ( $\omega_s$ ) observa-se alguns efeitos no comportamento operacional da máquina assíncrona:

- O escorregamento fica negativo;
- O sentido em que o campo girante corta as bobinas rotóricas é agora no sentido inverso ao funcionamento como motor;
- A corrente rotórica circula de forma inversa ao modo motor;
- O fluxo de potência ativa é invertido;
- O fluxo de potência reativa permanece inalterado.

Analogamente ao ocorrido no funcionamento da máquina assíncrona como motor, na operação como gerador as forças induzidas no rotor (forças de Lorentz) podem ser calculadas pela Equação (2.5). Estes efeitos podem ser observados na Figura 2.4.

$$F = Bi_2\ell\text{sen}\theta \quad (2.5)$$

Onde:

- $F$  → Forças de Lorentz induzidas nos condutores do rotor [N];
- $B$  → Indução do campo magnético girante [Wb/m<sup>2</sup>];
- $i_2$  → Correntes rotóricas [A];
- $\ell$  → Comprimento dos condutores do rotor;
- $\theta$  → Ângulo formado entre o vetor indução magnética  $\vec{B}$  e o vetor  $\overrightarrow{i_2 \Delta l}$ .

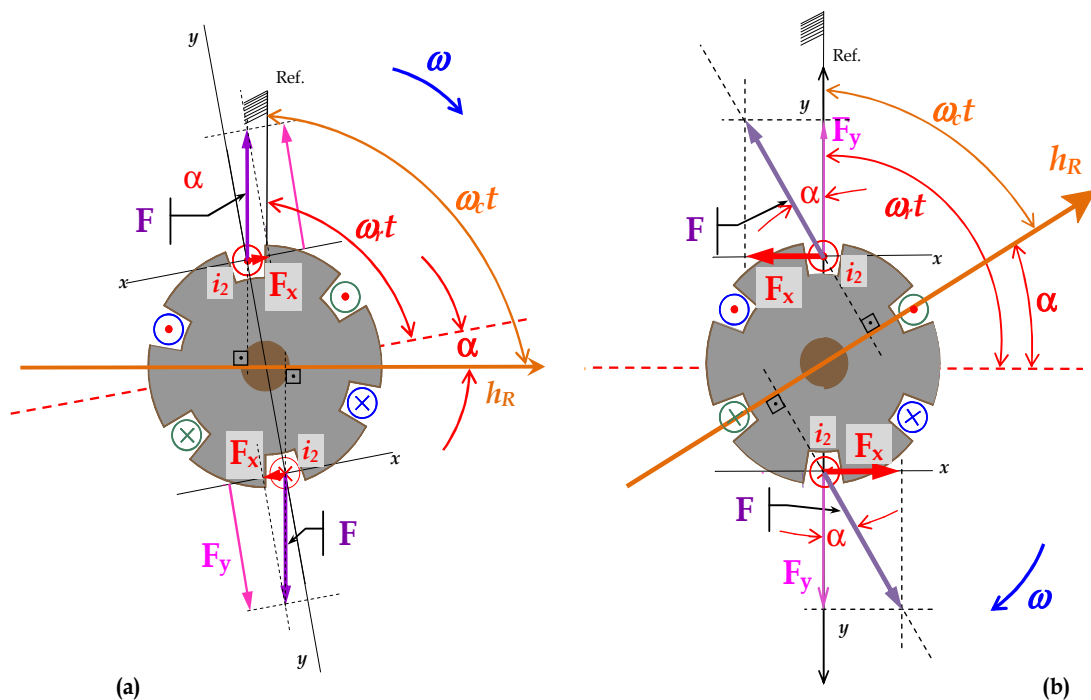


Figura 2.4: Operação da máquina assíncrona: (a) como motor de indução em carga; (b) como gerador de indução

Fonte: LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS, 2016

É importante notar que o sentido da componente na direção tangencial,  $x$  força, da força de Lorentz é invertida quando a máquina passa do funcionamento de motor para gerador. Outro aspecto importante a ser observado é que a velocidade rotórica sendo maior que a velocidade síncrona, conduz a um escorregamento negativo. O escorregamento negativo é devido à componente de velocidade relativa  $\omega_2 = \omega_s - \omega_R$  que fica negativa devido a velocidade rotórica ser maior que a a velocidade do campo magnético. Ao se operar desta forma, os enrolamentos rotóricos são cortados no sentido inverso ao que ocorria quando na operação como motor. Através de um diagrama fasorial é possível demonstrar o comportamento da

máquina de indução tanto na função motor como gerador. Funcionando como gerador, a máquina de indução inverte o fluxo da corrente, invertendo-se também o fluxo de potência ativa e permanecendo o fluxo de potência reativa invariável.

## 2.5 Diagrama vetorial da máquina assíncrona

Se considerarmos a máquina assíncrona acionada por uma máquina primária, onde se pode efetuar o controle de velocidade, conforme ilustra a Figura 2.5, e a mesma estiver operando em vazio, como motor, as perdas envolvidas podem ser calculadas conforme Equação (2.6).

$$P_o = P_{fe} + P_{Jo} + P_{A,V} \quad (2.6)$$

Ao se impor movimento na máquina primária e a velocidade do rotor da máquina síncrona ( $\omega_R$ ) alcançar a velocidade síncrona ( $\omega_S$ ), a corrente em vazio ( $I_o$ ) que circula pelo estator da máquina assíncrona supre apenas as perdas magnéticas ( $P_{fe}$ ) e as perdas Joule no estator ( $P_{Jo}$ ) e grande parte para estabelecer o campo magnético girante. As perdas de natureza mecânica ( $P_{a,v}$ ) são supridas pela máquina primária.

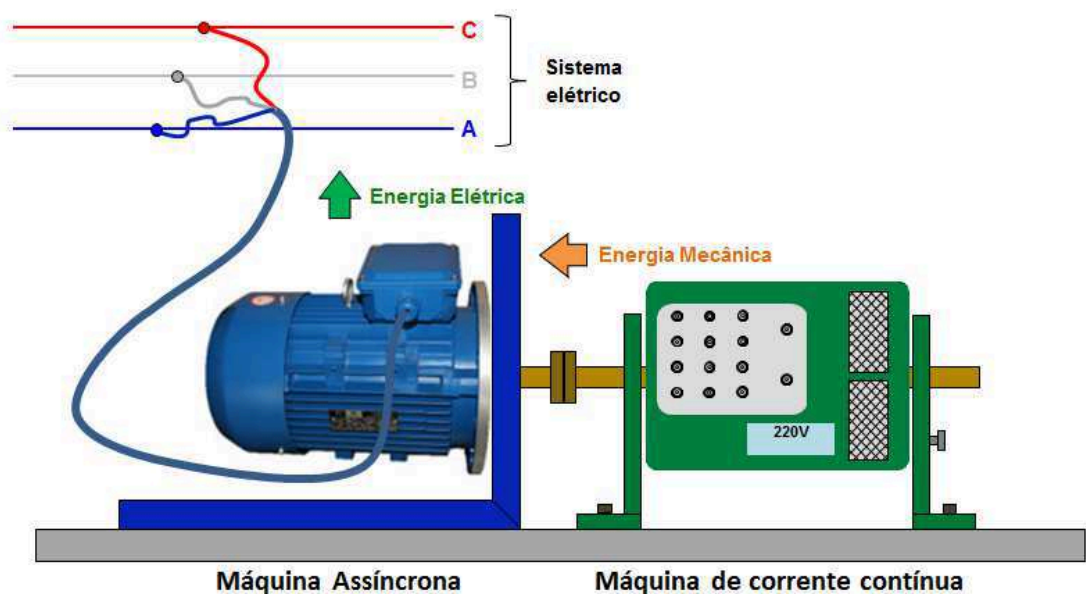


Figura 2.5: Máquina assíncrona funcionando como gerador

Fonte: LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS, 2016



O circuito rotórico pode ser representado por componentes resistivas e indutivas em série, conforme ilustra a Figura 2.7.

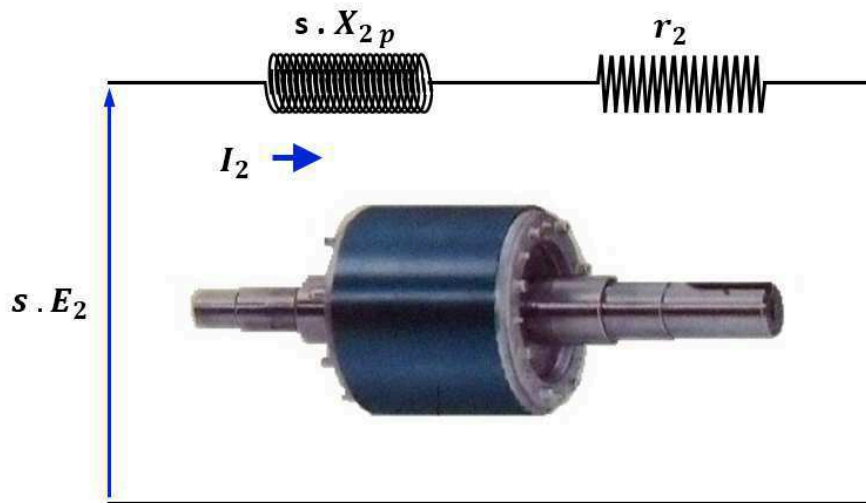


Figura 2.7: Circuito equivalente do rotor

Considerando o diagrama fasorial da máquina, calculam-se os valores das componentes das correntes  $\dot{I}_2$  pelas Equações (2.7) e (2.8).

$$I_{2A} = I_2 \cdot \cos\varphi_2 \quad (2.7)$$

$$I_{2R} = I_2 \cdot \sin\varphi_2 \quad (2.8)$$

Considerando o circuito rotórico da Figura 2.7, obtêm-se as equações:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2} \quad (2.9)$$

O módulo da corrente  $I_2$  será calculado pela Equação (2.10).

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} \quad (2.10)$$

Do estudo de máquinas elétricas sabe-se que a FEM rotórica na condição operacional ( $E_{2(op)}$ ) se relaciona com o escorregamento e com a FEM durante o processo de partida ( $E_{2p}$ ). Uma vez que a frequência rotórica varia, a reatância rotórica ( $x_{2(op)}$ ) também varia com a frequência conforme Equação (2.12).

$$\dot{E}_{2(op)} = s \cdot \dot{E}_{2p} \quad (2.11)$$

$$x_{2(op)} = s \cdot x_{2p} \quad (2.12)$$

A impedância ( $z_2$ ) e o ângulo do fator de potência ( $\varphi_2$ ) do circuito rotórico são calculados por:

$$\vec{z}_2 = r_2 + js \cdot x_{2p} \quad (2.13)$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + s^2 \cdot x_{2p}^2} \quad (2.14)$$

$$\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \left( \frac{s \cdot x_{2p}}{r_2} \right) \quad (2.15)$$

Pode-se também obter as seguintes equações:

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + s^2 \cdot x_{2p}^2}} \quad (2.16)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{s \cdot x_{2p}}{\sqrt{r_2^2 + s^2 \cdot x_{2p}^2}} \quad (2.17)$$

Por fim pode-se calcular e analisar as componentes ativa e reativa da corrente do rotor a partir das Equações (2.18) e (2.19).

$$I_{2A} = \frac{s.E_{2p}}{\sqrt{r_2^2 + s^2.x_{2p}^2}} \cdot \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + s^2.x_{2p}^2}}$$

$$I_{2A} = \frac{s.r_2.E_{2p}}{r_2^2 + s^2.x_{2p}^2} \quad (2.18)$$

$$I_{2R} = \frac{s.E_{2p}}{\sqrt{r_2^2 + s^2.x_{2p}^2}} \cdot \frac{s.x_{2p}}{\sqrt{r_2^2 + s^2.x_{2p}^2}}$$

$$I_{2R} = \frac{s^2.x_{2p}.E_{2p}}{r_2^2 + s^2.x_{2p}^2} \quad (2.19)$$

Se por meio da máquina primária, a máquina assíncrona for acelerada até que a velocidade rotórica seja maior que a velocidade síncrona ( $\omega_S - \omega_R$ ), o escorregamento ( $s$ ) torna-se negativo. Pela análise da Equação (2.18) percebe-se que a componente ativa se inverte e pela Equação (2.19) que a componente reativa permanece invariável. Estas condições conduzem a algumas considerações importantes a saber: quando a máquina opera como motor, escorregamento positivo, esta consome potência ativa e reativa, conforme Equações (2.20) e (2.21). Na operação como gerador, o escorregamento torna-se negativo e esta fornece potência ativa e consome energia reativa, conforme Equações (2.22) e (2.23).

$$P_{elet} = -3.V_{1f}.I_{1Af} \quad (2.20)$$

$$Q_{elet} = -3.V_{1f}.I_{1Rf} \quad (2.21)$$

$$P_{elet} = 3.V_{1f}.I_{1Af} \quad (2.22)$$

$$Q_{elet} = -3.V_{1f}.I_{1Rf} \quad (2.23)$$

Com o propósito de se analisar as condições de fornecimento e consumo de energias ativa e reativa na passagem da condição de operação como motor para gerador, prota-se o diagrama fasorial da Figura 2.8.

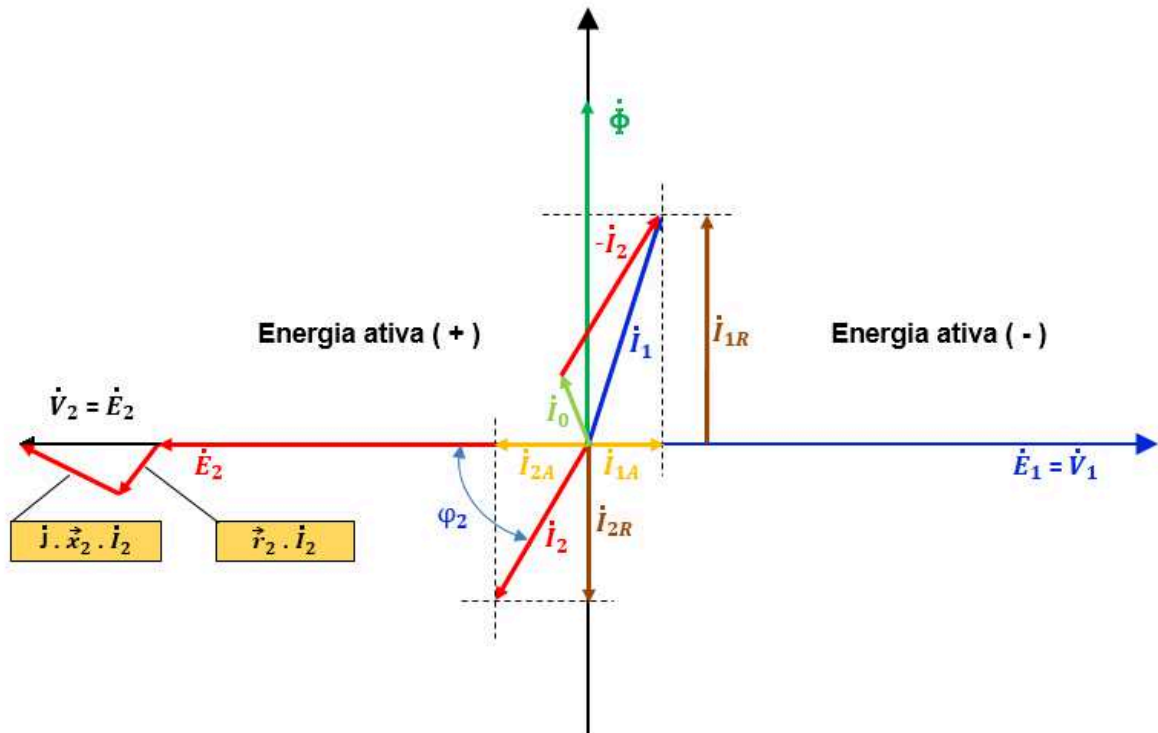


Figura 2.8: Diagrama fasorial - Máquina assíncrona operando como gerador

Fonte: LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS, 2016

## 2.6 Análise do fluxo de potência na máquina assíncrona

Analisando-se as componentes reativas da corrente para a máquina assíncrona, operando tanto como motor ou gerador, conforme ilustrado no diagrama fasorial da Figura 2.8, observa-se que não há alteração no sentido do fluxo da corrente e por conseguinte da energia reativa, o que a caracteriza como uma máquina consumidora de energia reativa indutiva. Independente do tipo de aplicação, a máquina assíncrona necessita de uma fonte externa para fornecimento da energia reativa necessária à formação do campo magnético. Esta observação constitui-se um ponto importante referente à operação da máquina assíncrona, principalmente quando se opera na função gerador, assim sendo um controle de



reativo externo deveria ser considerado e implementado para aplicação da máquina como gerador.

É importante se efetuar uma análise do fluxo de potência em um sistema elétrico, enfatizando principalmente o fluxo de potência reativa. Para este propósito considere a Figura 2.9 que ilustra um sistema elétrico de potência em termos de fluxo de potência.

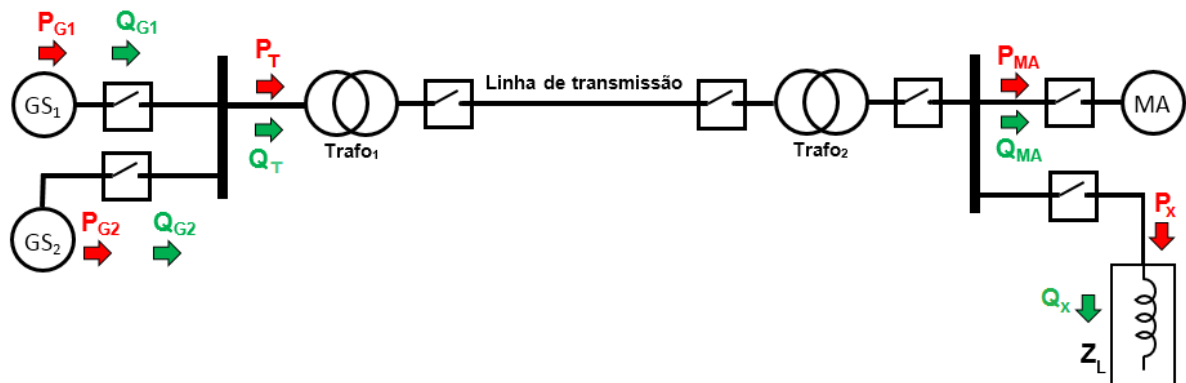


Figura 2.9: Unifilar representando o fluxo de potência em um sistema elétrico de potência, sem controle de energia reativa

Fonte: LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS, 2016

O sistema elétrico ilustrado na Figura 2.9 apresenta um sistema de geração representando as companhias de geração de energia elétrica e consumidores. No lado da geração têm-se duas máquinas síncronas que geram a energia ativa e reativa necessárias à operação do sistema elétrico. Do lado da carga tem-se uma máquina assíncrona funcionando como motor e uma carga de natureza resistiva indutiva. O fluxo de potência está representado pelas setas de energia ativa e reativa. Nesta situação toda a energia ativa e reativa está sendo gerada pelas máquinas síncronas. Deve-se considerar que a energia reativa para a operação dos sistemas de geração pode ser fornecida pelo sistema elétrico, quando operando em sistemas interligados, ou através de bancos de capacitores, em sistemas isolados, estes apresentam a vantagem de serem mais baratos que as máquinas síncronas, manutenção reduzida por não apresentarem peças móveis, e de instalação mais adequada em relação às máquinas girantes. A Figura 2.10 ilustra um sistema elétrico operando com compensação de energia reativa.

Para a situação ilustrada na Figura 2.10 o fluxo de potência reativa no sistema é alterado, ou seja, antes o sistema elétrico das empresas de energia, fornecia toda a energia reativa consumida do lado das cargas. Destaca-se também que naquele caso a máquina assíncrona funcionava como motor, isto se comprova devido ao fluxo de energia ativa. Na situação atual a máquina assíncrona passou a funcionar como gerador assíncrono e o fluxo de potência reativa não foi invertida, passando agora a ser suprido pelo banco de capacitores instalado a fim de efetuar-se a compensação de energia reativa, ou seja,  $Q_{MA} - Q_{BC}$ .

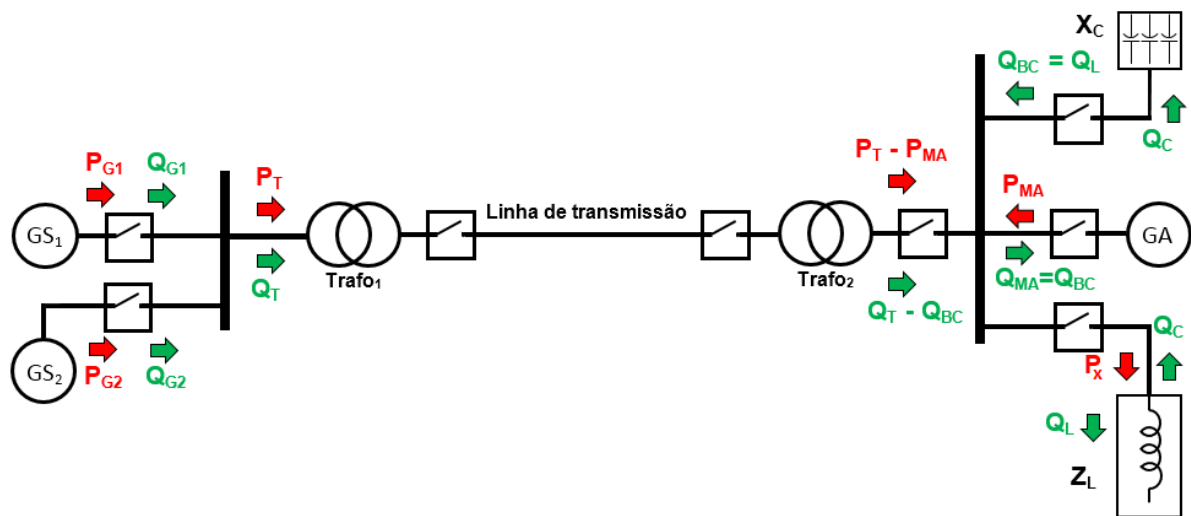


Figura 2.10: Unifilar representando o fluxo de potência em um sistema elétrico de potência, com controle de energia reativa

Fonte: LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS, 2016

Agora o balanço de energia ativa está em parte sendo suprida pela máquina assíncrona ( $P_T - P_{MA}$ ). Já o balanço do fluxo de energia reativa será  $Q_T - Q_{BC}$ . Por fim fica comprovado que a máquina assíncrona funcionando como gerador também necessita de energia reativa indutiva para funcionar.

Cabe ainda ressaltar que na ausência de um banco de capacitores, o sistema elétrico de potência deverá fornecer a energia reativa para operação do gerador assíncrono, o que deveria comprometer valores em torno de 20% a 40% da sua potência nominal para suprir a corrente de magnetização ( $I_o$ ), reponsável pela energia reativa da máquina assíncrona. Estes valores são bastante elevados frente ao sistema de excitação de uma máquina síncrona que consome somente apenas 1% de sua energia gerada para produzir a energia reativa.

Outro aspecto a ser analisado é a situação de faltas ocorridas em sistemas onde as máquinas assíncronas estejam conectadas ao barramento. Em situação de um curto circuito, as máquinas síncronas apresentam elevados valores de corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ), pois a máquina continua a gerar fem que alimenta a impedância de falta que é de valor baixíssimo em comparação à impedância nominal do circuito. Uma vez que a máquina primária (turbina) continua a fornecer energia mecânica frente ao curto circuito, invariavelmente a relação entre a reatância ( $x_s$ ) e a resistência ( $R_s$ ) do sistema apresenta valor de reatância muito maior que a resistência, ou seja  $x_s \gg R_s$ . Sendo um valor de resistência muito pequeno, o valor da potência ativa consumida será praticamente nula. Como o gerador não possui onde debitar a potência ativa, esta potência é transformada em energia cinética, e o conjunto turbina máquina síncrona dispara. Os dispositivos de proteção de sobrecorrente e sobrevelocidade da máquina atuam retirando a máquina e levando-a a condição de rotação nominal.

Por outro lado o gerador de indução apresenta vantagens sobre a máquina síncrona na condição de curto circuito. Pois na ocorrência de falta desta natureza, a tensão no barramento vai a zero e a corrente de excitação  $I_0$  cessando o campo girante, e assim a FEM gerada será nula e sua contribuição para alimentar o curto circuito seria nula.

## 2.7 Frequência e tensão induzida

As frequências da corrente e tensão do rotor dependem da velocidade de escorregamento ( $n_2$ ). Conforme já estabelecido, para o rotor em repouso a frequência dos sinais rotóricos assume o mesmo valor da frequência do estator, ou seja, do sistema elétrico. Quando o rotor inicia o movimento a frequência do mesmo varia proporcionalmente à velocidade relativa ( $n_2$ ), e é calculada conforme Equação (2.24).

$$f_r = f \frac{n_2}{n_s} \quad \Rightarrow \quad f_r = sf \quad (2.24)$$

- $f$  → Frequência da rede de alimentação [Hz];
- $f_r$  → Frequência do rotor [Hz];
- $n_s$  → Velocidade síncrona [RPM];
- $n_2$  → Velocidade relativa [RPM];
- $s$  → Escorregamento [%].

Uma equação similar é aplicada para a tensão induzida no rotor. Quando o rotor está em repouso, o campo magnético rotativo varre as barras do rotor na taxa máxima e a tensão induzida no mesmo será máxima. Na medida em que o escorregamento diminui, a tensão induzida decresce proporcionalmente e atinge valores muito baixos [1]. Desta forma, a tensão induzida no rotor pode ser calculada pela Equação (2.25):

$$V_r = s \cdot V_{rb} \quad (2.25)$$

- $V_r$  → Tensão induzida no rotor [V];
- $V_{rb}$  → Tensão induzida com rotor bloqueado [V];
- $s$  → Escorregamento [%].

## 2.8 Regulação de tensão/frequência e torque

Em aplicações isoladas, com o uso de um gerador autoexcitado, sem um sistema para controle de velocidade, a amplitude e frequência da tensão são afetadas pela variação de velocidade da máquina primária. Estas variáveis também são afetadas pela queda de tensão no circuito interno da máquina, ocasionando redução do nível de tensão nos terminais do gerador. Neste tipo de aplicação, o nível de tensão e frequência síncrona são afetados principalmente pela variação da potência ativa na carga para atender a demanda de torque exigida pela mesma. Isto posto deve-se considerar que se a rotação do conjunto gerador máquina primária permanecer constante, observa-se a redução da frequência do sinal gerado, haja vista, que houve aumento de torque devido ao aumento da carga. Com a redução da frequência dos sinais gerados a fim de atender o aumento de torque solicitado, haverá um aumento na frequência de

escorregamento do rotor que está diretamente relacionado com o desenvolvimento de torque, conforme estabelece a Equação (2.26).

$$T = \frac{3.p.p}{2.\pi.f_s} \frac{V_f^2}{\left[r_s + \left(r'_r \frac{f_s}{f_2}\right)\right]^2 + \left[(x_s + x'_r) \left(\frac{f_s}{f_2}\right)\right]^2} r'_r \frac{f_s}{f_2} \quad (2.26)$$

- $T$  → Torque [Nm];
- $p.p$  → Par de polos;
- $f_s$  → Frequência síncrona [Hz];
- $f_2$  → Frequência relativa [Hz];
- $V_f$  → Tensão de fase [V];
- $r_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $r'_r$  → Resistência das barras do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];
- $x_s$  → Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $x'_r$  → Reatância de dispersão do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ].

Em contrapartida, haverá uma redução na amplitude da tensão, proporcional à variação da frequência. Este efeito desencadeia uma série de alterações no comportamento da máquina, caso não seja promovido a compensação na redução da rotação do conjunto gerador máquina primária. A queda da frequência do sinal gerado provoca a redução na amplitude da tensão gerada, conforme ilustrado na Figura 2.11.

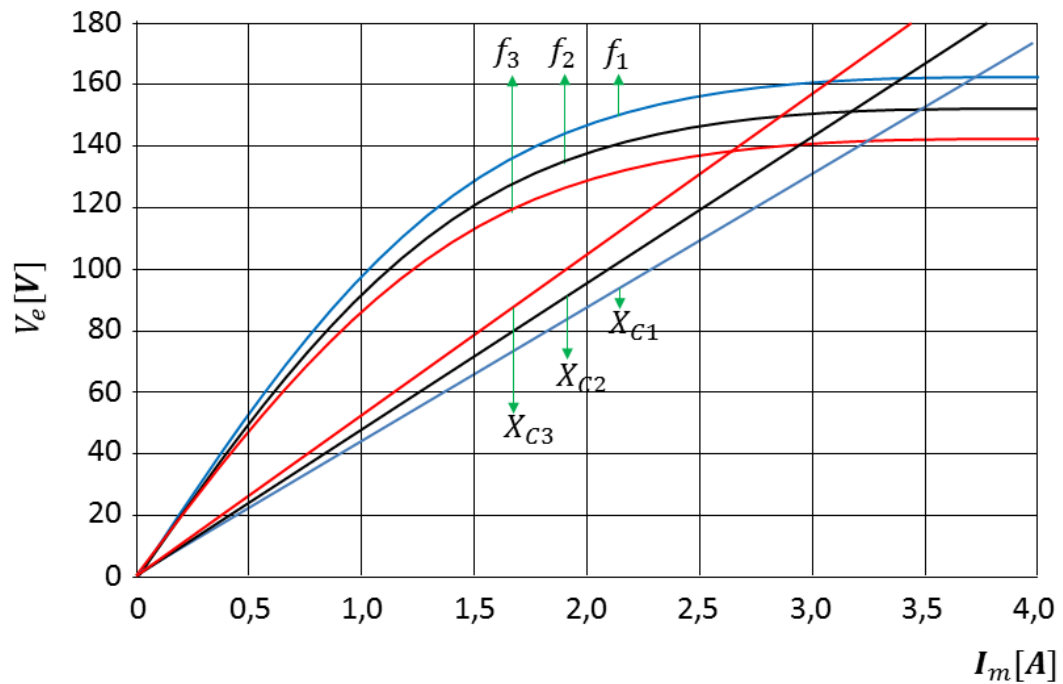


Figura 2.11: Comportamento da tensão de entreferro em função da variação da frequência síncrona

As retas  $X_{C1}$ ,  $X_{C2}$  e  $X_{C3}$  representam as reatâncias capacitivas correspondentes ao banco de capacitores e as curvas  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  representam as curvas de saturação do gerador que são influenciadas pela variação da potência ativa da carga, impondo ao sistema redução na frequência e tensão [6]. A cada variação de potência tem-se um novo ponto de operação do gerador, como consequência da variação da frequência dos sinais gerados, que é representado pela interseção das duas variáveis, tensão e corrente.

## 2.9 Circuito equivalente

Fazer previsões quantitativas sobre o comportamento da máquina de indução sob diferentes condições de operação se faz necessário em diversas modalidades de pesquisas. Para esta finalidade, é conveniente representar os componentes da máquina de indução através de um circuito equivalente. Considerando-se uma carga equilibrada, um circuito equivalente monofásico é suficiente para demonstrar maioria dos propósitos. Através deste circuito é possível fazer avaliações teóricas do comportamento da máquina de indução e

sua influência na rede elétrica. Por meio de programas computacionais de simulação é possível analisar através de simulações o comportamento da máquina sem que seja necessária a montagem física do equipamento. A Figura 2.12 representa o circuito equivalente por fase de uma máquina de indução.

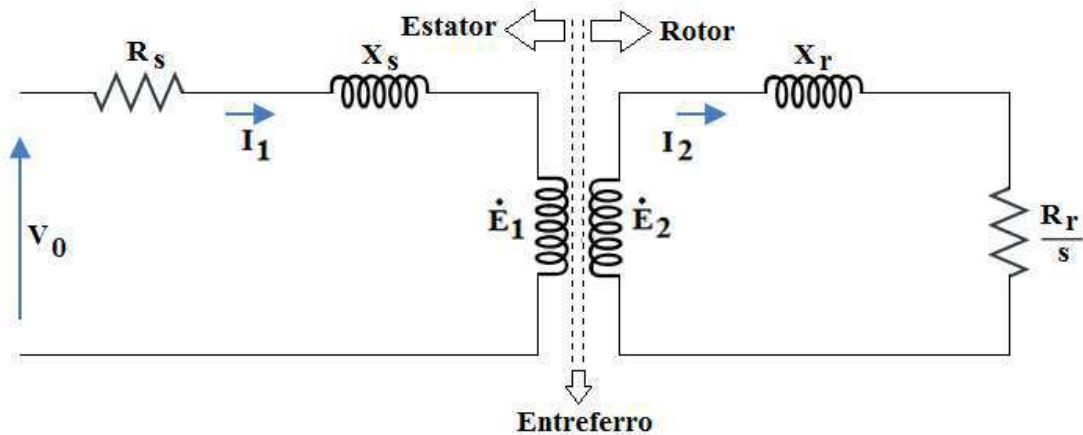


Figura 2.12: Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução

- $V_0$  → Tensão de fase aplicada nos terminais do estator [V];
- $R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X_s$  → Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X_r$  → Reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];
- $R_r$  → Resistência das barras do rotor [ $\Omega$ ];
- $E_1$  → FCEM induzida pelo fluxo de entreferro [V];
- $E_2$  → Tensão induzida no rotor [V];
- $I_1$  → Corrente no estator [A];
- $I_2$  → Corrente no rotor [A];
- $S$  → Escorregamento [%].

Assim como no transformador, conhecendo-se as características construtivas da máquina de indução, os parâmetros do rotor podem ser referidos ao circuito do estator. No circuito também é representado os componentes do ramo de magnetização. A Figura 2.13 demonstra os componentes do rotor referidos ao estator.

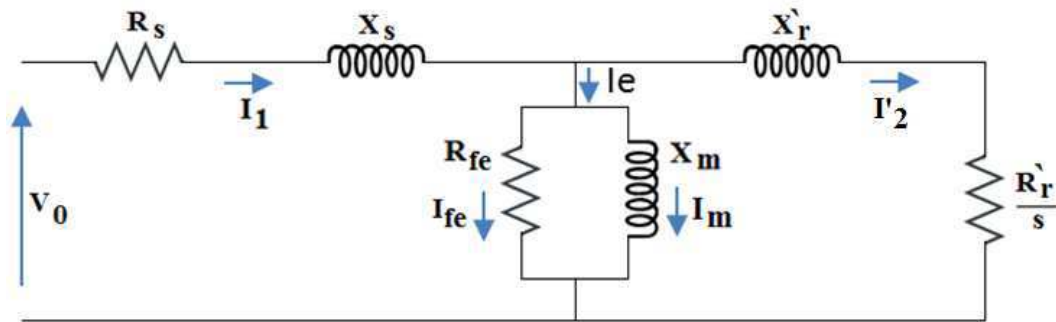


Figura 2.13: Circuito equivalente monofásico da máquina de indução com os componentes do rotor referidos ao estator

- $V_0$  → Tensão de fase aplicada nos terminais do estator [V];
- $R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X_s$  → Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X'_r$  → Reatância de dispersão do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];
- $R_{fe}$  → Resistência que representa a perda no ferro [ $\Omega$ ];
- $X_m$  → Reatância de magnetização [ $\Omega$ ];
- $I_1$  → Corrente do estator [A];
- $I'_2$  → Corrente do rotor referida ao estator [A];
- $I_e$  → Corrente do ramo de magnetização [A];
- $I_{fe}$  → Corrente que atravessa a resistência associada às perdas no material ferromagnético [A];
- $I_m$  → Corrente de magnetização [A];
- $R'_r$  → Resistência das barras do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];
- $S$  → Escorregamento [%].

O parâmetro  $R'_r/s$  do rotor mostrado na Figura 2.13 representa as perdas Joule do rotor mais perdas por atrito e ventilação e a potência mecânica disponível na ponta de eixo. Efetuando-se a separação das perdas, a perda Joule rotórica agora está representada pela resistência  $R'_r$  e a parte correspondente à carga, mais as perdas mecânicas são calculadas por (2.27). O novo circuito pode ser visto na Figura 2.14.

$$P_{mec} = R'_r \frac{(1-s)}{s} \quad (2.27)$$



- $P_{mec}$  → Perdas mecânicas [KW];  
 $R'_r$  → Resistência das barras do rotor referida ao estator [Ω];  
 $S$  → Escorregamento [%].

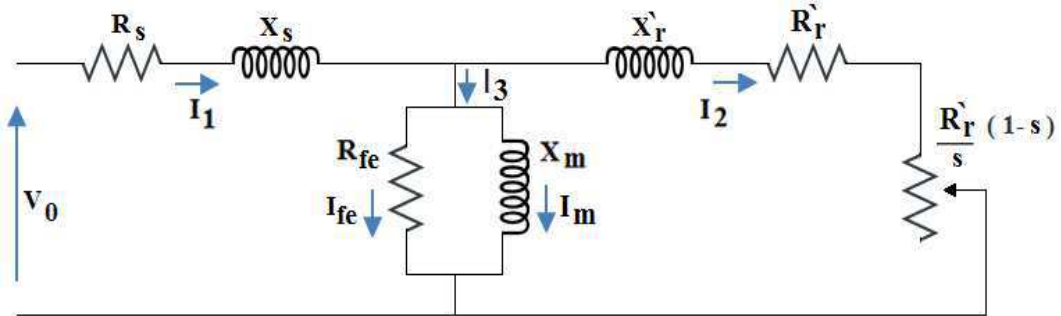


Figura 2.14: Circuito equivalente monofásico com os componentes do rotor referidos ao estator – desmembramento da resistência  $R'_r/s$

Portanto as perdas Joule ( $P_J$ ) no motor podem ser calculadas por (2.28).

$$P_J = 3 \cdot (R_s I_1^2 + R'_r \cdot I_2'^2) \quad (2.28)$$

- $P_J$  → Perdas Joule no motor [KW];  
 $R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [Ω];  
 $R'_r$  → Resistência das barras do rotor referida ao estator [Ω];  
 $I_1$  → Corrente do estator [A];  
 $I_2'$  → Corrente do rotor referida ao estator [A].

A corrente do estator é calculada conforme Equação (2.29).

$$I_1 = \frac{P_{saída}[hp] \cdot 0,746}{\sqrt{3} \cdot V_{oL} \cdot f \cdot p \cdot \eta} \quad (2.29)$$

- $I_1$  → Corrente no estator [A];  
 $P_{saída}$  → Potência mecânica no eixo [hp];  
 $V_{oL}$  → Tensão de linha na saída do gerador de indução [V];  
 $f \cdot p$  → Fator de potência;  
 $\eta$  → Rendimento do gerador [%].

Analisando-se as perdas joule no estator, observa-se que estas são inversamente proporcionais ao quadrado do produto do rendimento pelo fator de potência e diretamente proporcional ao valor da resistência do enrolamento do estator. A resistência dos enrolamentos é inversamente proporcional ao peso dos condutores no enrolamento do estator. Quanto mais material condutor no estator, menores serão as perdas.

As perdas no rotor do gerador podem agora ser calculadas por (2.30).

$$P_{rotor} = \frac{(P_{saída}[hp].0,746 + P_{a,v}).s}{(1-s)} \quad (2.30)$$

Onde:

- $P_{rotor}$  → Perdas Joule no rotor [kW];
- $P_{saída}$  → Potência mecânica no eixo [hp];
- $P_{a,v}$  → Perdas por atrito e ventilação [kW];
- $S$  → Escorregamento [%].

O escorregamento se relaciona com as perdas rotóricas conforme Equação (2.31).

$$S = \frac{P_{rotor}}{P_{em}} \quad (2.31)$$

- $P_{rotor}$  → Perdas no rotor [kW];
- $P_{em}$  → Potência eletromagnética [kW];
- $S$  → Escorregamento [%].

Desta forma, o escorregamento pode ser minimizado reduzindo-se as perdas rotóricas pelo aumento de peso dos condutores do rotor, ou ainda aumentando-se o fluxo total do entreferro, aumentado assim à potência eletromagnética transferida ao rotor. Os resultados destas modificações no projeto resultam em limitar-se o torque de partida aos valores mínimos aceitáveis, redução do fator de potência, além de elevadas correntes de partida. O aumento da quantidade de condutores no rotor deve ser realizado com critérios, pois estes estão diretamente relacionados com a produção de torque.

O ensaio em vazio na máquina de indução é importante para levantamento da curva de magnetização da máquina e determinação das perdas em vazio. Com o resultado deste ensaio é possível também determinar as perdas no ferro  $R_{fe}$  e a reatância de magnetização  $X_m$ . Uma das componentes mais significativas das perdas no ferro é a perda no núcleo, a qual é resultante de dois diferentes efeitos, o efeito da histerese e as correntes parasitas induzidas nas lâminas do núcleo (Perdas de Foucault). Sendo assim, podem-se determinar os valores de resistência e reatância de magnetização  $R_{fe}$  e  $X_m$  pelas Equações (2.32) e (2.33):

$$R_{fe} = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (2.32)$$

$$X_{mf} = \frac{V_{of}}{I_m} \quad (2.33)$$

$R_{fe}$  → Resistência que representa as perdas no ferro [ $\Omega$ ];

$X_{mf}$  → Reatância de magnetização por fase [ $\Omega$ ];

$P_o$  → Potência ativa [KW];

$I_{mf}$  → Corrente de magnetização por fase [A];

$V_{of}$  → Tensão nos terminais do estator por fase [V].

A perda no ferro pode ser determinada utilizando-se a Equação (2.34):

$$P_{fe} = P_o - 3 \cdot I_{of}^2 \cdot R_s - P_{rotor} \quad (2.34)$$

$P_{fe}$  → Perda no ferro [KW];

$P_o$  → Potência ativa [KW];

$I_{of}$  → Corrente no estator por fase [A];

$R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];

$P_{rotor}$  → Perda no rotor [KW].

Não havendo variação na tensão de entrada, esta perda será constante.

### **3 PERDAS E RENDIMENTO**

Independente do processo ou ambiente ao qual estejam aplicadas, as máquinas de indução apresentam perdas nos componentes internos durante seu funcionamento, quer estejam operando na função motor, quando empregado no processo de conversão de energia elétrica em energia mecânica através do princípio da reação entre dois campos magnéticos, ou gerador, quando faz o processo inverso. As perdas representam uma parcela da energia gasta pela máquina de indução durante o processo de conversão da energia. Este efeito indesejado provoca o aquecimento nos componentes da máquina de indução, diminuindo a vida útil da isolação, além do consumo de energia que não é transformada em trabalho.

As perdas distribuídas nos componentes da máquina, como carcaça, núcleo magnético, caixa de ligação, eixo e barramento da gaiola, quando adequadamente dimensionados, não influenciam na vida útil do equipamento e não havendo mau uso, tem vida longa, ao contrário das escovas e mancais que são denominados componentes de desgaste e, portanto, substituídos periodicamente. Considerando estes aspectos, fica evidente que a vida útil de uma máquina de indução é limitada pela isolação dos fios condutores utilizados nos enrolamentos. A degradação do isolamento é provocada por vários fatores, com relevância aos agentes de natureza química, mecânica, elétrica e térmica.

#### **3.1 Agentes químicos**

As máquinas elétricas são aplicadas a uma grande variedade de processos e estão sujeitas a exposições de agentes químicos, que podem ser de natureza sólida, líquida ou gasosa. Quando não tratados, estes agentes agredem o material isolante, destruindo em pouco tempo ou diminuindo lentamente suas propriedades dielétricas. Permanecendo as partes isolantes expostas a um ambiente com estas características, o isolamento acaba sendo rompido, em virtude do potencial elétrico a ele aplicado. A água em contato com as partes isoladas do motor reage com os materiais utilizados na isolação, liberando substâncias químicas que degradam os circuitos do motor e em pouco tempo causa algum tipo de falha em detrimento ao baixo isolamento.

### **3.2 Agentes mecânicos**

São as reações que provocam danos à integridade física dos componentes da máquina. Normalmente estes efeitos são causados pela própria máquina, que em virtude de alguma falha de montagem, como por exemplo, um desalinhamento, provoca vibrações, que com o tempo em funcionamento tende a aumentar, não só afetando a isolação da máquina, como também a quebra dos componentes móveis. As vibrações também podem ser originadas pelas estruturas externas ou pelo próprio equipamento acionado. Outro agente mecânico não menos importante, são os choques causados por impacto de objetos ou particulados lançados pelo sistema de ventilação, normalmente acoplados ao próprio eixo do rotor.

### **3.3 Agentes térmicos**

As reações químicas ou mecânicas, apesar de serem perniciosas à isolação da máquina de indução podem ser tratadas e minimizadas através do dimensionamento ou projeto adequado de construção da máquina de indução. Por mais críticas que sejam as condições do processo e intempéries do local, como poeira, umidade, agentes mecânicos e químicos, as características da máquina de indução podem ser adaptadas para suportarem tais perturbações. Por mais inovador que seja o projeto de uma máquina de indução, considerando todas as etapas, até sua aplicação, não excedendo os limites impostos pelo projeto, mesmo em um ambiente totalmente limpo, não é possível protegê-la contra a temperatura de funcionamento. O projeto de uma máquina engloba uma série de fatores, os quais buscam obter o melhor desempenho do conjunto. A temperatura é o principal fenômeno de degradação do isolamento dos circuitos de uma máquina de indução. Toda máquina apresenta perdas interna de potência. Essas perdas se transformam em calor que aquece o enrolamento, produzindo elevação da temperatura em relação ao ambiente de instalação. A elevação de temperatura altera as características dos isolantes causando o envelhecimento do dielétrico, proporcionando a fuga de corrente entre condutores do enrolamento ou até mesmo para massa, ou ainda a fusão das chapas magnéticas. A eficiência na troca de calor, gerado pelas perdas internas é uma das principais características no projeto de

construção da máquina de indução, pois a elevação da temperatura é o principal fator causador do envelhecimento térmico do dielétrico, com consequente diminuição da vida útil da máquina de indução. Quando submetido a elevadas temperaturas por razões adversas, citando como exemplo, anomalias no processo de fabricação, ou sobrecargas devido aplicações inadequadas, o motor pode queimar antes mesmo que ocorra o fenômeno de envelhecimento térmico. Independente do grau de proteção, sejam os motores blindados ou abertos, o sistema de dissipação de calor deve ser dimensionado de forma que a temperatura em regime de trabalho não exceda os limites do isolante utilizado, evitando o envelhecimento acelerado da isolação. Para se ter uma ideia da grande importância da temperatura na vida de um isolamento, é bom lembrar que apenas 10°C a mais de temperatura de funcionamento podem reduzi-la à metade [WEG]. Por exemplo: se o isolante utilizado é bom para suportar uma temperatura contínua de 120°C, durante uma vida prevista de quatro anos, não se deve esperar mais que dois anos de funcionamento se ele for submetido a 130°C (Falcone, 1995).

A Figura 3.1 ilustra o comportamento do gradiente de temperatura no processo de dissipação térmica do calor gerado pelas perdas durante funcionamento da máquina de indução.

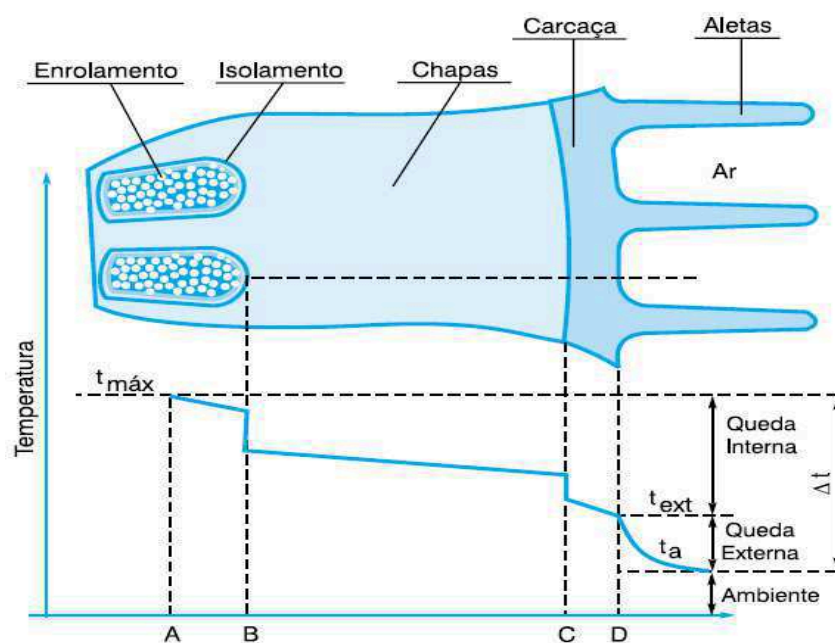


Figura 3.1: Dissipação térmica do motor de indução

Fonte: WEG, 2015

### 3.4 Agentes elétricos

São as perturbações provocadas por variações na rede elétrica, principalmente pelos níveis de tensões muito acima da nominal (sobretensões), seja por picos de curta duração, geralmente provocados por descargas atmosféricas, ou de forma contínua em virtude do desequilíbrio de tensão nas fases da rede de alimentação, muito das vezes provocados por cargas monofásicas. Dependendo do nível de sobretensão haverá o rompimento da camada isolante e curto-circuito entre espiras ou para massa.

As perdas de potência são de três naturezas:

- Magnética
- Joule
- Mecânica

#### 3.4.1 Perdas magnéticas

As perdas magnéticas também denominadas perdas no ferro (Histerese e Foucault) são influenciadas por vários fatores, sendo o aumento da densidade do fluxo magnético o principal fator do aumento destas perdas. Considerando-se que a variação de fluxo no rotor é muito pequena, tais perdas podem ser atribuídas especificamente ao estator, desprezando-se a parcela referente ao rotor. Estas perdas podem ser reduzidas pela diminuição da espessura das lâminas de aço-silício ou aumentando-se o teor de silício nas lâminas magnéticas, porém esta última deve ser limitada ao máximo de 5%, pois maiores dosagens afetam a rigidez mecânica do material.

As perdas magnéticas se subdividem em duas:

- Perdas Foucault ou correntes parasitas;
- Perdas por histerese.

### 3.4.1.1 Núcleo magnético

Os núcleos do estator e rotor são formados por lâminas finas de material ferromagnético com espessuras inferiores a 0,5mm, isoladas e prensadas por tirantes. Nas lâminas são estampados furos para prensagem e formação do núcleo, ranhuras para alojamento dos fios das bobinas, no caso do estator e ranhuras nos discos do rotor para alojamento das barras da gaiola, considerando os modelos gaiola de esquilo. O núcleo laminado reduz o fluxo de correntes parasitas com consequente redução de perdas e melhoria no rendimento da máquina. As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 ilustram a formação do núcleo magnético do estator e rotor.

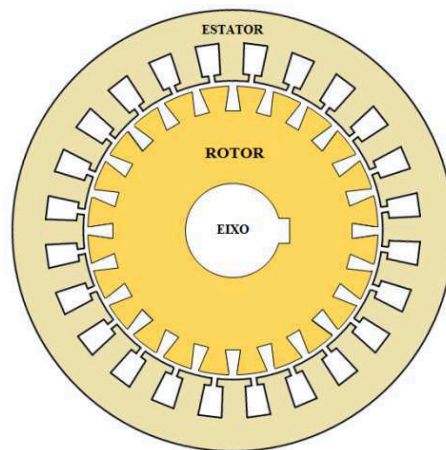


Figura 3.2: Lâmina de material ferromagnético do estator e rotor

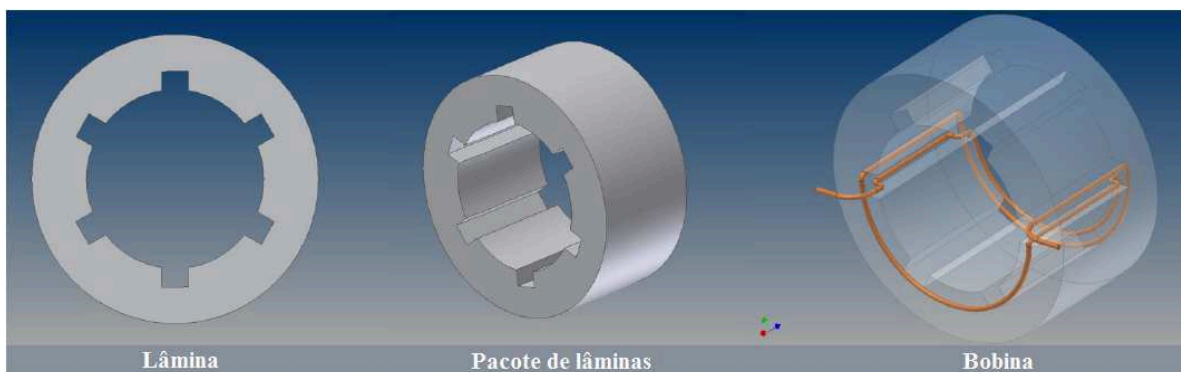


Figura 3.3: Núcleo do estator com seis ranhuras, Faculdade de Engenharia de Sorocaba – Máquinas Elétricas

Fonte: PROF. JOEL ROCHA PINTO, 2015



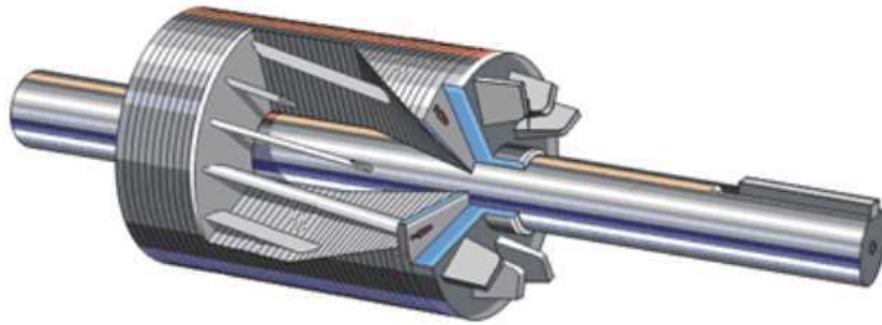


Figura 3.4: Rotor gaiola de esquilo

Fonte: PROF. ADEMIR NIED, 2015

A variação do fluxo com a mesma frequência da rede de alimentação induz correntes na massa do núcleo. Sendo o núcleo maciço ou de material de baixa resistividade elétrica, as correntes parasitas seriam elevadas, produzindo elevadas perdas Joule ( $RI^2$ ). Como essas perdas são proporcionais ao quadrado da espessura das chapas utilizadas, elas serão fortemente reduzidas se usarmos chapas finas (0,5mm ou menos) [3]. O aço silício possui resistividade muito maior que o aço carbono comum, reduzindo as correntes parasitas e perdas por histerese, que são as perdas relacionadas com o ciclo de histerese devido à magnetização cíclica provocada por excitação em corrente alternada. Um núcleo construído em aço silício custa mais caro do que o construído em aço carbono, porém a vantagem do aumento do rendimento (conservação de energia) acaba por reduzir o custo de operação e compensar o investimento. Os motores de alto rendimento devem, portanto, possuir núcleo de aço silício (Falcone, 1995).

#### 3.4.1.2 Barramento da gaiola

Nos motores normais, as barras e os anéis de curto-circuito devem ser de material de baixa resistividade, normalmente de alumínio fundido ou cobre, não somente para reduzir as perdas Joule ( $RI^2$ ), mas também para reduzir o escorregamento, já que este depende da resistência ôhmica rotórica [3]. O alumínio é injetado em estado fundido nas ranhuras do pacote do rotor, formando, de uma só vez, as barras da gaiola e os anéis de curto. Este processo é mais simples e barato quando se trata de fabricação em grandes séries. As pequenas séries e os motores de maior porte são fabricados em cobre, soldando-se as barras e os anéis de curto

com soldas especiais. O técnico de manutenção deve estar sempre atento ao problema de continuidade das barras (principalmente no caso da gaiola de alumínio fundido) e na solda da barra/anel de curto nas gaiolas de cobre, pois estes pontos são prováveis fontes de defeitos dos motores, principalmente aqueles submetidos às sobrecargas e vibrações (Falcone, 1995).

### **3.4.2 Perdas por efeito joule**

Também denominadas perdas no cobre, são proporcionais ao efeito Joule ( $RI^2$ ) sobre as resistências ôhmicas próprias dos enrolamentos do estator e rotor. São as perdas oriundas do fluxo de corrente nos condutores do estator e rotor. Esta deficiência pode ser minimizada aumentando-se a quantidade de condutores no enrolamento do estator, porém a mesma técnica não pode ser empregada no circuito do rotor, pois o torque de partida é proporcional à resistência do mesmo.

### **3.4.3 Perdas mecânicas**

As perdas mecânicas estão relacionadas com o movimento (rotação) da máquina e são atribuídas ao atrito nos mancais e sistema de ventilação. O atrito é dependente das características construtivas dos mancais e acabamento superficial do rotor. Este efeito pode ser reduzido utilizando-se mancais adequados, melhorando a geometria do rotor, tornando-a menos rugosa possível, reduzindo o atrito com o ar na região do entreferro, além de sistemas de ventilação mais eficientes. Para as máquinas de pequeno porte, as perdas mecânicas são negligenciadas por serem muito pequenas quando comparadas com as demais perdas que ocorrem na máquina de indução.

Uma pequena parcela das perdas no ferro e no cobre é atribuída às perdas suplementares, que estão relacionadas com o carregamento dos motores e representam as perdas resultantes de distribuição não uniforme do fluxo no entreferro devido às ranhuras do estator e do rotor. Inúmeros são os fatores que afetam as perdas suplementares, principalmente à pulsação de fluxo nas superfícies dos dentes e distribuição irregular da corrente de carga nos condutores.

Estas perdas são difíceis de serem medidas ou mesmo calculadas, estudos assumem que estas variam com o quadrado do torque no eixo. Estas são características de cada projeto e potência de cada máquina de indução. As perdas mecânicas e no ferro manifestam-se mesmo com o motor em vazio, porém, as perdas Joule e suplementares são dependentes da carga. A Figura 3.5 ilustra a distribuição das perdas na máquina de indução operando como motor.

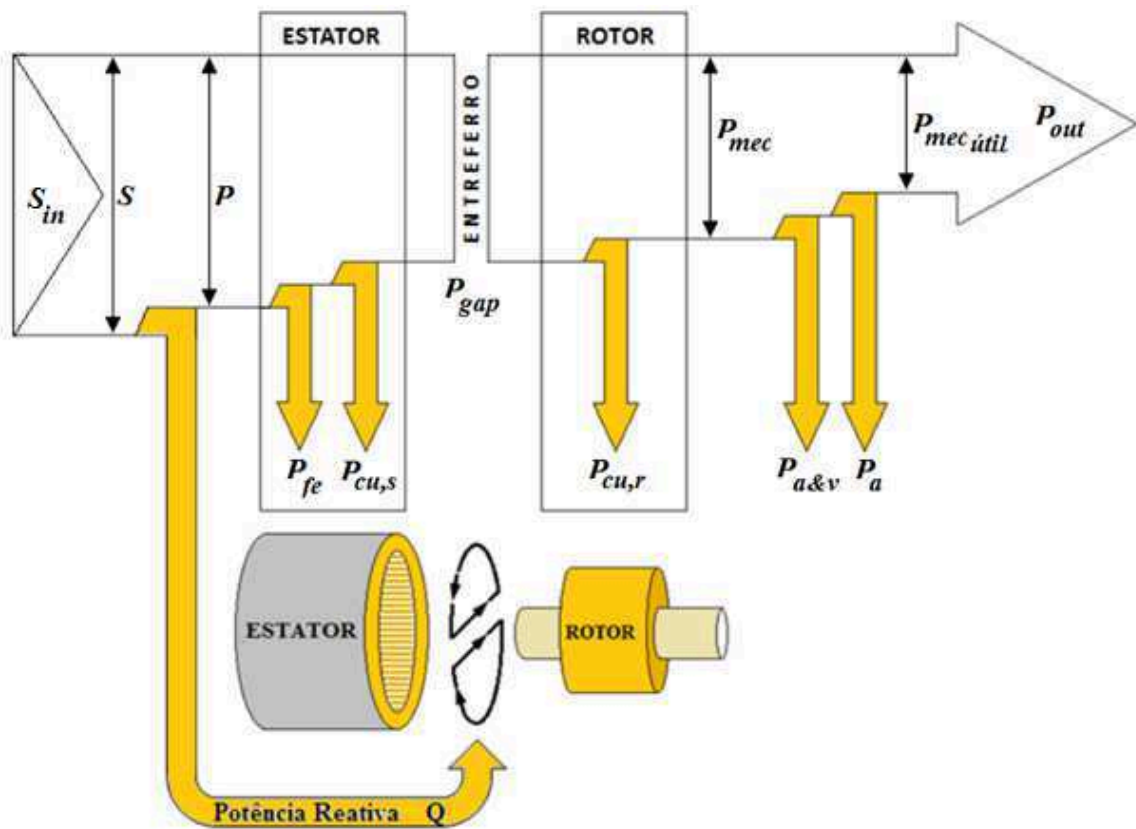


Figura 3.5: Perdas na máquina de indução na operação como motor

- $S_{in}$  → Potência aparente de entrada [KVA];
- $P_{gap}$  → Potência no entreferro [KW];
- $P_{mec}$  → Potência mecânica [KW];
- $P_{mec\ útil}$  → Potência mecânica útil [KW];
- $P_{out}$  → Potência de saída, na ponta de eixo [KW];
- $S$  → Potência aparente [KVA];
- $P$  → Potência ativa [KW];
- $P_{fe}$  → Perda no ferro no estator [KW];

- $P_{cu,s}$  → Perda no cobre do estator [KW];
- $P_{cu,r}$  → Perda no cobre do rotor [KW];
- $P_{a\&v}$  → Perda por atrito e ventilação [KW];
- $P_a$  → Perdas adicionais [KW].

As perdas de potência são atribuídas às características construtivas da máquina de indução, bem como das propriedades dos materiais que compõem o núcleo magnético e das características dos condutores utilizados no enrolamento das bobinas do estator e rotor e são inversamente proporcionais ao rendimento da máquina de indução, ou seja, quanto maior as perdas, menor será o rendimento da máquina. A potência elétrica de entrada ( $S_{in}$ ) tem a incumbência de fornecer a energia reativa necessária para a magnetização da máquina de indução, suprir as perdas consumidas pelos componentes internos e disponibilizar o torque necessário para acionar o equipamento acoplado ao eixo do motor de tal forma que a potência útil na ponta de eixo disponibilize um torque acelerante superior ao torque do conjunto acionado, sendo esta a principal característica no dimensionamento do motor.

Seguindo o fluxo da corrente elétrica, a primeira perda acontece no cobre dos fios utilizados no enrolamento de campo do estator ( $P_{cu}$ ). Esta perda, também denominada perda Joule, ocorre em função da resistência oferecida pelas bobinas dos enrolamentos de campo ao fluxo da corrente elétrica, sendo proporcional ao produto do quadrado da corrente do estator pela resistência ôhmica por ele oferecida ( $I^2 R_e$ ). As perdas no cobre variam com a temperatura, pois o valor de resistência do circuito do estator ( $R_e$ ) é diretamente proporcional à variação da temperatura. O fluxo de corrente através do enrolamento de campo, gera uma pequena perda que é dissipada na forma de calor, sendo esta, um dos principais fatores relacionados ao aquecimento da máquina de indução. Esta perda pode ser minimizada aumentando-se a seção transversal dos condutores utilizados no enrolamento de campo. Ainda no circuito do estator, ocorrem as perdas no ferro ( $P_{fe}$ ), que são geradas no núcleo do estator em consequência às correntes parasitas (Foucault) resultante do fluxo da corrente induzida nas lâminas do mesmo, e do fenômeno de histerese. Estas perdas estão relacionadas à densidade do fluxo magnético, frequência e qualidade do material ferromagnético utilizado na fabricação

do núcleo do estator. Para minimizar tais efeitos, o núcleo é constituído por lâminas finas, tratadas termicamente, cuja espessura, depende do propósito do projeto, como por exemplo se o motor é de alto rendimento. Quanto mais finas, menores serão as perdas, geralmente as espessuras são inferiores a 0,5mm. A potência resultante neste ponto é então transferida ao rotor através do entreferro.

No rotor, assim como no estator, ocorrem os mesmos fenômenos, como as perdas Joule ( $I^2.R_r$ ) e as perdas no ferro ( $P_{fer}$ ), porem esta última, em condição normal de funcionamento é muito pequena em virtude da baixa frequência no rotor, pois o escorregamento é muito pequeno e a velocidade do rotor chega muito próximo à velocidade do campo girante (velocidade síncrona). Diferentemente do estator, não se pode alterar a seção transversal dos condutores, pura e exclusivamente com o propósito de minimizar as perdas no rotor, este conceito deve ser explorado com mais critério, pois o torque de partida da máquina de indução é influenciado e em determinadas aplicações, controlado através da variação da resistência do rotor.

Fora das condições nominais, a distribuição percentual das perdas é totalmente diferente, uma vez que o valor absoluto de cada componente das perdas totais varia significativamente. A Figura 3.6 mostra as características típicas de perdas de um motor de 15CV em função do percentual de potência mecânica fornecida em seu eixo (Yamachita, 2013).

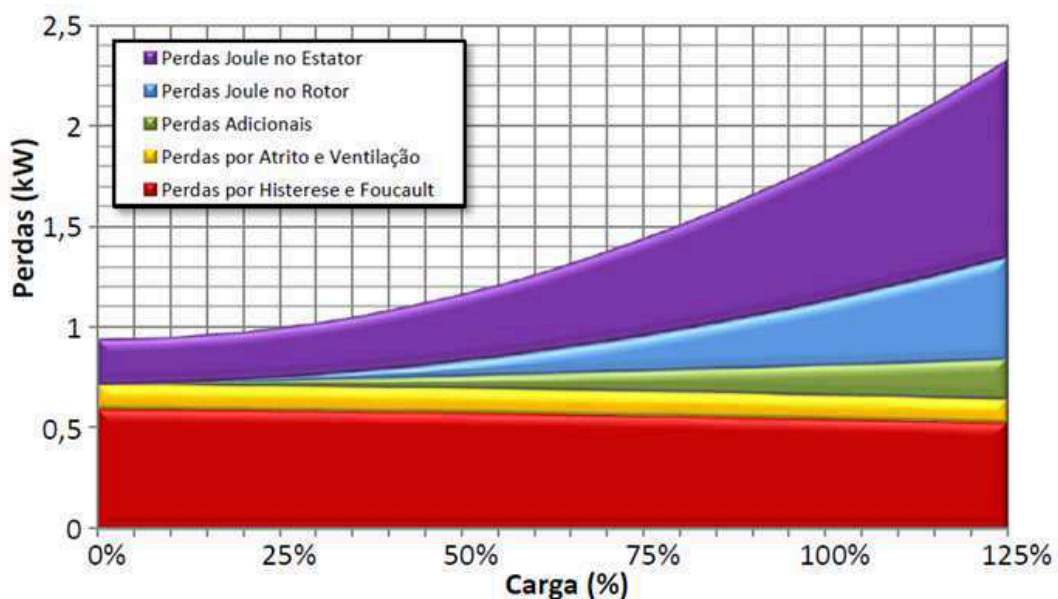


Figura 3.6: Perdas em função da carga

Fonte: BORTONI, 2007

$$P_{in} = V \cdot I_s \cdot \cos\varphi \quad (3.1)$$

$$P_{eletr} = P_{gap} = P_{in} - P_{cu,s} - P_{fe} \quad (3.2)$$

$$P_{cu,s} = n_{fases} \cdot I_s^2 \cdot R_s \quad (3.3)$$

$$P_{cu,r} = n_{fases} \cdot I_r^2 \cdot R_r \quad (3.4)$$

$$P_{mec} = n_{fases} \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} - n_{fases} \cdot I_r^2 \cdot R_r \quad (3.5)$$

$$P_{mec} = P_{gap}(1 - s) \quad (3.6)$$

$$P_{eletr} = n_{fases} \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (3.7)$$

$$P_{mec\ \acute{u}til} = P_{mec} - P_{a+v} \quad (3.8)$$

- $P_{in}$  → Potência de entrada [KW];
- $P_{gap}$  → Potência no entreferro [KW];
- $P_{eletr}$  → Potência eletromagnética [KW];
- $P_{mec}$  → Potência mecânica [KW];
- $P_{mec\ \acute{u}til}$  → Potência mecânica útil na ponta de eixo [KW];
- $P_{cu,s}$  → Perda no cobre no estator [KW];
- $P_{cu,r}$  → Perda no cobre no rotor [KW];
- $P_{fe}$  → Perda no ferro no estator [KW];
- $P_{a+v}$  → Perda por atrito e ventilação [KW];
- $n_{fases}$  → Número de fases;
- $I_s$  → Corrente no estator [A];
- $I_r$  → Corrente no rotor [A];
- $R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $R_r$  → Resistência das barras do rotor [ $\Omega$ ];

$S$  → Escorregamento [%].

### 3.4.4 Rendimento

Impulsionado pela crise energética, motivo de preocupação de especialistas do setor, pesquisadores e fabricantes de motores elétricos tem concentrado esforços no desenvolvimento de motores de melhor capacidade na conversão de energia. Para alcançar tal característica, no projeto destes motores são utilizados materiais de melhor qualidade no que tange à redução de perdas, como chapas magnéticas de aço silício mais finas, com maior teor de silício, de tal forma que não comprometa a rigidez mecânica do conjunto, minimizando as correntes de dispersão, bem como redução da corrente de magnetização e melhoria de desempenho.

A quantidade de cobre utilizado nos enrolamentos do estator é outra técnica que pode ser empregada para a redução das perdas por efeito joule, pois quanto maior a quantidade de cobre, menores serão as perdas por efeito joule. Com estas e outras características, estes motores consomem menos energia para manter a mesma potência na ponta de eixo, durante o mesmo ciclo de operação. Quanto maiores as perdas, menor será o rendimento. Este é calculado pela relação entre a potência mecânica de saída na ponta de eixo e a potência elétrica ativa de entrada, sendo  $P_e$  igual a  $P_m$  mais as perdas. Praticamente a ordem de grandeza de rendimentos deste tipo de máquina está na faixa de 80 a 90%.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e}, \text{ ou } \eta = \frac{P_m}{P_e} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

$\eta$  → Rendimento [%];

$P_e$  → Potência ativa na entrada [KW];

$P_m$  → Potência mecânica de saída [KW].

Além do uso de motores de alto rendimento, deve-se evitar o uso de motores superdimensionados ou que fiquem longos períodos em vazio (carga nula), para evitar o consumo de uma energia que não produz trabalho, além de cabos condutores de maior seção para alimentação dos motores. O rendimento do motor

cai drasticamente para cargas abaixo de 50% da nominal. Este comportamento é ilustrado na Figura 3.7.

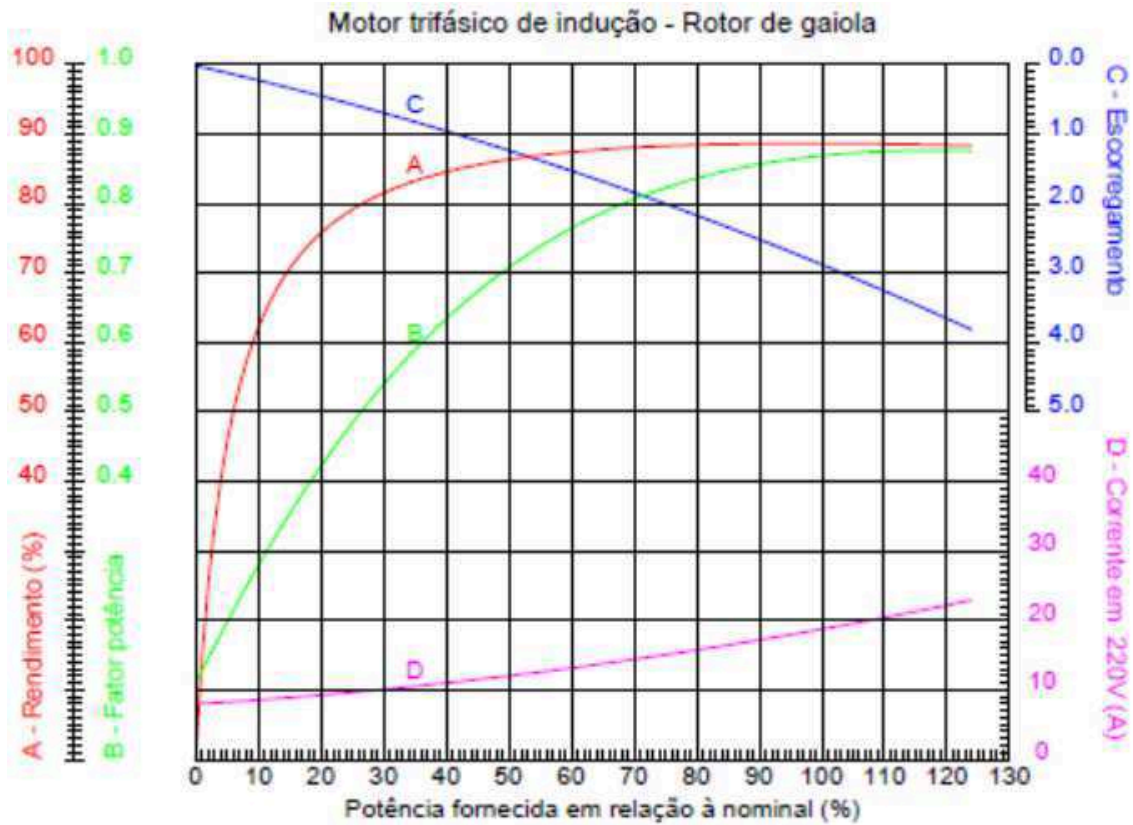


Figura 3.7: Rendimento em função da potência de saída

Fonte: WEG, 2015

Para que um motor de indução possa ter seu rendimento melhorado, o mesmo deve possuir as seguintes características:

- Chapas magnéticas de melhor qualidade (mais finas e com maior teor de silício);
- Maior quantidade de cobre nos enrolamentos do estator;
- Alto fator de enchimento das ranhuras;
- Tratamento térmico do rotor.



## 4 ENSAIOS PRÁTICOS

Os resultados obtidos do estudo são baseados em um protótipo montado em laboratório conforme ilustrado nas Figuras 4.1 e 4.2. Para gerador de indução foi utilizado um motor de indução trifásico com rotor tipo gaiola de esquilo de 3CV, tensões 220/380/440 V, rotação nominal 1720 RPM, conforme ilustrado na Figuras 4.1. Os demais equipamentos estão relacionados na Figura 4.2.



Figura 4.1: Bancada de ensaio

Fonte: UNITAU, 2015



Figura 4.2: Bancada de ensaio

Fonte: UNITAU, 2015

Componentes da bancada de ensaio:

- 1 → Gerador de indução;
- 2 → Motor CC (simulador da máquina primária);
- 3 → Varivolt;
- 4 → Analisador de rede;
- 5 → Analisador de energia;
- 6 → Amperímetro;
- 7 → Bancada de testes;
- 8 → Banco de capacitores;
- 9 → Banco de resistência (emulação da carga);
- 10 → Alicates amperímetros (gerador);
- 11 → Tacômetro;
- 12 → Alicates amperímetros (banco de capacitores).

#### 4.1 Ensaio em vazio

Quando a máquina de indução opera sem carga, o torque desenvolvido pela mesma é mínimo. Em uma máquina ideal, sem carga não há perdas mecânicas nem energia mecânica desenvolvida. A corrente de fluxo no rotor é indicativo da existência de torque. Se nenhum torque é produzido, pode-se concluir a inexistência do fluxo de corrente. Neste ensaio, o ramo referente ao circuito do rotor funciona como um circuito aberto. O mesmo raciocínio pode ser aplicado à velocidade do rotor, na ausência de carga, a velocidade do rotor seria a mesma do campo magnético do estator, com escorregamento igual a zero. Desta forma, a impedância do circuito do rotor é considerada infinita, ou seja, um circuito aberto, fazendo com que a corrente circule apenas pelo ramo dos componentes de magnetização da máquina de indução. Desta maneira, o circuito equivalente pode ser simplificado conforme Figura 4.3.

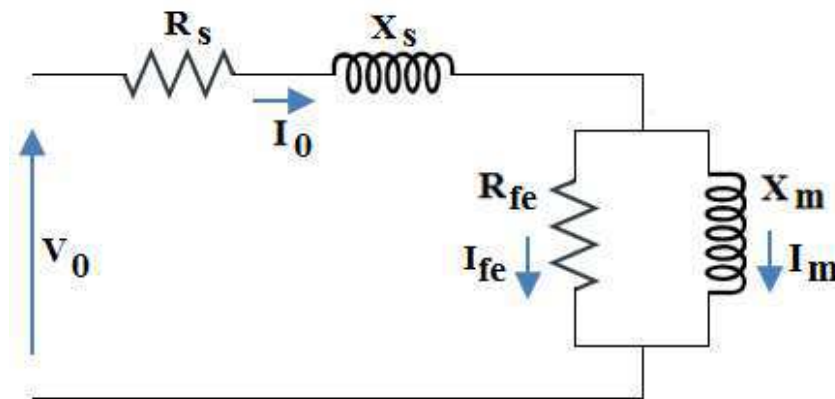


Figura 4.3: Circuito equivalente no ensaio em vazio

- $V_0$  → Tensão de fase aplicada aos terminais do estator [V];
- $R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X_s$  → Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $R_{fe}$  → Resistência que representa a perda no ferro [ $\Omega$ ];
- $X_m$  → Reatância de magnetização [ $\Omega$ ];
- $I_0$  → Corrente do estator [A];
- $I_{fe}$  → Corrente que atravessa a resistência associada às perdas no material ferromagnético [A];
- $I_m$  → Corrente de magnetização [A].

Através do ensaio em vazio pode-se obter informações da corrente de excitação, determinar as perdas em vazio e parte dos parâmetros da máquina de indução ( $R_{fe}$  e  $X_m$ ), importantes para o desenvolvimento dos cálculos da energia reativa necessária à operação do gerador de indução. Neste ensaio, a máquina de indução é desacoplada do processo e nenhuma carga é submetida à ponta de eixo (rotor). Para que os resultados não sejam influenciados pela inércia ao colocar a máquina em movimento, o ensaio é realizado partindo-se da máxima tensão (125% da nominal) para a mínima, até que a tensão nos terminais do estator chegue a um valor próximo de zero, no momento em que a corrente do mesmo comece a subir. No ensaio deve-se medir os valores de tensão e corrente nas três fases e a potência trifásica. Neste caso, como a máquina não possui carga acoplada ao eixo, a velocidade do rotor chega muito próximo à velocidade do campo girante, fazendo com que o escorregamento tenha um valor

muito pequeno, próximo de zero. O fato de não possuir cargas acopladas ao eixo, a potência consumida pela máquina supre apenas as perdas rotacionais, efeito Joule e as perdas no ferro no estator. As perdas em vazio (atrito, ventilação e suplementares) podem ser determinadas através do levantamento de uma curva (tensão versus corrente), começando com um valor de tensão em torno de 125% da nominal, reduzindo gradativamente até um valor próximo de zero com quantidade de pontos suficientes para traçar uma curva que represente as características da máquina de indução. Na medida em que a tensão aplicada é reduzida, o valor da corrente também é reduzido. A diminuição da tensão deve ser imposta até que o valor da corrente comesse a subir, a partir deste ponto, os valores medidos devem ser desconsiderados para não causar distorções na determinação das perdas em vazio. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados do ensaio a vazio.

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio a vazio

ENSAIO A VAZIO										
ITEM	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)				POTÊNCIA (W)			ROTAÇÃO (RPM)	S (%)
	Fase - RS	FASE R	FASE S	FASE T	MÉDIA	RT	ST	RT + ST		
1	250	6,3	5,8	6,12	6,07	-640	900	260	1799	0,06
2	240	5,55	5,12	5,34	5,34	-560	780	220	1799	0,06
3	230	4,86	4,51	4,7	4,69	-470	640	170	1799	0,06
4	220	4,32	4,03	4,12	4,16	-410	560	150	1799	0,06
5	210	3,91	3,68	3,79	3,79	-360	490	130	1798	0,11
6	200	3,68	3,32	3,46	3,49	-320	440	120	1798	0,11
7	190	3,35	3,13	3,24	3,24	-280	400	120	1798	0,11
8	180	3,1	2,91	2,93	2,98	-245	345	100	1799	0,06
9	170	2,96	2,7	2,76	2,81	-220	320	100	1799	0,06
10	160	2,69	2,54	2,57	2,60	-195	270	75	1797	0,17
11	150	2,52	2,36	2,39	2,42	-170	240	70	1799	0,06
12	140	2,33	2,18	2,22	2,24	-145	205	60	1799	0,06
13	130	2,15	2	2,04	2,06	-125	180	55	1798	0,11
14	120	1,97	1,83	1,85	1,88	-100	150	50	1798	0,11
15	110	1,77	1,67	1,68	1,71	-85	126	41	1798	0,11
16	100	1,62	1,52	1,54	1,56	-72	108	36	1797	0,17
17	90	1,42	1,34	1,37	1,38	-54	86	32	1797	0,17
18	80	1,26	1,2	1,22	1,23	-40	70	30	1797	0,17
19	70	1,12	1,05	1,08	1,08	-30	56	26	1797	0,17
20	60	0,95	0,92	0,93	0,93	-20	44	24	1798	0,11
21	50	0,81	0,77	0,79	0,79	-13	33	20	1796	0,22
22	40	0,68	0,62	0,66	0,65	-7	23	16	1792	0,44
23	30	0,57	0,53	0,55	0,55	-2	17	15	1784	0,89
24	20	0,54	0,5	0,55	0,53	1	12	13	1752	2,67
25	10	0,74	0,64	0,72	0,70	-1	6	5	0	
26	0				0,00			0		

Para determinação das perdas em vazio, a curva levantada deve ser extrapolada até o eixo das ordenadas. O ponto sobre o eixo das ordenadas interceptado pela curva de saturação da máquina corresponde às perdas em vazio, conforme pode ser visto na Figura 4.4. Conforme citado anteriormente, os dados obtidos nas medições 25 e 26 (Tabela 4.1) foram desconsiderados para o levantamento das perdas em vazio, pois o valor da corrente começa a subir.

Uma das componentes mais significativas das perdas no ferro é a perda no núcleo, a qual é resultante de dois diferentes efeitos, o efeito da histerese e as correntes parasitas induzidas nas lâminas do núcleo. Com o resultado do ensaio a vazio é possível também determinar as perdas no ferro  $R_{fe}$  e a reatância de magnetização  $X_m$  os quais podem ser obtidos pelas Equações (4.1) e (4.2):

$$R_{fe} = \frac{V_{of}^2}{P_o} \quad (4.1)$$

$$X_{mf} = \frac{V_{of}}{I_{mf}} \quad (4.2)$$

Sendo:

$R_{fe}$  → Resistência que representa as perdas no ferro [ $\Omega$ ];

$X_{mf}$  → Reatância de magnetização por fase [ $\Omega$ ];

$V_{of}$  → Tensão nos terminais do estator por fase [V];

$P_o$  → Potência ativa [kW];

$I_{mf}$  → Corrente de magnetização por fase [A].

A perda no ferro pode ser determinada utilizando a Equação (4.3):

$$P_{fe} = P_o - 3 \cdot I_{of}^2 \cdot R_s - P_{rotor} \quad (4.3)$$

$P_{fe}$  → Perda no ferro [W];

$P_o$  → Potência ativa [KW];

$I_{of}$  → Corrente no estator por fase [A];

$R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];

$P_{rotor}$  → Perda no rotor [W].



Não havendo variação na tensão de entrada, esta perda será constante.

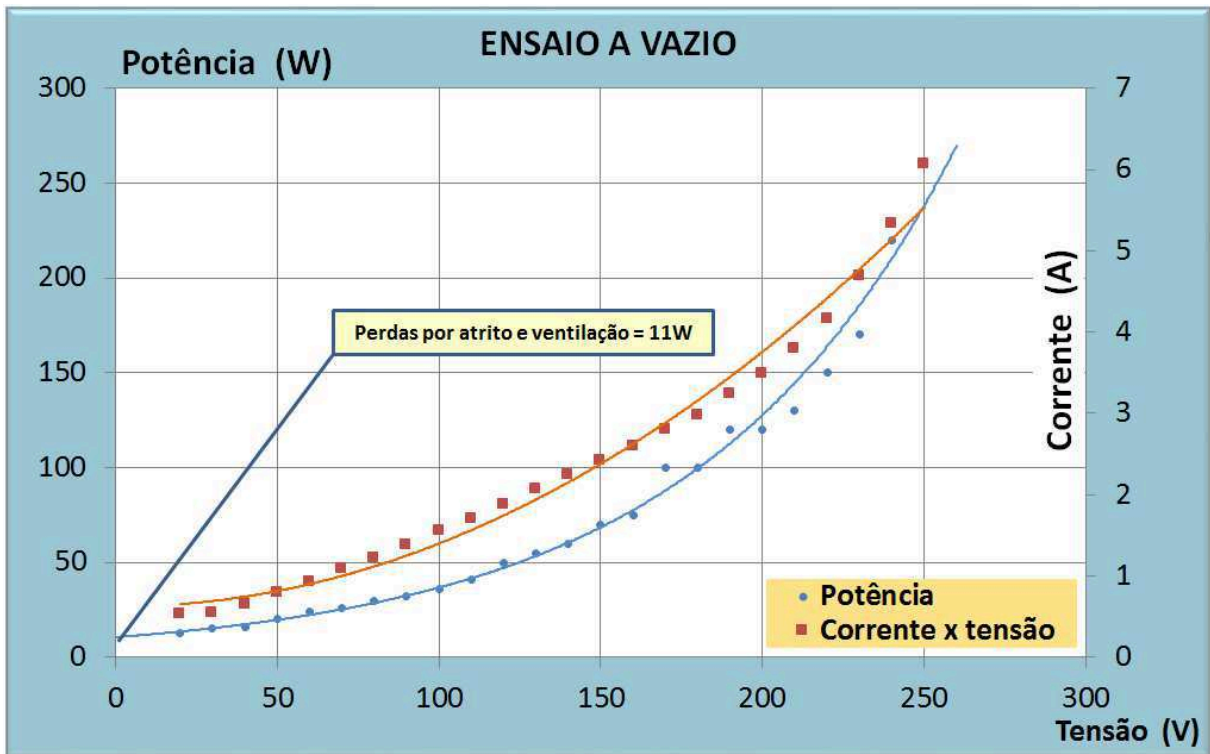


Figura 4.4: Ensaio a vazio

## 4.2 Ensaio com rotor bloqueado

Através deste ensaio é possível determinar a resistência e reatância de dispersão do circuito equivalente da máquina de indução, importantes para o cálculo dos parâmetros operacionais do gerador de indução. Na condição de rotor bloqueado a resistência variável é nula, pois o escorregamento é unitário ( $s = 1$ ) e o fluxo de corrente através do ramo de magnetização é muito baixo, podendo ser desconsiderado sem que cause erros significativos. Dessa forma o circuito equivalente pode ser simplificado de acordo com a Figura 4.5.

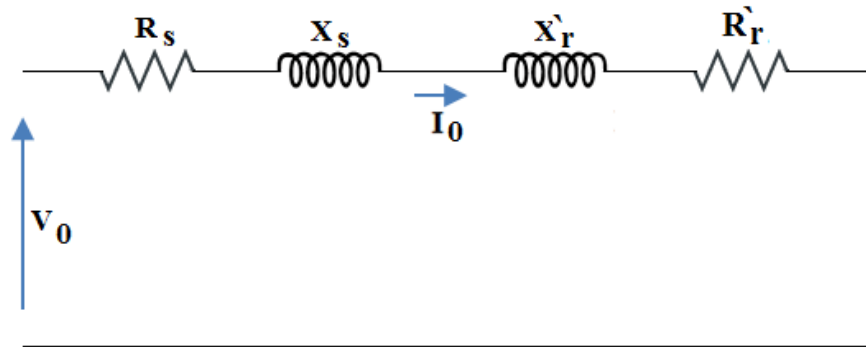


Figura 4.5: Circuito equivalente no ensaio de rotor bloqueado

- $V_0$  → Tensão de fase aplicada aos terminais do estator [V];
- $R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X_s$  → Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X'_r$  → Reatância de dispersão do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];
- $R'_r$  → Resistência das barras do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];
- $I_0$  → Corrente do estator [A].

O ensaio de rotor bloqueado é realizado travando-se o rotor e aplicando-se uma pequena tensão nos terminais da máquina de indução, aumentando gradativamente até atingir o valor nominal de corrente da máquina de indução. Neste ensaio deve ser medida a potência, tensão e corrente por fase.

Tabela 3.2 - Ensaio de rotor bloqueado

ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO									
ITEM	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)				POTÊNCIA (W)			ROTAÇÃO (RPM)
	Fase - RS	FASE R	FASE S	FASE T	MÉDIA	RT	ST	RT + ST	
1	43,5	9,11	8,47	8,68	8,75	-26	370	344	0

A resistência do estator  $R_s$  pode ser medida diretamente nos terminais da máquina de indução através de um ensaio CC utilizando ponte de *wheatstone* [4]. Com o valor de  $R_s$  é possível determinar o valor da resistência por fase do rotor referida ao estator ( $R'_r$ ), conforme Equações (4.4) e (4.5).

$$P_{rb} = 3 \cdot (R_s + R'_r) \cdot I_0^2 \quad \rightarrow \quad R'_r = \frac{P_{rb}}{3 \cdot I_0^2} - R_s \quad (4.4)$$

$$R_{rb} = R_s + R'_r \quad (4.5)$$

$$Z_{rb} = \frac{V_0}{I_0} \quad (4.6)$$

$$X_{rb} = \sqrt{(Z_{rb})^2 - (R_{rb})^2} \quad (4.7)$$

$$X_{rb} = X_s + X'_r \quad (4.8)$$

$$X_r = (X_{rb} - X_s) \left( \frac{X_{vz} - X_s}{X_{vz} - X_{rb}} \right) \quad (4.9)$$

- $P_{rb}$  → Potência de rotor bloqueado [KW];
- $R_s$  → Resistência do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $R'_r$  → Resistência das barras do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ];
- $I_0$  → Corrente do estator [A];
- $R_{rb}$  → Resistência de rotor bloqueado [ $\Omega$ ];
- $Z_{rb}$  → Impedância de rotor bloqueado [ $\Omega$ ];
- $V_0$  → Tensão aplicada aos terminais do estator por fase [V];
- $X_{rb}$  → Reatância de rotor bloqueado [ $\Omega$ ];
- $X_s$  → Reatância de dispersão do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $X'_r$  → Reatância de dispersão do rotor referida ao estator [ $\Omega$ ].

Tabela 4.3 - Distribuição empírica de reatância de dispersão em motores de indução

CLASSE DO MOTOR	DESCRIÇÃO	Fração de $X_1 + X_2$	
		$X_1$	$X_2$
A	Conjugado normal de partida, corrente normal de partida	0,5	0,5
B	Conjugado normal de partida, baixa corrente de partida	0,4	0,6
C	Alto conjugado de partida, baixa corrente de partida	0,3	0,7
D	Alto conjugado de partida, alto escorregamento	0,5	0,5
Bobinado	Desempenho varia de acordo com a resistência do rotor	0,5	0,5

Fonte: ARTHUR E. FITZGERALD, 2003



### 4.3 Equipamentos da bancada de ensaios

A avaliação do desempenho dos geradores assíncronos pode ser realizada seguindo-se duas linhas de pesquisa: Utilizando-se recursos computacionais para desenvolvimento de modelos matemáticos para simulação e equacionamento dos parâmetros do sistema, ou através de ensaios práticos desenvolvidos em laboratório. Considerando-se a quantidade de equipamentos envolvidos nos ensaios práticos, o custo de aquisição de tais recursos, praticamente inviabiliza a segunda alternativa, apesar desta agregar maior experiência no emprego de máquinas elétricas. Apesar da desvantagem mencionada, toda a linha de pesquisa foi baseada em ensaios práticos, pois o laboratório da UNITAU dispõe de todos os recursos necessários para o desenvolvimento da pesquisa. A Tabela 4.4 relaciona a lista de equipamentos necessários para o desenvolvimento deste estudo.

Tabela 4.4 - Relação de equipamentos para bancada de ensaios

Item	Equipamento	Qtde	Custo Unitário	Custo Total
1	Disjuntor tripolar 20A	1	R\$ 70,00	R\$ 70,00
2	Contator tripolar 25A / 220V	2	R\$ 75,00	R\$ 150,00
3	Chave comutadora de 3 posições	2	R\$ 48,00	R\$ 96,00
4	Botão de comando duplo	2	R\$ 45,00	R\$ 90,00
5	Retificador trifásico SKD 30/12	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
6	Capacitor para filtro	2	R\$ 27,00	R\$ 54,00
7	Voltímetro ferro móvel (CA) 250V	2	R\$ 90,00	R\$ 180,00
8	Voltímetro bobina móvel (CC) 250V	1	R\$ 290,00	R\$ 290,00
9	Amperímetro bobina móvel (CC) 30A	2	R\$ 300,00	R\$ 600,00
10	Miliamperímetro bobina móvel (CC) 0/800mA	2	R\$ 300,00	R\$ 600,00
11	Borne com rosca na cor vermelha	40	R\$ 4,00	R\$ 160,00
12	Borne com rosca na cor preta	40	R\$ 4,00	R\$ 160,00
13	Borne com rosca na cor azul	36	R\$ 4,00	R\$ 144,00
14	Borne com rosca na cor verde	3	R\$ 4,00	R\$ 12,00
15	Garra jacaré na cor preta	6	R\$ 6,00	R\$ 36,00
16	Garra jacaré na cor vermelha	6	R\$ 6,00	R\$ 36,00
17	Tomada de 10A	2	R\$ 6,00	R\$ 12,00
18	Pino banana na cor vermelha	20	R\$ 4,00	R\$ 80,00
19	Pino banana na cor preta	20	R\$ 4,00	R\$ 80,00
20	Pino banana na cor azul	20	R\$ 4,00	R\$ 80,00
21	Cabo flexível de 2,5mm (rolo de 100m)	1	R\$ 70,00	R\$ 70,00
22	Rolo de estanho para solda (10m)	1	R\$ 18,00	R\$ 18,00
23	Analizador de energia digital portátil	1	R\$ 16.000,00	R\$ 16.000,00
24	Alicate amperímetro digital (ET-3200A)	4	R\$ 250,00	R\$ 1.000,00
25	Tacômetro ótico e contato digital	1	R\$ 350,00	R\$ 350,00
26	Capacitor 5mF X 250V	30	R\$ 16,00	R\$ 480,00
27	Resistor de 100W / 500Ω	60	R\$ 39,00	R\$ 2.340,00
28	Regulador de tensão trifásico 220V - 380V 1,5KVA	1	R\$ 500,00	R\$ 500,00
29	Regulador de tensão trifásico 220V - 380V 4,5KVA	1	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
30	Motor de indução trifásico de 3CV	1	R\$ 900,00	R\$ 900,00
31	Motor de corrente contínua de 3CV	1	R\$ 6.000,00	R\$ 6.000,00
<b>TOTAL</b>				<b>R\$ 31.928,00</b>

## 5 CAPACITÂNCIA REQUERIDA

A determinação da faixa de capacitância para fornecimento de energia reativa no processo da autoexcitação do gerador de indução pode ser obtida empregando-se várias técnicas, cada uma com sua particularidade, sendo algumas com maior nível de complexidade, exatidão, mas todas chegando a um objetivo comum. A premissa básica para cada técnica é considerar que a reatância máxima para o banco de capacitores deve ser menor ou igual à reatância de magnetização não saturada da máquina de indução e que a reatância mínima não permita que o fluxo de corrente no estator ultrapasse a corrente nominal em vazio [2]. O valor adequado de operação do gerador de indução é o ponto de interseção da curva de magnetização com a reta correspondente à relação  $V/I$  do banco de capacitores, que corresponde à reatância do mesmo (ponto P2 ilustrado na Figura 5.1). Os valores da faixa de operação podem ser obtidos através do equacionamento dos parâmetros do circuito equivalente, obtidos a partir do ensaio a vazio e rotor bloqueado, considerando-se a capacitância do banco de capacitores e cargas acoplados ao circuito.

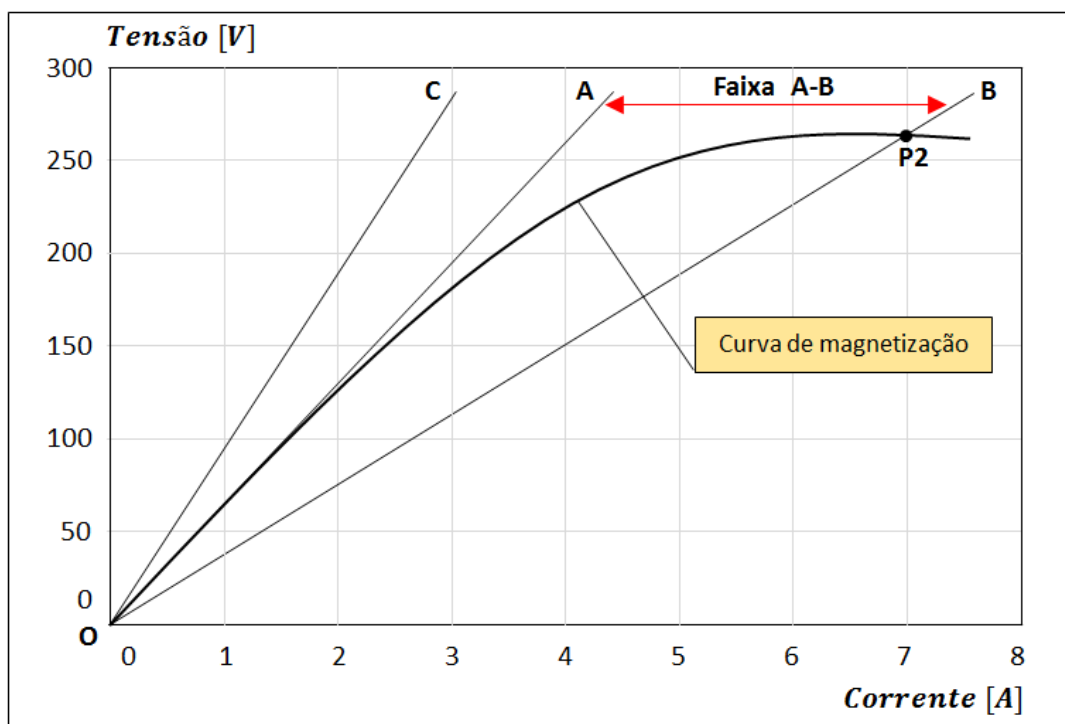


Figura 5.1: Determinação da faixa de capacitância para fornecimento de energia reativa

Uma técnica prática e muito simples, que não altera de maneira significativa a determinação dos parâmetros do sistema de excitação, é através do cálculo do coeficiente angular das retas que representam as características  $V/I$  do banco de capacitores, ilustrada na Figura 5.2. Os coeficientes angulares das retas representam as reatâncias mínima e máxima do banco de capacitores. A reta OB ilustrada na Figura 5.1, pela qual se determina a capacitância máxima, deve interceptar o ponto de saturação do núcleo conforme curva levantada no ensaio a vazio. A segunda reta (OA) que define a capacitância mínima, deve tangenciar a curva de saturação da máquina. Qualquer valor de capacitância dentro da faixa AB, calculados a partir da reatância, irá fornecer a quantidade de energia reativa necessária para promover a magnetização da máquina de indução. Vale ressaltar que, em função das características das cargas adicionadas ou removidas do circuito, haverá o deslocamento do ponto de operação como consequência da variação dos sinais gerados, mesmo mantendo a velocidade do gerador constante. Caso este ponto fique fora da faixa de operação, como exemplificado pela reta OC na Figura 5.1, o gerador perderá a magnetização e a tensão nos terminais do estator cairá a zero. A queda na frequência do sinal gerado, seja pelas características da carga ou pela variação da velocidade da máquina primária em função da demanda de torque, reduz a tensão nos terminais do estator, com consequente aumento da reatância capacitiva, já que a mesma é inversamente proporcional à frequência gerada. A cada alteração destas variáveis, tem-se um novo ponto de operação, e dependendo do valor, pode ser que o banco de capacitores não consiga suprir a quantidade de energia reativa necessária para manter o fenômeno da autoexcitação. Para minimizar este efeito, é conveniente que a capacitância mínima não possua valores muito próximos à tangente da curva de saturação da máquina de indução, para que as reações provocadas em função das características da carga adicionada ao circuito não provoquem o colapso do sistema de geração. Por outro lado, o aumento da capacitância como forma de compensar a queda de tensão provocada pelo aumento da carga, pode causar sobretensão no sistema em uma eventual rejeição de carga, considerando-se que tal sistema não possua um controle automático de estabilização da tensão e frequência.

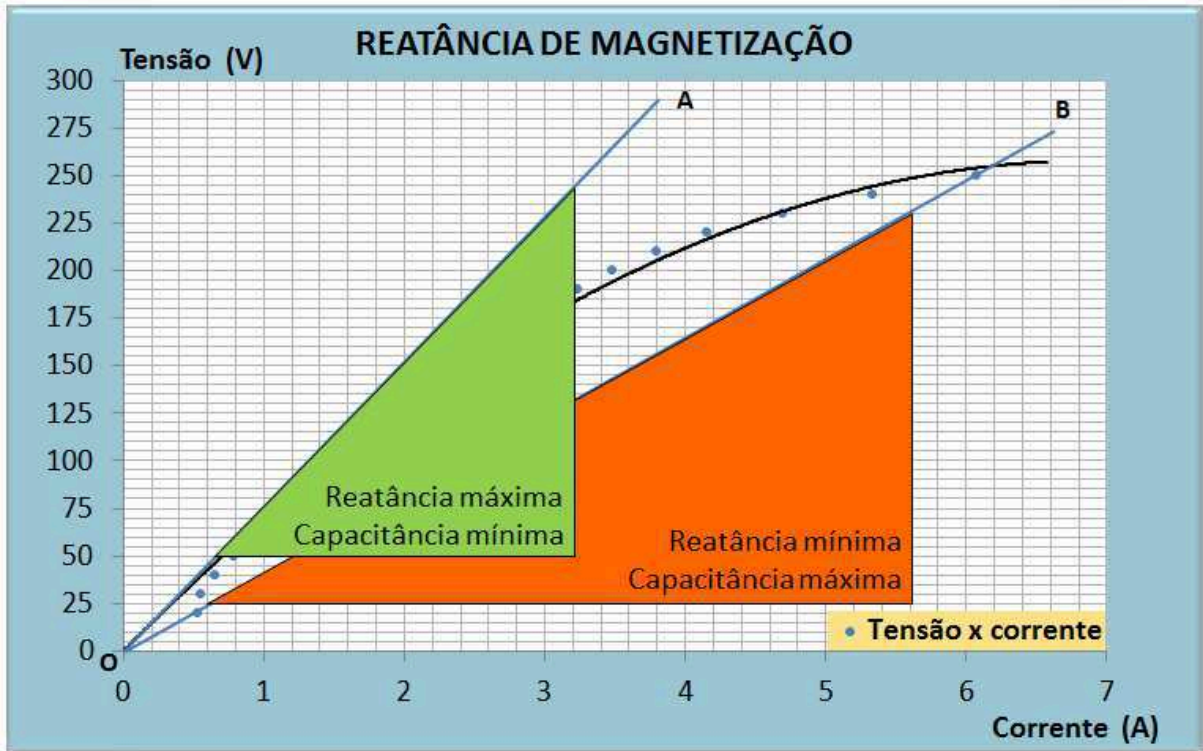


Figura 5.2: Determinação da faixa de capacitância

## 6 RESULTADOS

Os resultados dos ensaios comprovam que apesar das inúmeras vantagens oferecidas pelo gerador de indução, a regulação da tensão e frequência ainda é um dos principais motivos pelo qual o gerador de indução seja pouco utilizado nos sistemas de geração de energia elétrica em sistemas isolados. Os resultados são baseados em ensaios práticos, os quais foram obtidos de um protótipo montado em laboratório, utilizando a arquitetura conforme ilustrada na Figura 2.1. A faixa de capacitância necessária para promover a autoexcitação, conforme características do modelo em estudo foi determinada a partir da curva de saturação obtida no ensaio a vazio. Baseado em uma técnica simples e prática, determinou-se uma faixa de capacitância mínima e máxima para o banco de capacitores entre 34,82 $\mu$ F a 64,70 $\mu$ F respectivamente.

Inicialmente foi utilizado um banco de capacitores com valor de capacitância abaixo da faixa obtida nos cálculos com o objetivo de se comprovar a efetividade do método utilizado. Com tal valor de capacitância (32,50 $\mu$ F), valor obtido através da associação de capacitores, não foi possível maximizar o nível de tensão remanescente do rotor da máquina de indução, pois a energia reativa fornecida pelo banco de capacitores foi insuficiente para promover a formação do campo magnético do gerador de indução. Em seguida adicionou-se outro capacitor, elevando-se a capacitância equivalente do circuito para 35 $\mu$ F, a mínima exigida de acordo com a faixa calculada. Com este valor de capacitância e rotação do gerador em torno de 1810 RPM (acima da velocidade síncrona), iniciou-se o processo da autoexcitação com estabilização da tensão e frequência em torno 230VAC e 60,2Hz respectivamente. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio com banco de capacitores de 35 $\mu$ F

<b>CARGA VARIÁVEL COM VELOCIDADE CONSTANTE</b>									
<b>Capacitância de 35 <math>\mu</math>F e rotação média de 1811 RPM</b>									
MEDIÇÃO	CARGA (W)	CARGA ( $\Omega$ )	TENSÃO DE FASE GERADOR	TENSÃO CARGA (V)	CORRENTE MÉDIA			F (Hz)	$\omega_r$ (RPM)
					GERADOR	CAPACITOR	CARGA		
1	0	Vazio	129,5	228	5,40	3,03	0	60,2	1810
2	52	1000,0	129,5	229	5,37	3,13	0,10	60,1	1810
3	105	500,0	129,2	229	5,37	3,00	0,24	60,1	1810
4	206	250,0	128,1	227	5,37	3,07	0,49	60,2	1812
5	298	166,7	127,2	223	5,33	2,97	0,78	60,1	1810
6	387	125,0	125,3	220	5,33	2,94	1,03	59,8	1810
7	480	100,0	124,2	219	5,37	2,86	1,30	59,8	1811
8	560	83,3	122,7	216	5,33	2,88	1,58	59,8	1812
9	641	71,4	121,2	214	5,37	2,82	1,79	59,8	1812
10	706	62,5	119,3	210	5,37	2,82	2,05	59,6	1812
11	771	55,6	117,1	207	5,40	2,66	2,25	59,6	1811
12	824	50,0	115,5	203	5,47	2,70	2,47	59,6	1811
13	880	45,5	114,0	200	5,53	2,61	2,67	59,6	1812
14	876	41,7	109,3	191	5,40	2,56	2,75	59,4	1812
15	919	38,5	107,2	188	5,40	2,41	2,84	59,3	1813
16	897	35,7	102,4	179	5,40	2,27	2,96	59,3	1811
17	837	33,3	95,8	167	5,10	2,10	2,97	59,2	1812
18	566	31,3	70,7	133	3,93	1,00	2,52	59,1	1813

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 ilustram o comportamento do sistema de geração utilizando a capacitância mínima para fornecimento de potência reativa. Nesta modalidade de ensaio, a rotação foi ajustada em torno de 1810 RPM com banco de capacitores de 35 $\mu$ F e adição gradativa de carga resistiva, ou seja, rotação e capacitância constante com variação da carga. Para simulação da carga foi utilizado resistores de 500 $\Omega$  associados em paralelo de forma a obter os valores de potência correspondente à faixa de operação do sistema de geração sob o respectivo valor de capacitância. Nas etapas subsequentes, foi feito a adição gradativa de carga resistiva até o ponto em que a energia reativa fornecida pelo banco de capacitores fosse insuficiente para suprir a demanda do gerador para formação do campo magnético, causando o colapso do sistema de geração conforme ilustrado na Figura 6.3. Considerando-se a variação da tensão gerada em torno de 10%, o sistema de geração com capacitância de 35 $\mu$ F foi capaz de alimentar cargas resistivas de até 900W. Como esperado, houve queda acentuada do nível de tensão com pequena redução da frequência nos terminais do gerador, tendo em vista que o banco de capacitores não seria capaz de suprir a mudança de potência ativa na carga, pois no teste foi utilizado o valor mínimo de capacitância capaz de promover a autoexcitação do gerador. Este efeito pode ser minimizado aumentando-se a capacitância do



banco de capacitores, porém, em uma eventual rejeição de carga, haverá a elevação da tensão nos terminais do gerador, podendo causar danos aos equipamentos consumidores do sistema. A Figura 6.2 ilustra o comportamento da tensão e frequência em função da variação da carga.

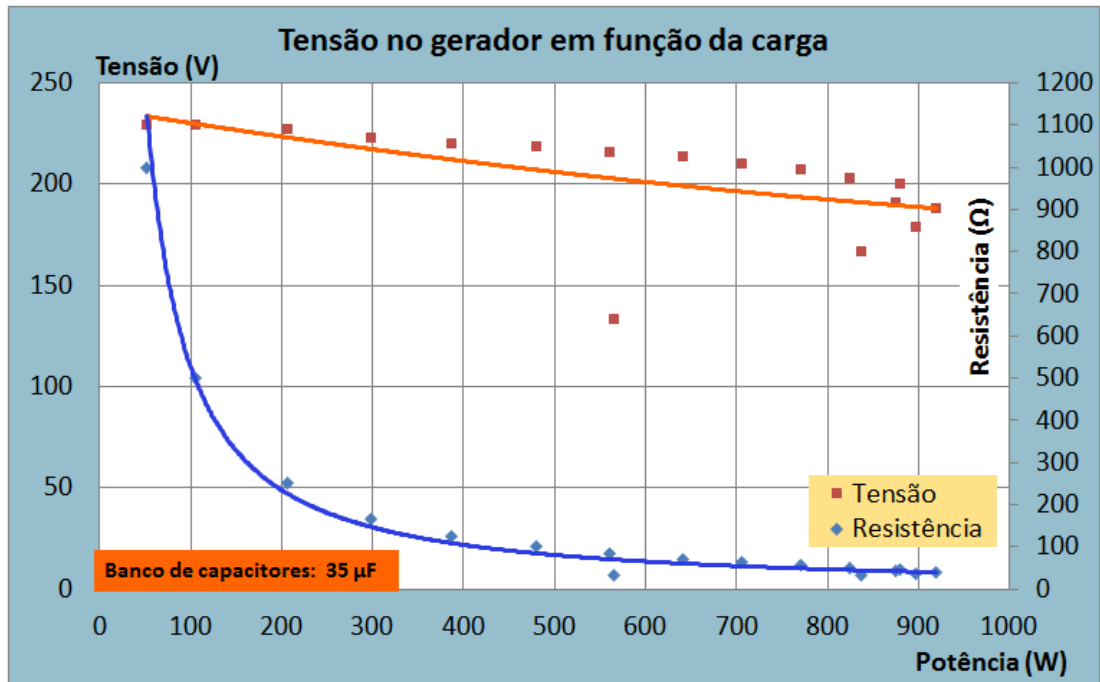


Figura 6.1: Tensão no gerador em função da carga

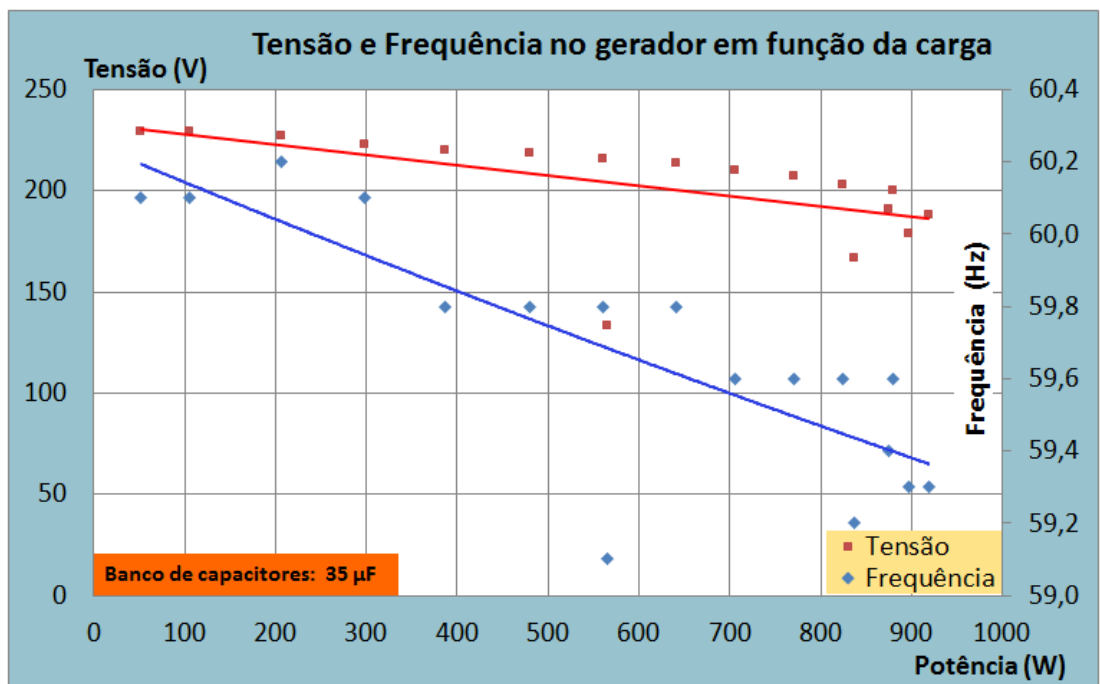


Figura 6.2: Frequência e tensão no gerador em função da carga

Não sendo o sistema composto por dispositivos de controle automático de tensão e frequência, bem como a compensação de energia reativa, como é o caso do modelo em estudo, com a variação da potência da carga, altera-se o ponto de operação do sistema de geração e não havendo a correção da energia reativa para o novo ponto de operação, dependendo do valor da carga o gerador perderá a magnetização e a tensão nos terminais do estator cairá a zero. A Figura 6.3 ilustra o momento em que o gerador de indução perde a magnetização. Com estas características, apesar de promover a autoexcitação, a fonte externa de energia reativa, é insuficiente para atender à demanda do sistema de geração quando submetido à carga. Para maior robustez dos sinais gerados, é aconselhável que se opere com valores médios de capacitância situados na faixa de operação, porem, com o aumento da capacitância, haverá elevação do nível de tensão, exigindo um método de controle para estabilização da tensão e frequência.

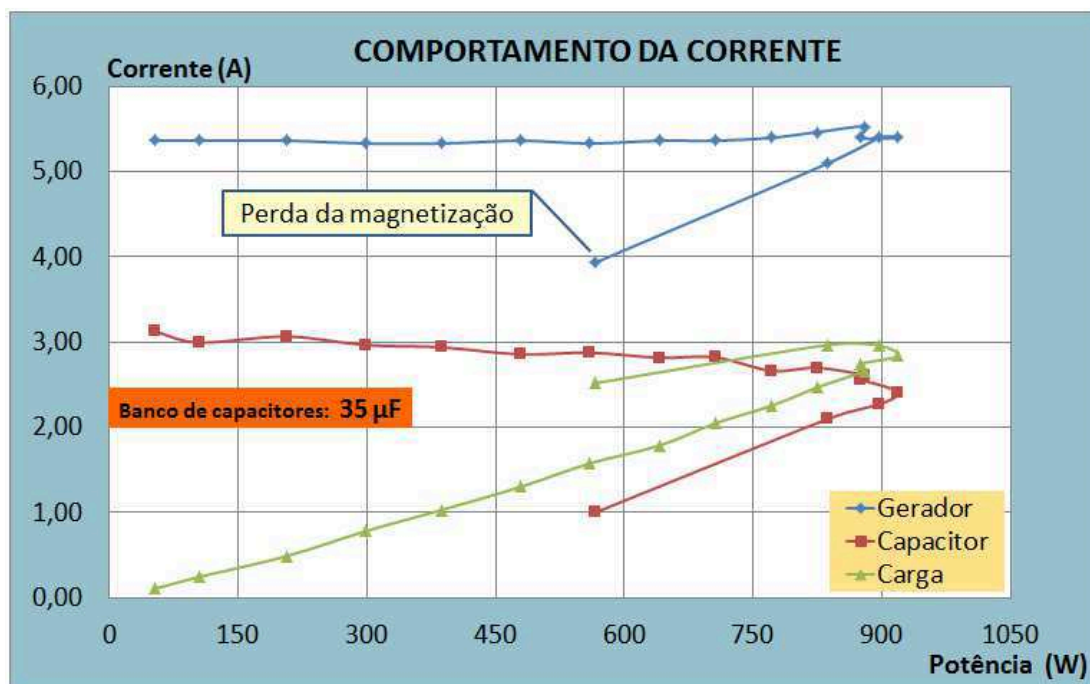


Figura 6.3: Corrente em função da carga

Um segundo ensaio foi realizado aumentando-se a capacitância do banco de capacitores de 35 para 40 $\mu$ F. Esta alteração proporcionou maior robustez ao sistema, reduzindo o percentual de queda da tensão, e disponibilizando maior demanda de potência para alimentação das cargas consumidoras. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 6.2.



Tabela 6.2 - Resultados do ensaio com banco de capacitores de 40 $\mu$ F

<b>CARGA VARIÁVEL COM VELOCIDADE CONSTANTE</b>									
<b>Capacitância de 40 <math>\mu</math>F e rotação média de 1809 RPM</b>									
MEDIÇÃO	CARGA (W)	CARGA ( $\Omega$ )	TENSÃO DE FASE GERADOR	TENSÃO CARGA (V)	CORRENTE MÉDIA			F (Hz)	$\omega_r$ (RPM)
					GERADOR	CAPACITOR	CARGA		
1	Vazio	Vazio	137,4	240	6,37	3,40	0	60,0	1804
2	119	500,0	137,3	244	6,40	3,31	0,23	60,1	1810
3	230	250,0	136,4	240	6,30	3,26	0,48	60,0	1808
4	343	166,7	135,7	239	6,30	3,22	0,74	60,0	1810
5	457	125,0	135,3	239	6,40	3,19	1,02	60,0	1810
6	571	100,0	134,1	239	6,37	3,21	1,25	60,0	1810
7	663	83,3	132,3	235	6,37	3,18	1,50	59,7	1809
8	741	71,4	131,3	230	6,40	3,10	1,70	59,7	1810
9	846	62,5	130,6	230	6,40	3,10	1,99	59,6	1810
10	928	55,6	128,3	227	6,47	3,02	2,17	59,5	1808
11	1022	50,0	127,4	226	6,50	3,01	2,43	59,5	1809
12	1084	45,5	127,5	222	6,57	2,95	2,60	59,6	1809
13	1151	41,7	125,5	219	6,57	2,92	2,85	59,3	1809
14	1224	38,5	123,1	217	6,60	2,89	3,03	59,1	1810
15	1283	35,7	121,8	214	6,70	2,83	3,30	59,1	1810

Fazendo um comparativo entre os resultados obtidos no primeiro e segundo ensaio, para alimentação de uma carga de mesma potência (900W), no primeiro ensaio (capacitância de 35 $\mu$ F) houve uma queda na tensão gerada em torno de 18%, sendo que no segundo ensaio (capacitância de 40 $\mu$ F), para alimentação da mesma carga, a queda de tensão nos terminais do gerador foi de apenas 5%, demonstrando, que se utilizado com a tecnologia adequada, a viabilidade de sua aplicação está condicionada ao uso de uma estratégia de controle para estabilização da tensão e frequência. Sem esta tecnologia, a instabilidade provocada pela transferência de cargas pode afetar o desempenho e vida útil dos equipamentos consumidores do sistema de geração.

Os resultados dos ensaios podem ser vistos nas Figuras 6.4 e 6.5. Embora não seja a variação da impedância da carga o principal motivo pela regulação insatisfatória da tensão e frequência nos geradores de indução, os resultados obtidos nos ensaios, podem quase que exclusivamente serem atribuídos a tal características, pois a redução da velocidade do rotor em consequência ao aumento do conjugado foi compensada pela máquina primária e mantida em torno de 1810 RPM. Para valores de reatância muito próximo à reatância de magnetização não saturada do gerador de indução, como realizado no primeiro ensaio (banco de 35 $\mu$ F), o sistema de geração não consegue manter uma certa estabilidade no nível dos sinais gerados, se comparado com o banco de 40 $\mu$ F. Este comportamento pode

ser visto na Figura 6.4, onde, na transferência de cargas sob o banco de  $35\mu\text{F}$ , é acentuada a queda de tensão nos terminais do gerador.

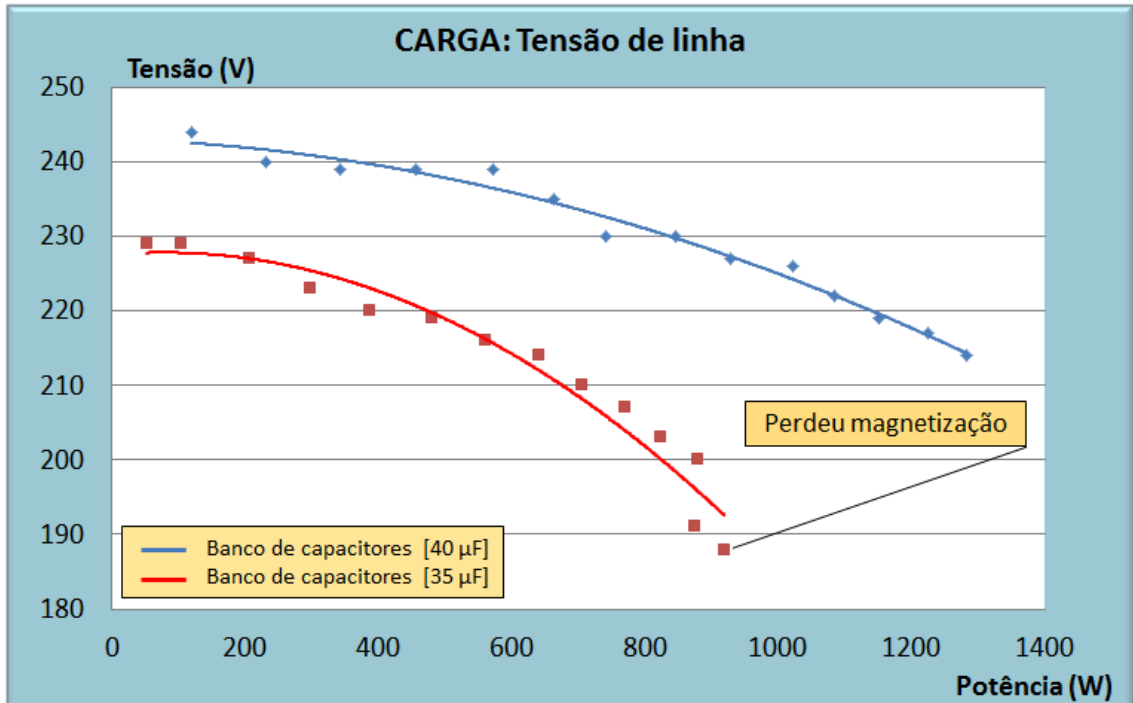


Figura 6.4: Variação da tensão de linha na carga para diferentes valores de capacitância

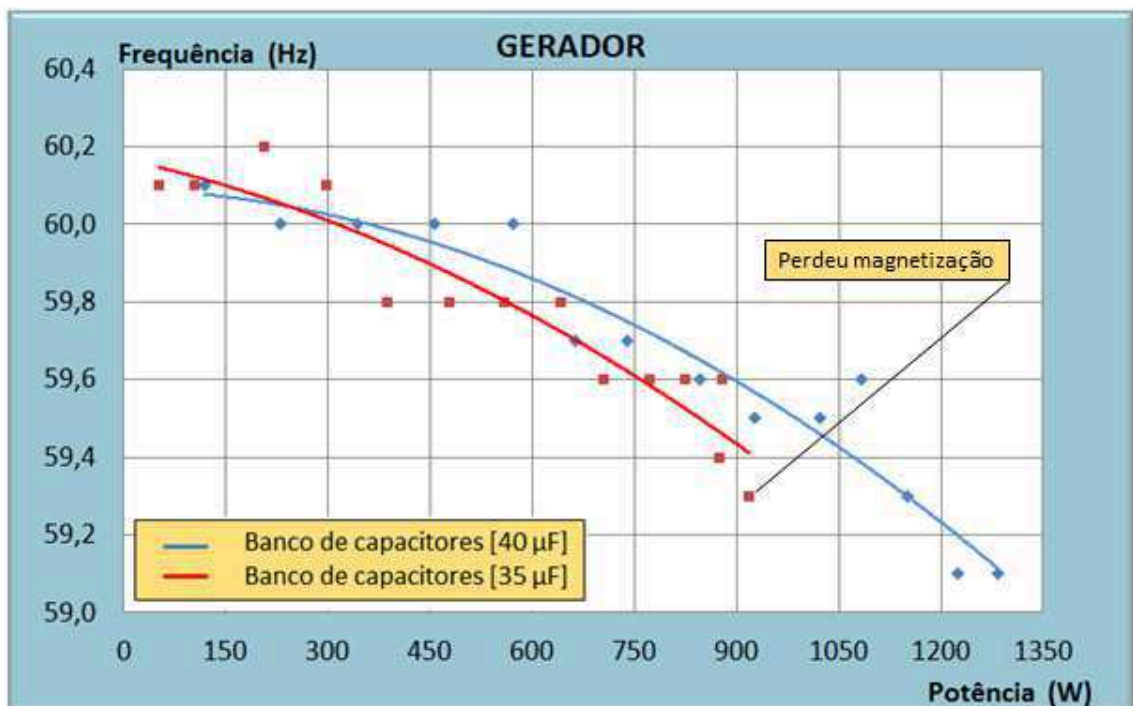


Figura 6.5: Variação da frequência em função da carga para diferentes valores de capacitância

Considerando-se as características e arquitetura do sistema de geração utilizado no ensaio, a capacitância do banco de capacitores pode ser ampliada até um limite máximo de 65 $\mu$ F sem exceder a corrente nominal do gerador em vazio, porém não foi possível fazer o experimento com valores de capacitância acima de 40 $\mu$ F em virtude das características dos capacitores disponíveis (tensão máxima de 250V).

Analisando os resultados obtidos nos ensaios observa-se maior robustez do sistema de geração à medida em que se aumenta a quantidade de energia reativa fornecida à máquina de indução, apesar do alto nível de tensão gerado, o qual pode ser corrigido através de um controle dinâmico da reatância. As Figuras 6.6 e 6.7 demonstram os resultados obtidos nos ensaios em laboratório.

Dependendo das características da carga conectada ao sistema, não sendo o mesmo equipado com técnicas adequadas para controle da tensão e frequência, a qualidade da energia gerada pode ser imprópria para alimentação de equipamentos sensíveis à variação da fonte de alimentação.

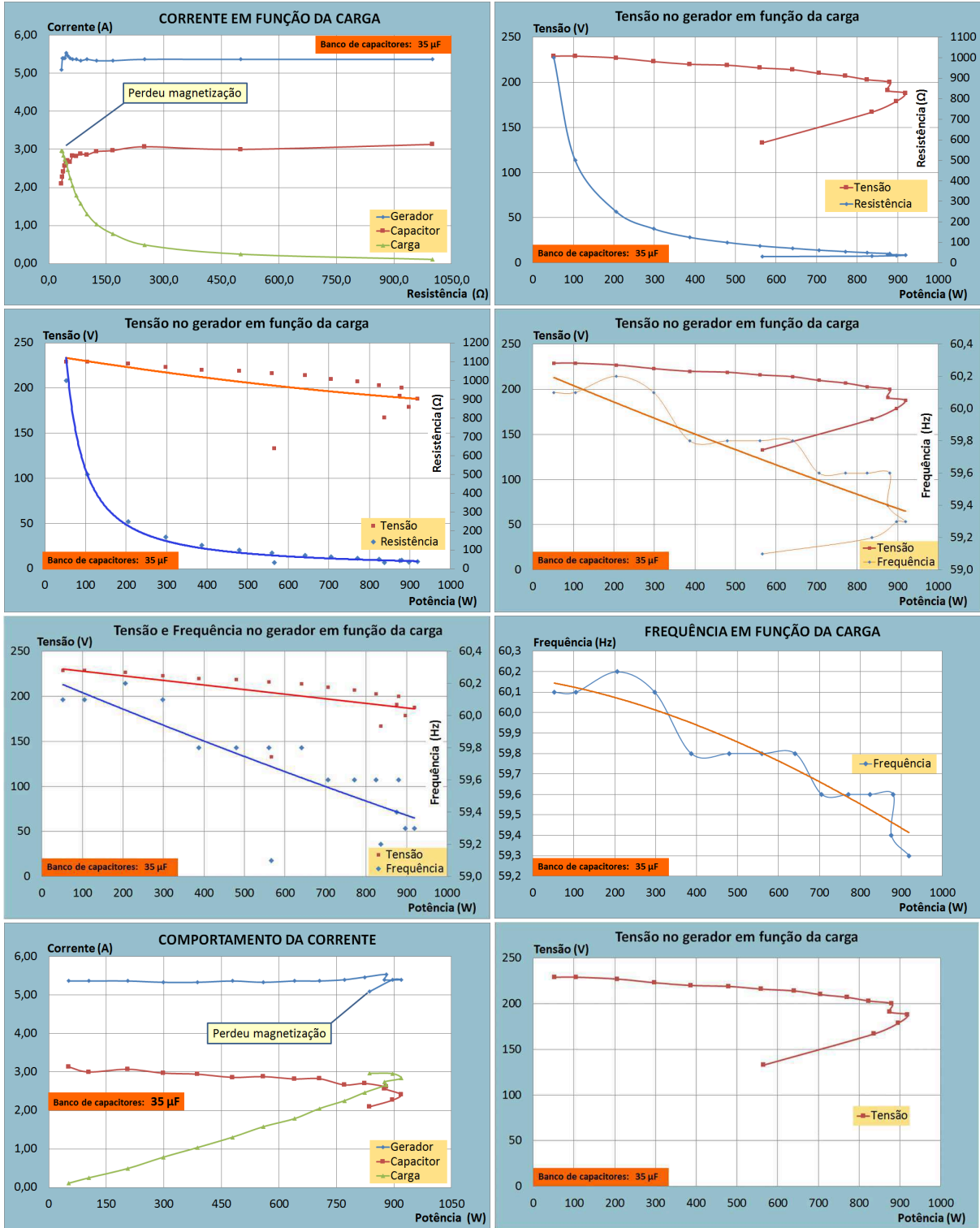


Figura 6.6: Resultado dos ensaios

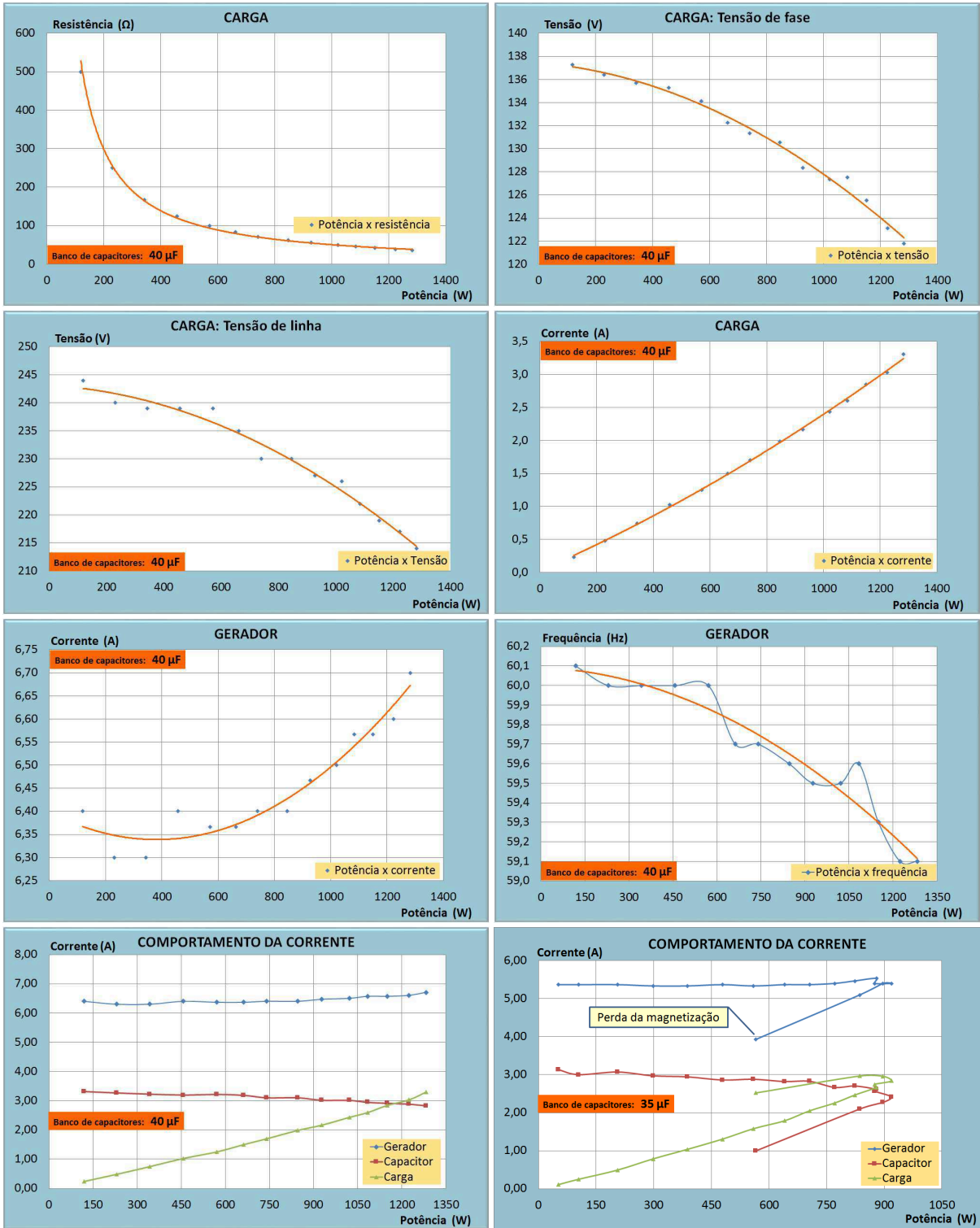


Figura 6.7: Resultados dos ensaios

## 7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a consolidação de teorias e revisão de vários conceitos, contribuindo para o crescimento pessoal e de grande aplicabilidade no setor profissional. Para o desenvolvimento do trabalho foi necessário um estudo aprofundado de máquinas elétricas, em especial aos motores de indução com rotores tipo gaiola de esquilo.

Com relação aos resultados obtidos, fica evidenciado que o gerador de indução sem um sistema para controle dos sinais gerados, não possui as características ideais para aplicações desconectadas das redes elétricas, no entanto com o desenvolvimento dos componentes eletroeletrônicos e técnicas de controle para estabilização destes sinais, tal equipamento possui grande potencial para aplicação em sistemas alternativos baseados em novas tecnologias de produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como é o caso das centrais de geração eólica, que fornece energia limpa, sem qualquer agressão ao meio ambiente.

Este trabalho também teve o objetivo de fomentar o interesse de pesquisadores e universidades na busca e desenvolvimento de soluções técnicas e economicamente atrativas que viabilizem a aplicação da máquina de indução com rotor tipo gaiola de esquilo na geração de energia elétrica, principalmente em sistemas isolados, afastados dos centros de geração e distribuição, onde não há fonte externa para fornecimento da potência reativa necessária à magnetização do gerador de indução. A robustez e simplicidade construtiva desta máquina tem aguçado o interesse de toda a comunidade científica no desenvolvimento desta tecnologia como forma de viabilizar e obter o melhor desempenho dos geradores de indução neste tipo de aplicação.

A energia elétrica é a base e sustentação do desenvolvimento e progresso, um dos principais recursos que proporciona melhoria na qualidade de vida da população. A geração e uso deste recurso devem estar vinculados a um crescimento sustentável, trazendo harmonia entre sociedade e meio ambiente. Os sistemas de geração convencionais não proporcionam este equilíbrio. Para garantir o crescimento e aproveitamento dos recursos naturais renováveis, o desenvolvimento e investimento em novas tecnologias são necessários.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de novas tecnologias que proporcionem a geração de energia elétrica baseado em fontes renováveis é uma necessidade imediata. O gerador de indução é uma alternativa viável se aplicado com técnicas adequadas. Sem uma tecnologia para o controle da energia reativa, indispensável para o bom funcionamento do sistema de geração, estabilização da tensão e frequência, a qualidade da energia gerada é imprópria para o consumo, pois terá impacto direto na vida útil dos equipamentos consumidores. Para desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se um estudo aprofundado sobre o uso de conversores de frequência como fonte de fornecimento e controle da energia reativa para o sistema de geração.

## REFERÊNCIAS

- [1] CHAPALLAZ JEAN MARC, GHALI JACQUES DOS, EICHENBERGER PETER, FISCHER GERHARD. MHPG Series, Harnessing water power on a small scale, **Manual on induction motors used as generators**, v. 10, p. 58-77, 1985.
- [2] D. E. BASSETT AND M. F. POTTER. Capacitive excitation for induction generators. **AIEE Transactions**, Vol. 54, p. 540-543, 1935.
- [3] FALCONE ÁUREO GILBERTO. Manutenção e Instalação. **Motores de Indução**. São Paulo. LVBA Comunicação, 1995.
- [4] FITZGERALD A. E., JR CHARLES KINGSLEY, KUSKO ALEXANDER. **Máquinas elétricas, Conversão eletromecânica da energia, Processos, dispositivos e sistemas**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA, 1975.
- [5] KOSOW IRVING LIONEL. **Máquinas elétricas e transformadores**. Porto Alegre, Rio de Janeiro: Editora Globo, 1992.
- [6] MARRA ENES GONÇALVES. **Gerador de indução associado a inversor PWM com frequência constante**. 1999. 50 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Sistemas e Controle de Energia, 1999.
- [7] MME. **Balanço Energético Nacional (BEN) – 2015**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)> Acesso em: 25 fev. 2016.
- [8] RECH CASSIANO, CAMARGO ROBINSON F., CAMPOS MAURÍCIO, SALVADORI FABIANO, LEANDRO GIDEON V., BOLACELL JULIO C. O. Impacto de métodos de sincronismo no desempenho de geradores de indução autoexcitados. **Revista Controle & Automação**, Rio Grande do Sul, p. 475-484, 2008.



[9] SIMÕES M. GODOY, CHAKRABORTY SUDIPTA AND WOOD ROBERT. Induction Generators for Small Wind Energy Systems. **IEEE Power Electronics Society Newsletter**, Colorado (USA), p. 19-22, 2006.

[10] T. TUDORACHE, L. MELCESCU AND V. PETRE. High Efficiency Squirrel Cage Induction Machines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPQ'09), 2009, Valencia. **Anais ... Valencia: EA4EPQ**, 2009. p. 239-244.