

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Departamento de Engenharia Elétrica

Guilherme Homrich

Regulação de tensão em Geradores de Indução

Porto Alegre

2013

Guilherme Homrich

Regulação de tensão em Geradores de Indução

Trabalho de Conclusão de Curso,
realizado com o objetivo de obtenção do
grau de Engenharia Elétrica, pela
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, Departamento de Engenharia
Elétrica.

Professor Orientador: Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2013

Guilherme Homrich

Regulação de tensão em Geradores de Indução

Trabalho de Conclusão de Curso, como
requisito parcial para obtenção do grau
de Engenharia Elétrica, pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul,
Departamento de Engenharia Elétrica.

Orientador: Ály Ferreira Flores Filho

Data da aprovação: ____/____/____

(Ály Ferreira Flores Filho, Doutor pela Cardiff School of Engineering, University of
Wales, Cardiff, País de Gales, Reino Unido)

Data da aprovação: ____/____/____

(Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, Doutor em Engenharia de minas, Materiais e
Metalúrgica pela UFRGS)

Data da aprovação: ____/____/____

(Carlos Sonier Cardoso do Nascimento, Mestre em Engenharia Elétrica pela UFRGS)

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus amados pais Paulo e Noeli, irmãos Milena e Augusto e minha adorável sobrinha Isadora, pessoas que estiveram sempre ao meu lado.

Agradecimentos

Agradeço a todos os professores, bolsistas e funcionários do LMEAE, em especial aos meus três grandes exemplos dentro do curso de Engenharia Elétrica, Professor Roberto Petry Homrich, Professor Tiarajú dos Reis Loureiro e meu orientador Ály Ferreira Flores Filho. Sem a contribuição de seus conhecimentos esse trabalho não seria realidade.

Agradeço também ao Professor Luís Fernando Alves Pereira, meu orientador de iniciação científica, que gerou a oportunidade para que eu adquirisse conhecimentos dentro do contexto de Smart Grids.

Ao Carlos Sornier Cardoso do Nascimento, por me ensinar os procedimentos experimentais necessários e ajudar na compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem nas máquinas elétricas.

A todos os meus colegas de engenharia, em especialmente Guilherme Zago, Jonatan Dalmonte, Henrique Giacomel e William Menezes Junqueira, por constantemente dividir ideias e opiniões.

À adorável amiga Livia Marchi Mello, companheira para todos os momentos.

À minha querida Gabriela, pela paciência e companhia.

E, finalmente, à minha amada família, Noeli, Paulo, Augusto, Milena, Marcio e Isadora, que são minha motivação para nunca parar de tentar.

O tabuleiro é o mundo, as peças são os fenômenos do universo, as regras do jogo são o que chamamos leis na natureza. O jogador do outro lado está escondido de nós. Sabemos que seu jogo é sempre honesto, justo e paciente. Mas também sabemos, por experiência própria, que ele nunca desculpa um erro e que não tem nenhuma complacência com a ignorância.

- Thomas Henry Huxley

Resumo

Esse trabalho apresentará um estudo da máquina de indução funcionando como gerador. Procura-se fazer uma revisão dos fundamentos de máquinas elétricas de indução e, através de uma análise do modelo do circuito equivalente, tenta-se prever o comportamento de um micro gerador ligado a rede. Verifica-se como dimensionar as capacitâncias necessárias e métodos para regulação de tensão em operação isolada. O controle será experimentalmente avaliado em um sistema de micro geração onde a máquina motriz será emulada por um motor de corrente contínua. Questões relacionadas à legislação brasileira envolvendo geração distribuída serão abordadas para esclarecer aspectos referentes à qualidade da energia gerada e proteção do micro sistema de geração.

Palavras-chave: Gerador de Indução, Auto-excitação de Geradores de Indução, Geração distribuída

Abstract

This paper will present a study of induction machines working as generator. Wanted to do a review of induction electric machines fundamentals and through an analysis of the equivalent circuit model, try to predict the behavior of a micro generator connected to the grid. It will check how to calculate the capacitances for the self-excited process and evaluate methods to control the generator voltage in stand-alone operation. The control will be experimentally evaluated in a micro-generation system where a DC motor will emulate the prime mover. Questions about Brazilian legislation regarding distributed generation will be addressed to access the implications and responsibilities of installing this kind of energy generation system.

Keywords: Induction Generator, Auto-excitation of Asynchronous Generators, Alternative Energy.

Sumário

1.	Introdução	10
2.	Geração distribuída	12
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL.....	14
2.2	LEGISLAÇÃO.....	15
2.2.1	PRODIST.....	15
2.2.2	CEEE.....	19
2.2.3	Cogeração Qualificada.....	24
3.	Aspetos Gerais Das Máquinas Assíncronas	27
3.1	MÁQUINA SÍNCRONA VERSUS MÁQUINA ASSÍNCRONA	27
3.1.1	Máquina Síncrona.....	27
3.1.2	Máquina de Indução.....	30
3.2	PARTES CONSTRUTIVAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO	31
3.3	DESENVOLVIMENTO DE CONJUGADO NA MÁQUINA DE INDUÇÃO	34
3.4	O CIRCUITO EQUIVALENTE	38
4.	Gerador de Indução	44
4.1	MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO GERADOR	45
4.1.1	O efeito da saturação	48
4.1.2	Levantamento teórico da curva de magnetização	50
4.2	OPERAÇÃO INTERLIGADA.....	51
4.2.1	Caracterização em regime permanente no modo motor	53
4.2.2	Caracterização em regime permanente no Modo gerador.....	56
4.2.3	Passos para conexão do gerador a rede.....	58
4.2.4	Compensação da demanda de potência reativa	59
4.3	OPERAÇÃO ISOLADA.....	60
4.3.1	O processo de autoexcitação	60
4.3.2	O problema da regulação de tensão e frequência no geradores de indução isolados..	62

4.3.3	Efeito da variação da velocidade da máquina motriz	65
4.3.4	Determinação da capacitância para excitação	68
4.3.5	Potência e rendimento	70
4.4	REGULAÇÃO DE TENSÃO NO GERADOR DE INDUÇÃO	71
4.4.1	Regulação por capacitor em série	72
4.4.2	Regulação por capacitores chaveados	73
4.4.3	Regulação por controle de fluxo de potência ativa.....	75
4.4.4	Regulação por controle de fluxo de potência reativa	76
4.4.5	Regulação por inversor de frequência	78
5.	Modelagem e Simulações	80
5.1	ENSAIO A VAZIO	82
5.2	ENSAIO A ROTOR BLOQUEADO	84
5.3	ENSAIO A VELOCIDADE SÍNCRONA E MEDIDA DE RESISTÊNCIA DO ESTATOR.....	85
5.4	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO	86
5.5	SIMULAÇÕES.....	89
6.	Resultados Experimentais	97
6.1	OPERAÇÃO INTERLIGADA	97
6.2	OPERAÇÃO ISOLADA.....	104
6.2.1	Variação de carga puramente resistiva	105
6.2.2	Variação de carga RL.....	112
7.	Conclusões e recomendações	116
	REFERÊNCIAS.....	118

1. Introdução

Motivado pelo constante aumento no consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo, esse trabalho tem como objetivo trazer uma revisão das formas de operação de uma alternativa no âmbito da micro e mini geração distribuída, o Gerador de Indução (GI). Muitos dos pequenos projetos de geração de energia, como pequenas centrais hidrelétricas, acabam optando por geradores síncronos por desconhecimento das técnicas necessárias para manter um gerador de indução em funcionamento adequado. Em algumas situações, tanto em sistemas interligados à rede de distribuição quanto isolados, o custo-benefício de implantação de um GI pode ser melhor que de um gerador síncrono. Segundo referência [1], para potências até 10 kVA o gerador de indução e o banco de capacitores para sua excitação custam a metade do preço de um gerador síncrono equivalente. Para potências até 25 kVA esta diferença se reduz para um terço. Outra vantagem que o gerador de indução possui e relação ao gerador síncrono é a sua robustez e ausência de escovas e anéis coletores. A ausência destes elementos reduz bastante a manutenção da máquina de indução, tornando-se praticamente nula se comparada à manutenção no gerador síncrono, sendo outro fator que torna esta alternativa bastante interessante.

A máquina de indução com rotor em gaiola pode ser utilizada de maneira eficiente e com melhor custo-benefício com gerador em pequenas centrais hidrelétricas e outros sistemas de cogeração para potências de até 30 kVA. No entanto, projetos de até 50 kVA para operação isolada e até 100 kVA para interligada, são viáveis tecnicamente [1].

Cada vez mais aplicações dentro do contexto de micro e minigeração de energia trazem geradores de indução, como por exemplo, novos modelos de geradores eólicos. Muitos geradores eólicos à venda no comércio são projetados para operar em paralelo com os grandes sistemas de potência, fornecendo uma fração das necessidades totais de potência dos consumidores. Nessa forma de operação, capacitores estáticos podem ser usados para corrigir o fator de potência [3].

No capítulo 2 se faz um apanhado das questões legais a respeito de pequenos empreendimentos na área de geração de energia, que são muito mais rigorosas para o caso interligado, tendo em vista não prejudicar o sistema interligado.

No capítulo 3, uma revisão dos fundamentos das máquinas de indução é apresentado, até a obtenção do modelo da máquina (circuito equivalente).

O capítulo 4 trata sobre Gerador de Indução. Além do estudo do fluxo de potência, caracteriza-se a máquina em regime permanente ligado a rede de distribuição. Para geração isolada, equações úteis para implementação de um sistema são apresentadas, como dimensionamento a capacitância do banco de capacitores necessário e relação entre frequência síncrona e variação de carga.

O capítulo 5 traz simulações realizadas em MATLAB para o modelo obtido através de ensaios para uma máquina de 2,2 kW e o capítulo 6 analisa os resultados experimentais de uma micro sistema de geração baseado na mesma máquina.

2. Geração distribuída

Ao tratar de sistemas de potência, tradicionalmente se pensa em três grandes blocos: Geração, Transmissão e Distribuição. A ideia ligada à Geração Distribuída (GD), ou Geração Descentralizada, é criar fontes de energia em pequena e média escala próximas aos consumidores, ou seja, conectada ao sistema de distribuição ou alimentando isoladamente uma determinada carga.

A geração descentralizada representa uma possibilidade concreta para colaborar com a redução de sobrecargas do sistema elétrico em horários de pico. Ela diminui a necessidade de investimentos na geração, transmissão e distribuição no sistema elétrico interligado nacional.

Existem algumas diferenças nas interpretações existentes sobre Geração Distribuída. O IEEE define geração distribuída como geração de energia elétrica com instalações suficientemente pequenas em relação às grandes centrais de geração, permitindo sua conexão próxima à rede elétrica, junto a centros de carga. O Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE entende essa geração como sendo produzida próximo ao local aonde a energia assim produzida é consumida, voltada para o autoconsumo industrial ou predial, ou para suprir necessidades locais de distribuição de energia, ou ainda, como reserva descentralizada para suprir demanda de ponta ou cobrir interrupções no fornecimento da rede [7]. Segundo o CIGRE, geração distribuída é a geração que não é planejada de modo centralizado, nem despachada de forma centralizada, não havendo, portanto, um órgão que comande as ações das unidades de geração descentralizada. Segundo Turkson & Wohlgemuth, 2001, geração distribuída é definida como o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e/ou consumidores específicos [9].

Diante dessa diversidade de conceitos, é necessário adotar uma definição que seja referência para as análises e considerações deste trabalho. Portanto, as referências serão as Resoluções Normativas N° 482 e N° 493, de 17 de abril de 2012 e de 5 de junho de 2012, respectivamente. Ambas as resoluções são ferramentas da Agência Nacional de Energia Elétrica para regulamentar a implantação de novos investimentos na área de GD. A

resolução 482 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e define:

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras [11];

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras [11];

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa [11].

A Resolução 493 estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI. Ela define geração isolada da seguinte forma:

VI - microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica – MIGDI: sistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica com potência instalada total de geração de até 100 kW [12];

XIII - sistema individual de geração de energia elétrica com fonte intermitente – SIGFI: sistema de geração de energia elétrica, utilizado para o atendimento de uma única unidade consumidora, cujo fornecimento se dê exclusivamente por meio de fonte de energia intermitente [12].

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Atualmente, o setor residencial já é responsável por aproximadamente 26% do consumo de eletricidade do país, e se somarmos o setor público e o comercial, existe um grande potencial para a pequena geração (< 1 MW). Áreas rurais, muitas vezes acabam optando por sistemas isolados, com pequenas centrais hidroelétricas, geradores a diesel, geradores eólicos, entre outros. Isso também demonstra a importância da participação da geração descentralizada para garantir o fornecimento de energia elétrica na maior parte do território nacional [8].

Desde o segundo semestre de 2010 com o lançamento de uma consulta pública, se discute uma regulamentação da geração distribuída utilizando fontes renováveis. Finalmente em 19 abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) editou a Resolução Normativa nº 482, como já comentado, regulando a conexão da microgeração (até 100 KW) e minigeração (de 100 KW a 1 MW) aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, que permitirá o consumidor-produtor instalar pequenos geradores, em sua unidade consumidora e injetar energia na rede de distribuição em troca de créditos [8].

A partir do início de 2013, estão sendo instalados medidores para controlar a quantidade de eletricidade consumida e injetada na rede do distribuidor, quando solicitado. Mesmo com um atraso de mais de 20 anos, em comparação a outros países que já incentivavam e promoviam o uso da geração fotovoltaica conectada na rede elétrica, sem dúvida esta medida adotada pela ANEEL pode ser considerada como um estímulo para o consumidor investir em novas tecnologias para produzir energia, e também um modelo bom para as empresas distribuidoras [8].

Todavia, mesmo sendo um bom começo, estas medidas são insuficientes para a adoção em larga escala pela população, devido ao custo do investimento inicial necessário (em torno de R\$ 10.000,00 para produzir em média 100 kWh/mês) [8].

A geração distribuída é alternativa importante no âmbito do modelo do setor elétrico, uma vez que proporciona condições reais de ganhos em eficiência econômica e de ampliação da competição, a exemplo de diversos países com mercado competitivo em que a Geração Distribuída ocupa espaço de destaque. No Brasil, apesar de barreiras de diferentes

naturezas, inclusive cultural, a atividade vem naturalmente ganhando o seu espaço político, regulatório e empresarial, ampliando efetivamente sua participação [9].

2.2 LEGISLAÇÃO

O conjunto de regulamentos envolvendo geração descentralizada trata basicamente das formas corretas de se acessar a rede de distribuição concessionária. A fim de obter referências normativas que orientem a instalação adequada de um gerador de indução, se avaliará um módulo dos Procedimentos de Distribuição da ANEEL, as regulamentações da Companhia Estadual de Energia Elétrica e as Resoluções Normativas da Agência Nacional de Energia Elétrica.

2.2.1 PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), criados pela ANEEL, são documentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O PRODIST contém nove módulos:

- Módulo 1 – Introdução
- Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
- Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição
- Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- Módulo 5 - Sistemas de Medição
- Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações
- Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição
- Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica
- Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos

O módulo de interesse para geração descentralizada é o terceiro, onde na seção 3.7, se trata do acesso da micro e minigeração distribuída através de nove itens:

- Objetivo
- Etapas para viabilização do acesso
- Critérios técnicos e operacionais
- Requisitos de projeto
- Implantação de novas conexões
- Requisitos para operação, manutenção e segurança da conexão.
- Sistema de medição
- Contratos
- Resumo das etapas de acesso

Para as etapas de viabilização de acesso, fez-se a tabela 1 que apresenta um resumo das etapas do processo de solicitação de acesso à rede de distribuição. Todo o procedimento envolve uma constante troca de documentação entre a concessionária e o acessante, sendo que a conexão só pode ser realizada quando todas as pendências de caráter técnico e burocrático forem atendidas.

Tabela 1 – Etapas do processo de solicitação de acesso [10].

Etapa	Ação	Responsável	Prazo
1. Solicitação de acesso	(a) Formalização da solicitação de acesso, com o encaminhamento de documentação, dados e informações pertinentes, bem como dos estudos realizados.	Acessante	–
	(b) Recebimento da solicitação de acesso	Distribuidora	–
	(c) Soluções de pendências relativas às informações solicitadas	Acessante	Até 60 dias após a 1(b)
2. Parecer de acesso	(a) Emissão de parecer com definição das condições de acesso	Distribuidora	<p>i. Se houver necessidade de execução de obras de reforço ou de ampliação no sistema de distribuição, até 30 dias após a ação 1(b) ou 1(c).</p> <p>ii. Para central geradora classificada como minigeração distribuída e houver necessidade de execução de obras de reforço ou de ampliação no sistema de distribuição, até 60 dias após a ação 1(b) ou 1(c).</p>
3. Contratos	(a) Assinatura de contratos quando couber.	Acessante e Distribuidora	Até 90 dias após a ação 2ª.
4. Implantação da conexão	(a) Solicitação de vistoria	Acessante	Definido pelo acessante
	(b) Realização da vistoria	Distribuidora	Até 30 dias após a ação 4(a)
	(c) Entrega para acessante do relatório de vistoria	Distribuidora	Até 15 dias após a ação 4(b)
5. Aprovação do ponto de conexão	(a) Adequação das condicionantes do Relatório de Vistoria	Acessante	Definido pelo acessante
	(b) Aprovação do ponto de conexão, liberando-o para sua efetiva conexão.	Distribuidora	Até 7 dias após a ação 5(a)

Dentro dos Requisitos de Projeto, é importante destacar a discriminação dos níveis de tensão adequados para a faixa de potência de GD. A tabela 2 contém esses dados.

Tabela 2 – Níveis de tensão considerados para conexão de micro e minicentrals geradoras [10].

Potência instalada	Níveis de tensão da conexão
< 10 kW	Baixa Tensão (monofásico)
10 a 100 kW	Baixa Tensão (trifásico)
101 a 500 kW	Baixa Tensão (trifásico) /
501 kW a 1 MW	Média Tensão

No entanto, o nível de tensão de conexão da central geradora será definido pela distribuidora em função das limitações técnicas da rede.

Outros requisitos de projeto estão na tabela 3. Ela descreve os equipamentos necessários para diferente faixa de potência instalada.

Tabela 3 – Requisitos mínimos em função da potência instalada [10].

Equipamento	Potência Instalada		
	ATÉ 100 kW	DE 101 A 500 KW	DE 501 A 1 MW
ELEMENTO DE DESCONEXÃO	Sim	Sim	Sim
ELEMENTO DE INTERRUPTÃO	Sim	Sim	Sim
TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO	Não	Sim	Sim
PROTEÇÃO DE SUB E SOBRE TENSÃO	Sim	Sim	Sim
PROTEÇÃO DE SUB E SOBRE FREQUÊNCIA	Sim	Sim	Sim
PROTEÇÃO CONTRA DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE	Não	Não	Sim
PROTEÇÃO CONTRA DESBALANÇO DE TENSÃO	Não	Não	Sim
SOBRECORRENTE DIRECIONAL	Não	Não	Sim
SOBRECORRENTE COM RESTRIÇÃO DE TENSÃO	Não	Não	Sim
RELÉ DE SINCRONISMO	Sim	Sim	Sim
ANTI-ILHAMENTO	Sim	Sim	Sim
ESTUDO DE CURTO CIRCUITO	Não	Sim	Sim
MEDIÇÃO	Medidor	Medidor 4	Medidor 4
ENSAIOS	Sim	Sim	Sim

Dentro de todos os itens que compõem o tanto PRODIST, quanto os outros documentos analisados nesse trabalho, tentou-se trazer um resumo do que seria mais relevante ao instalar um Gerador de Indução. Primeiramente, é necessário saber que, se tratando de GD, todas as fontes de energia que não sejam eólica, solar, hidráulica e

biomassa são consideradas Cogeração Qualificada. Isso significa que, se a máquina primária de um Gerador de Indução não for uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) o responsável pela implantação requer documentação comprobatória adicional para a comprovação de classificação, conforme Resolução ANEEL 235/2006. Segundo essa resolução, Cogeração Qualificada é um atributo concedido a cogeneradores que atendem determinados requisitos, segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração. Esses requisitos serão avaliados no item 2.2.3 desse trabalho.

Caso os geradores não se enquadrem na Resolução ANEEL 482/2012, podem ser conectados somente em circuitos isolados na unidade consumidora, sem possibilidade de conexão com rede da distribuidora. Caso a unidade consumidora possua módulo de transferência ou chave reversora, a carga poderá ser transferida em rampa e a unidade consumidora deve permanecer desconectada da rede de distribuição da acessada. Neste caso, a distribuidora não tem qualquer responsabilidade sobre a qualidade de energia e possíveis danos às instalações internas [10].

2.2.2 CEEE

Conforme página 77 do terceiro módulo do PRODIST, o item 2.4.6 afirma: “A distribuidora deve disponibilizar em sua página na internet a relação das informações que o acessante deve apresentar na solicitação de acesso, incluindo os dados requeridos pela ANEEL para o registro das centrais geradoras e aqueles de que trata o item 2.5.2.”.

Seguindo esse regulamento, a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), disponibilizou em sua página na internet, a partir do dia 17 de dezembro de 2012, um documento titulado *Acesso de micro e minigeração com fontes renováveis e cogeração qualificada ao sistema de distribuição*. O objetivo desse documento é apresentar as normas que estabelecem as diretrizes básicas para conexão e acesso de GD's, que operem com paralelismo permanente de geradores do consumidor, com energias renováveis ou cogeração qualificada, conectados ao sistema de distribuição da CEEE, com sistema de compensação de energia elétrica, visando aspectos de proteção, operação e segurança. Além disso, ele cita uma série de normas complementares, tanto da ANEEL quanto da CEEE que são referências ao se fazer um investimento em GD.

Os anexos incluídos existem para especificar a documentação necessária, que pode variar com o nível de tensão que está sendo acessado, e diagramas unifilares demonstrando como seria o acesso em baixa e em média tensão. No caso do anexo 10 desse documento, resumem-se os itens necessários para a proteção do micro sistema de geração em média tensão de acordo com as funções ANSI dos reles que devem estar instalados. A tabela 4 resume esse anexo no caso de média tensão.

Tabela 4 – Requisitos de proteção para geradores em média tensão [14].

**ANEXO 10
REQUISITOS DE PROTEÇÃO PARA GERADORES EM MÉDIA TENSÃO**

Função ANSI	Partida	Tempo de operação	Polarização ou restrição	Observações
51	Corrente 120% maior que a carga nominal do consumidor.	No mínimo 0,4 segundos menor que as curvas de fase à montante.	Inexistente.	
50	Corrente inferior ao ponto ANSI e superior a curva de INRUSH, do Transformador de força.	No mínimo 0,1 segundos maior que a curva de INRUSH do transformador de força.	Inexistente.	
51N	Corrente 10% da nominal de fase limitado ao mínimo de 0,5 Ampères.	No mínimo 0,4 segundos menor que as curvas de fase à montante.	Inexistente.	
67	Corrente máxima de 15% da contribuição de fase da corrente nominal da subestação geradora na MT limitado a um mínimo de 0,5 Ampères.	No máximo 0,5 segundos para curtos-circuitos no ponto de entrega.	Opera para curtos na rede de MT da CEEE-D ajuste de 45° em relação ao plano de polarização.	
51V	Corrente máxima de 120% da contribuição de fase da corrente nominal da subestação geradora na MT limitado a um mínimo de 0,5 Ampères.	No mínimo 0,4 segundos menor que as curvas de fase à montante, limitado a 1,0 segundo.	Tensão de fase em, no máximo, 80% da nominal.	Opcional quando for possível utilizar 67.
25S	$\Delta\Phi = 10^\circ$; $\Delta V = 5\%$ pu fase-fase; $\Delta f = 0,1$ Hz;	No máximo 0,2 segundos.	Inexistente.	
27	Tensão de fase em, no máximo, 10% da nominal.	No máximo 3,0 segundos.	Inexistente.	
47	Inversão de sequência de fases.	No máximo 2,0 segundos.	Tensão de fase em, no mínimo, 85% da nominal.	Opcional quando for possível utilizar 25S.
59	Tensão de fase, no máximo, 110% maior que a nominal.	No máximo 1,0 segundo.	Inexistente.	
59N	Tensão de neutro/residual em, no máximo, 40% da nominal.	No máximo 1,0 segundo.	Inexistente.	
81O	Frequência acima de 60,5 Hz no máximo.	No máximo 5,0 segundos.	Tensão de fase em, no mínimo, 85% da nominal.	
81U	Frequência abaixo de 59,5 Hz no máximo.	No máximo 5,0 segundos.	Tensão de fase em, no mínimo, 85% da nominal.	

O mesmo é feito para sistemas instalados em baixa tensão, que está na tabela 5.

Tabela 5 – Requisitos de proteção para geradores em baixa tensão [14].

ANEXO 10
REQUISITOS DE PROTEÇÃO PARA GERADORES EM BAIXA TENSÃO

Função ANSI	Partida	Tempo de operação	Polarização ou restrição	Observações
51V	Corrente máxima de 120% da contribuição de fase da corrente nominal limitada a um mínimo de 0,5 Ampères.	No mínimo 0,4 segundos menor que as curvas de fase à montante, limitado a 1,0 segundo.	Tensão de fase em, no máximo, 80% da nominal.	
67	Corrente máxima de 15% da contribuição de fase da corrente nominal da subestação geradora limitado a um mínimo de 0,5 Ampères.	No máximo 0,5 segundos para curtos-circuitos no ponto de entrega.	Opera para curtos na rede de BT do consumidor ajuste de 45° em relação ao plano de polarização.	Pode vir em substituição do 51V
25S	$\Delta\Phi \leq 10^\circ$; $\Delta V \leq 5\%$ pu fase-fase; $\Delta f \leq 0,12$ Hz;	No mínimo 0,2 segundos.	Inexistente.	
27	Tensão de fase em, no máximo, 10% da nominal.	No máximo 3,0 segundos.	Inexistente.	
59	Tensão de fase, no máximo, 110% maior que a nominal.	No máximo 1,0 segundo.	Inexistente.	
78V	$\Delta\Phi \leq 10^\circ$;	Critério do técnico responsável com ART	Critério do técnico responsável com ART	
81O	Frequência acima de 60,5 Hz no máximo.	No máximo 5,0 segundos.	Tensão de fase em, no mínimo, 85% da nominal.	
81U	Frequência abaixo de 59,5 Hz no máximo.	No máximo 5,0 segundos.	Tensão de fase em, no mínimo, 85% da nominal.	

Em relação à qualidade de energia, a CEEE-D estabelece:

- A conexão de módulos de geração deve observar ao disposto no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição - Qualidade da Energia Elétrica, não acarretando em perturbações para a rede da CEEE-D.
- Os parâmetros de qualidade de energia devem ser medidos no ponto de entrega, exceto quando houver indicação de outro ponto, quando aplicável.
- O módulo de geração deve perceber condições anormais de tensão e interromper o fornecimento de energia à rede.
- O tempo máximo de desligamento refere-se ao intervalo de tempo entre o instante em que foi verificada a anormalidade de tensão e a interrupção no fornecimento de energia para a rede. A reconexão deve acontecer somente quando as condições normais de tensão da rede forem restabelecidas.
- A Tabela 6 apresenta os valores de tempo máximo de desligamento que devem ser observados para sistemas de geração que utilizam inversores.

Tabela 6- Tempo máximo de desligamento [14].

Tensão no ponto de conexão	Tempo máximo de desligamento
$V < 0,8 \text{ pu}$	0,4 s
$0,8 \text{ pu} \leq V \leq 1,1 \text{ pu}$	Regime normal de operação
$V > 1,1 \text{ pu}$	0,2 s

- O módulo de geração deve operar em sincronismo com a rede elétrica e dentro dos limites de variação de frequência estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST.
- No caso de geradores conectados à rede através de inversores, quando a frequência da rede assumir valores inferiores a 57,5 Hz, o módulo de geração deve interromper o fornecimento de energia para a rede em até 0,2 s. É permitida a reconexão do módulo de geração somente quando a frequência retornar para 59,9 Hz, respeitando o período mínimo de 180 s após a retomada das condições normais de tensão e frequência da rede da CEEE-D.
- No caso de geradores conectados à rede através de inversores, quando a frequência da rede ultrapassar 60,5 Hz e permanecer abaixo de 62 Hz, o módulo de geração deve reduzir a potência ativa injetada na rede segundo a equação:

$$\Delta P = [f_R - (f_{nom} + 0,5)]R \quad (1)$$

Onde: ΔP = é a variação de potência ativa injetada (em %) em relação à potência ativa injetada no momento em que a frequência excede 60,5 Hz;

f_R = é a frequência medida da rede;

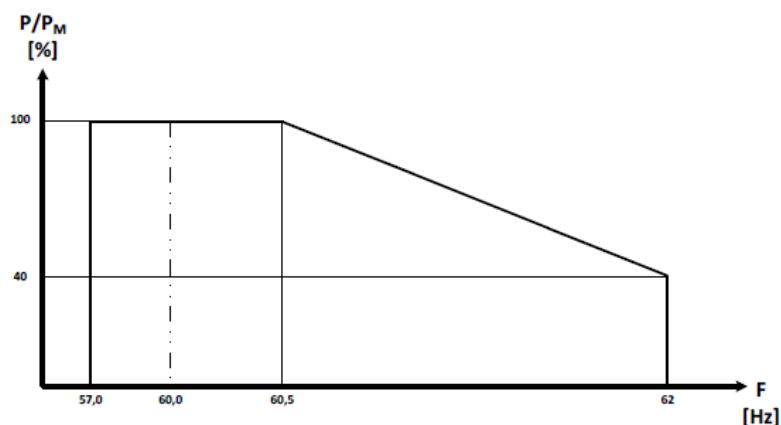
f_{nom} = é a frequência nominal da rede;

R = é a taxa de redução da potência ativa injetada, ajustada em -40%/Hz. A resolução da medição de frequência deve ser $\leq 0,01$ Hz.

- Após iniciado o processo de redução da potência ativa, se a frequência da rede reduzir, o módulo de geração deve manter o menor valor de potência ativa atingida ($PM - \Delta P_{m\acute{a}x}$), sendo PM a potência ativa injetada no momento em que a frequência excede 60,5 Hz. O módulo de geração só deve aumentar a potência ativa injetada quando a frequência da rede retornar para a faixa de 60 Hz $\pm 0,05$ Hz, por no mínimo 300 segundos. O gradiente de elevação da potência ativa injetada na rede deve ser

de até 20% de PM por minuto. A Figura 1 ilustra a curva de operação de um sistema fotovoltaico em função da frequência da rede para a desconexão por sub/sobre frequência.

Figura 1 - Curva de operação do módulo de geração em função da frequência da rede, para desconexão por sub/sobre frequência [14].



- Para os sistemas de geração que se conectem à rede sem a utilização de inversores, a faixa operacional de frequência está descrita no Módulo 8 do PRODIST.
- O módulo de geração deve interromper a injeção de potência na rede em 1 s se a injeção de componente cc na rede elétrica for superior a 0,5% da corrente nominal do módulo de geração. O módulo de geração com transformador com isolamento galvânica em 60 Hz não precisa ter proteções adicionais para atender a este requisito.
- A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5%, na potência nominal do módulo de geração. Cada harmônica individual deve estar limitada conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Limite de distorção harmônica de corrente

Harmônicas	Limite de distorção
Ímpares, da 3 ^a a 9 ^a	< 4,0 %
Ímpares, da 11 ^a a 15 ^a	< 2,0 %
Ímpares, da 17 ^a a 21 ^a	< 1,5 %
Ímpares, da 23 ^a a 33 ^a	< 0,6 %
Pares, da 2 ^a a 8 ^a	< 1,0 %
Pares, da 10 ^a a 32 ^a	< 0,5 %

- O módulo de geração deve operar preferencialmente com fator de potência (FP) unitário. As faixas permitidas de fator de potência, quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do gerador, são apresentadas na Tabela 8. Após uma mudança na potência ativa, o módulo de geração deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente para corresponder ao FP predefinido. Qualquer ponto operacional resultante de tais definições deve ser atingido em no máximo 10s.

Tabela 8 – Faixas permitidas de fator de potência

Potência nominal de geração	Faixa de fator de potência
$P_{nom} \leq 3 \text{ kW}$	0,98 indutivo até 0,98 capacitivo
$3 \text{ kW} < P_{nom} \leq 6 \text{ kW}$	0,95 indutivo até 0,95 capacitivo
$P_{nom} > 6 \text{ kW}$	0,92 indutivo até 0,92 capacitivo

2.2.3 Cogeração Qualificada

Segundo Resolução Normativa 235, de 14 de novembro de 2006, se define:

- Cogeração: processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária, observando que:

a) a instalação específica denomina-se central termelétrica cogeneradora, cujo ambiente não se confunde com o processo ao qual está conectada, sendo que, excepcionalmente e a pedido do interessado, a cogeração poderá alcançar a fonte e as utilidades no processo, além das utilidades produzidas pela central termelétrica cogeneradora a que está conectado, condicionando aquelas à exequibilidade de sua completa identificação, medição e fiscalização, a critério exclusivo da ANEEL; e

b) a obtenção da utilidade eletromecânica ocorre entre a fonte e a transformação para obtenção da utilidade calor [13];

- Cogeração qualificada: atributo concedido a cogeneradores que atendem os requisitos definidos nesta Resolução, segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração;

A mesma resolução afirma que a central termelétrica cogeneradora, para fins de enquadramento na modalidade de “cogeração qualificada”, deverá atender os seguintes requisitos:

I - estar regularizada perante ANEEL, conforme o disposto na legislação específica e na Resolução nº 112, de 18 de maio de 1999; e

II – preencher os requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento das inequações a seguir:

$$\frac{Et}{Ef} \geq 15\%$$

$$\frac{Et}{Ef} \div X + \frac{Ee}{Ef} \geq Fc\%$$

§ 1º Os valores de “X” e “Fc” das fórmulas de que trata o inciso II deverão ser aplicados em função da potência elétrica instalada na central de cogeração e da respectiva fonte, obedecida a seguinte tabela:

Tabela 9 – Parâmetros para o cálculo de racionalidade energética

Fonte/potência elétrica instalada	X	Fc%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

§ 2º No caso de queima alternada ou mesclada de diferentes fontes, os valores de “ X ” e “ F_c ”, representativos dessa situação, serão obtidos por ponderação dos valores contidos na tabela de que trata o parágrafo anterior, segundo a participação energética de cada fonte.

§ 3º Poderão candidatar-se à qualificação os blocos de cogeração pertencentes a uma central termelétrica contendo blocos de geração pura, desde que se distingam os primeiros dos segundos, e os blocos de cogeração apresentem medições perfeitamente individualizadas que permitam o cômputo das suas energias E_f , E_e e E_t e a sua fiscalização.

3. Aspectos Gerais Das Máquinas Assíncronas

Uma máquina elétrica rotativa pode ser um motor ou um gerador. Se a máquina opera como motor, ela converte energia elétrica em energia mecânica e, ao trabalhar como gerador converte energia mecânica em energia elétrica. Na prática, qualquer máquina síncrona ou assíncrona pode operar de ambas as formas, porém as máquinas elétricas geralmente são concebidas para trabalhar como motor ou como gerador. A conversão de energia mecânica em elétrica é explicada pelo princípio da conservação da energia aplicado ao funcionamento de um gerador, onde frequência elétrica é dependente da velocidade da máquina motriz (máquina primária, que é a fonte de energia mecânica).

3.1 MÁQUINA SÍNCRONA VERSUS MÁQUINA ASSÍNCRONA

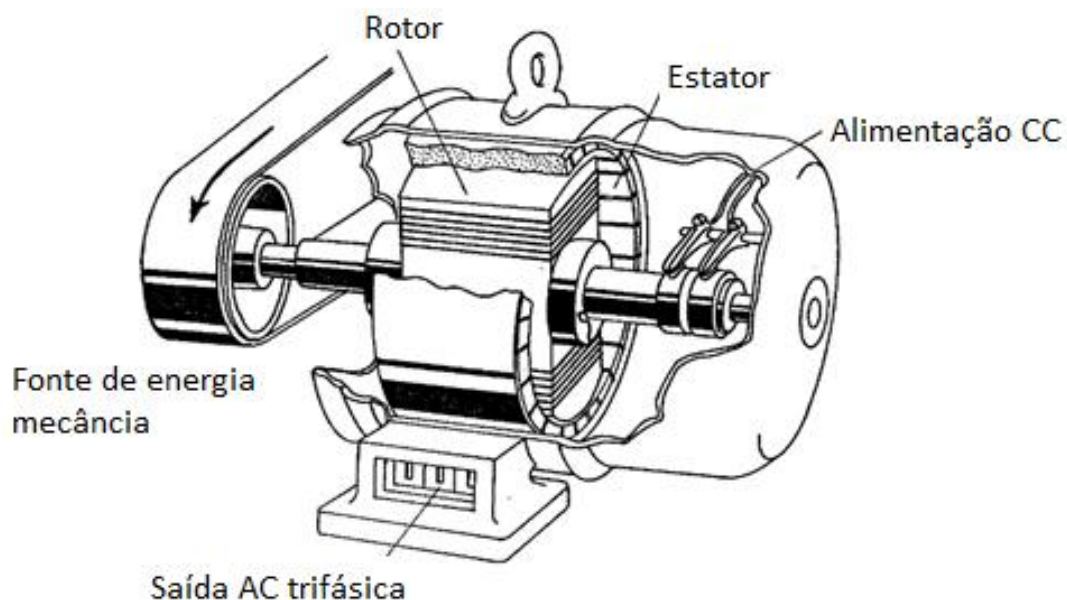
Para compreender o princípio de funcionamento das máquinas assíncronas (geralmente motores), faz-se necessário estudar primeiramente a máquina síncrona (majoritariamente geradores). Inicia-se esta etapa do trabalho realizando uma comparação entre esses dois tipos de máquina, observando a síncrona como gerador e a assíncrona como motor.

3.1.1 Máquina Síncrona

Um gerador síncrono é uma máquina rotativa que gera tensão alternada geralmente em uma ou três fases. Ele é construído com uma parte estacionária, chamada *estator*, e uma parte móvel, chamada *rotor*. A função do rotor é rotacionar um campo magnético gerado em um enrolamento em seu eixo, a fim de induzir tensões (pela lei de Faraday) nos enrolamentos da parte estática da máquina. Esse enrolamento do rotor é chamado *enrolamento de campo* e geralmente é alimentado por uma fonte de corrente contínua externa que pode fornecer tensão a partir da retificação da saída do próprio gerador. Em outras palavras, transforma-se o rotor em um eletroímã usando uma bobina responsável pela polarização de um núcleo feito de material ferromagnético que gira para induzir

tensões nos enrolamentos do estator. A *figura 2* é uma representação esquemática de um gerador síncrono.

Figura 2 – Representação esquemática de um gerador síncrono [1].



Para que a frequência das tensões e, conseqüentemente, das correntes induzidas pelo campo magnético girante sejam constantes em uma frequência, a velocidade do rotor deve ser mantida na velocidade síncrona. Isso significa que a frequência elétrica está em sincronismo e é proporcional à velocidade angular do rotor, fato que deu nome a máquina. A equação 2 expressa essa relação.

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2)$$

Onde: f_e = frequência elétrica, em Hz

n_m = velocidade mecânica do campo magnético em r/min

P = número de polos da máquina

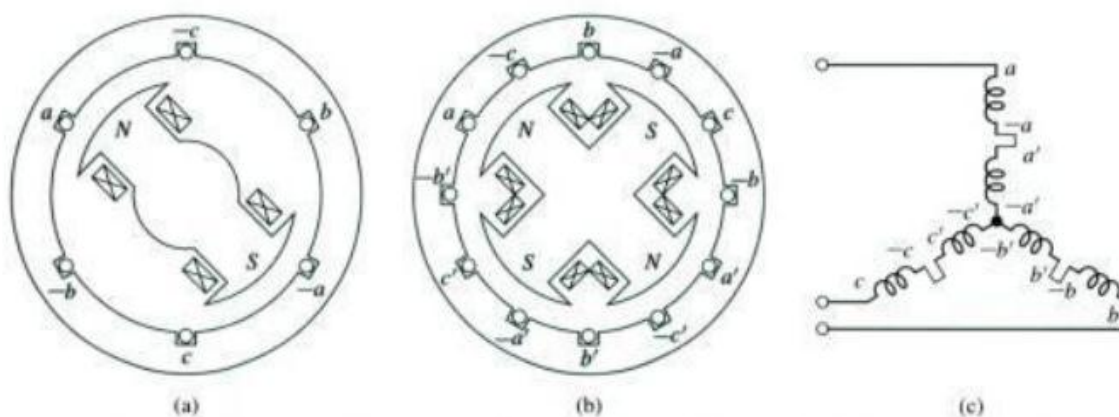
Sabendo que para o gerador síncrono o rotor gira na mesma velocidade do campo magnético, essa equação relaciona a velocidade angular do rotor com a frequência elétrica. Gera-se energia elétrica tradicionalmente a 60 ou 50 Hz, então o gerador deve operar em uma velocidade fixa vinculada ao número de polos da máquina. Por isso, sabe-se que

quanto maior o número de polos do gerador menor deve ser a velocidade da máquina primária em regime permanente de forma a manter a frequência elétrica em 60 ou 50 Hz. Por exemplo, para gerar energia a 60 Hz em uma máquina de 2 polos, o rotor deve estar a 3600 rpm.

A maioria dos sistemas de potência opera com três fases, conseqüentemente a maioria dos geradores síncronos são máquinas trifásicas. Para produzir um conjunto de três tensões defasadas de 120 graus no tempo devem ser usadas pelo menos três bobinas defasadas de 120 graus no espaço. Um esquema simplificado de uma máquina trifásica de dois polos, com uma bobina por fase, está na figura 3(a). As três fases são indicadas pelas letras *a*, *b* e *c*. Em uma máquina elementar de 4 polos, um mínimo de dois conjuntos de bobinas como este deve ser usado, como se ilustra na figura 3(b). Em uma máquina elementar com múltiplos polos, o número mínimo de conjuntos de bobinas é dado pela metade do número de polos [6].

Conectam-se as duas bobinas de cada fase da figura 3(b) em série de modo que suas tensões são somadas, e as três fases podem então ser ligadas em Y ou em Δ . A figura 3(c) mostra como as bobinas podem ser interligadas para formar uma ligação Y. No entanto, como as tensões de cada fase são iguais, uma conexão em paralelo também é possível, por exemplo, a bobina (*a*, - *a*) em paralelo com a bobina (*a'*, - *a'*), e assim por diante [6].

Figura 3 – Esquemático de geradores de indução trifásicos; (a) dois polos; (b) quatro polos; (c) conexão em Y dos enrolamentos [6].



Quando um gerador síncrono fornece potência elétrica a uma carga, a corrente de armadura (no estator) cria no entreferro uma onda de fluxo magnético que gira na velocidade síncrona. Esse fluxo reage ao fluxo criado pela corrente de campo, resultando um conjugado eletromecânico a partir da tendência desses dois campos magnéticos se alinharem entre si. Em um gerador, esse conjugado se opõe à rotação, e então um conjugado mecânico deve ser aplicado a partir da máquina motriz para que a rotação seja mantida. Esse conjugado eletromecânico é o mecanismo através do qual o gerador síncrono converte a energia mecânica em energia elétrica [6].

3.1.2 Máquina de Indução

Diferentemente da máquina síncrona, na máquina assíncrona de indução os enrolamentos de campo do rotor não são excitados com corrente contínua. Correntes alternadas fluem nos enrolamentos do rotor por indução eletromagnética do campo girante do estator quando a máquina é alimentada por correntes alternadas. Nesse caso, pensa-se na máquina como um motor, tendo em vista que a energia elétrica é transferida através do entreferro da máquina pelo campo magnético para o rotor que passa a se movimentar. Desse modo, a máquina de indução pode ser vista como um transformador generalizado em que a potência elétrica é transformada entre o rotor e o estator com uma alteração de frequência do primário para o secundário.

Os enrolamentos do estator de um motor de indução são basicamente os mesmos do motor síncrono. Entretanto, os enrolamentos do rotor em gaiola são eletricamente curto-circuitados e frequentemente não possuem conexões externas, já que as correntes são induzidas por ação de transformador. O fluxo de armadura do motor de indução é adiantado em relação ao do rotor e produz um conjugado eletromecânico. Assim como na máquina síncrona, sabe-se que há um sincronismo entre os fluxos do rotor e do estator e que o conjugado está relacionado com o deslocamento angular relativo entre eles. Contudo, o rotor em si de uma máquina de indução não gira em sincronismo, pois existe um escorregamento do rotor em relação ao fluxo síncrono da armadura, dando origem às correntes induzidas no rotor e, conseqüentemente, ao conjugado. É importante lembrar que a corrente alternada que surge nas barras faz surgir um campo que gira em uma velocidade

igual a diferença de rotação entre o rotor e o campo estático. A velocidade do rotor somada à velocidade de seu campo resulta na velocidade síncrona.

3.2 PARTES CONSTRUTIVAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

O motor de indução é a máquina de corrente alternada mais comumente usada quando se necessita de acionamento mecânico. Isso se deve ao fato de ser uma máquina robusta e, por ser produzida em larga escala, de custo relativamente baixo. Tanto o estator quanto o rotor são compostos pela união de lâminas de aço de alguns décimos de milímetro, formando um núcleo de chapas magnéticas. Essa composição de finas lâminas sobrepostas existe para reduzir as perdas no ferro devido às correntes de Foucault, o que busca aumentar o rendimento da máquina.

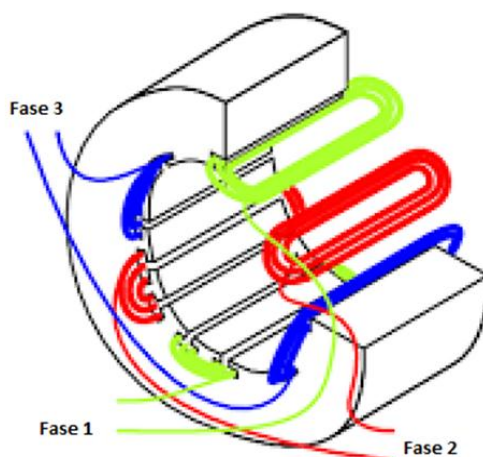
Existem ranhuras paralelas ao eixo da máquina na superfície interna do estator que acomodam as bobinas dos enrolamentos. Além de diminuir o entreferro efetivo e a corrente de magnetização, essas ranhuras são um meio eficiente de transmissão do calor para o exterior. Entre as chapas e as bobinas do enrolamento existem elementos de isolamento, cuja função é evitar que a carcaça e o pacote de chapas fique sob tensão elétrica [7]. Os enrolamentos dispostos nessas ranhuras acomodam bobinas de muitas voltas distribuídas pela superfície interna do estator. As bobinas de cada fase são conectadas em série ou paralelo, assim como na máquina síncrona. O número desejado de polos e a consequente relação velocidade/frequência se obtêm a partir da disposição dessas bobinas nas ranhuras do núcleo.

O rotor também é dotado de ranhuras axiais onde os enrolamentos ou barras rotóricas são alojados. Existem dois tipos de rotor que podem ser usados na construção de uma máquina de indução [7]. O mais comum é o de enrolamento em curto-circuito (rotor em gaiola de esquilo, rotor em curto-circuito), formado por barras de alumínio conectadas por anel em ambas as extremidades do pacote de chapas. Essas barras não podem ser acessadas por um circuito externo, pois nesse tipo de máquina não existe nenhum terminal que permita conexão ao rotor. A gaiola é injetada sob alta pressão e temperatura, não havendo isolamento entre as barras e o pacote de chapas [7]. Algumas máquinas de pequeno porte possuem rotores que funcionam com base em correntes de Foucault, tem seu rotor de

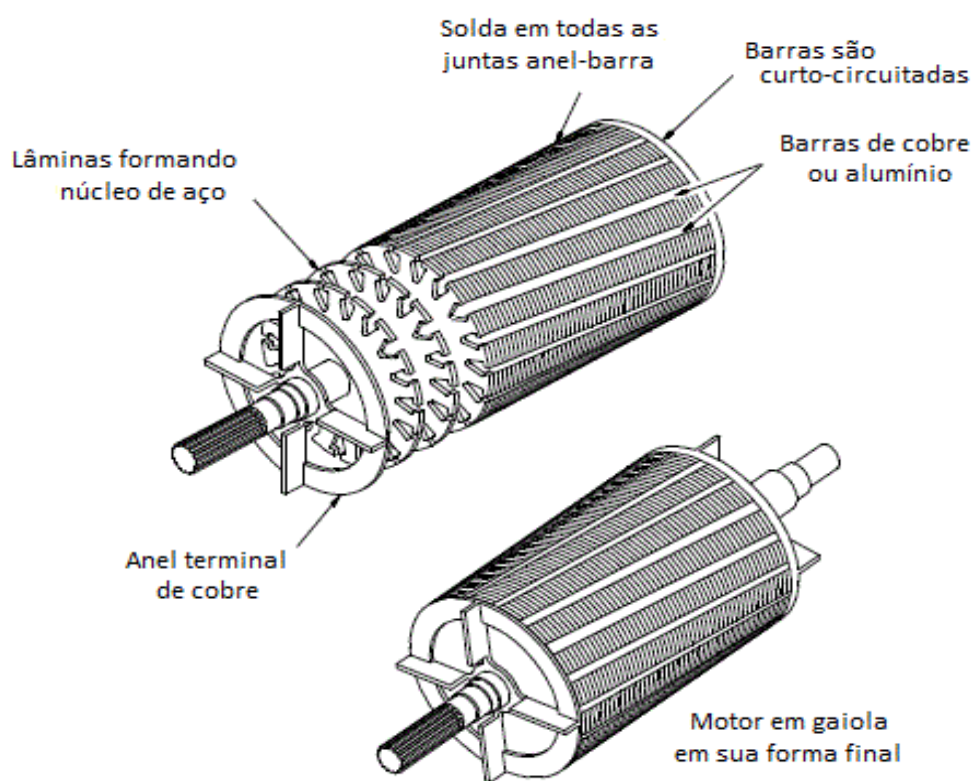
aço sólido, sem condutores. Os anéis nas extremidades axiais têm também a função de garantir uma rigidez mecânica ao pacote de chapas. A forma das ranhuras do rotor influencia o desempenho do motor, especialmente a curva de conjugado. As barras condutoras do rotor geralmente não são paralelas ao eixo, mas sim propositadamente inclinadas. A razão principal dessa inclinação é provocar uma transição suave entre os dentes do estator e do rotor, que é mais difícil de acontecer se o fluxo de entreferro é radialmente disposto ao longo de todo o comprimento do dente oposto. A inclinação introduz uma componente tangencial na atração entre os dentes opostos, e por isso tende a minimizar a ação de bloqueio. Além disso, barras inclinadas reduzem a tendência de vibração dos dentes, que pode causar ruído audível [15].

O segundo tipo de rotor é o de enrolamento de bobinas (rotor bobinado) feitas geralmente de cobre. Trata-se de um enrolamento semelhante ao enrolamento do estator. Os terminais são conectados a anéis coletores e escovas, os quais podem ser acessados externamente. Este tipo de enrolamento é usado quando se deseja um controle das características de torque e velocidade da máquina. É menos frequente que o enrolamento em gaiola, pois é mais caro e menos robusto. A escolha por um motor com rotor bobinado pode ser requerida devido ao processo de partida do motor, uma vez que este tipo de motor pode fornecer um conjugado mais elevado na partida [7]. A figura 4(a) mostra um rotor de barras e a figura 4(b) as partes do motor de indução com rotor em gaiola.

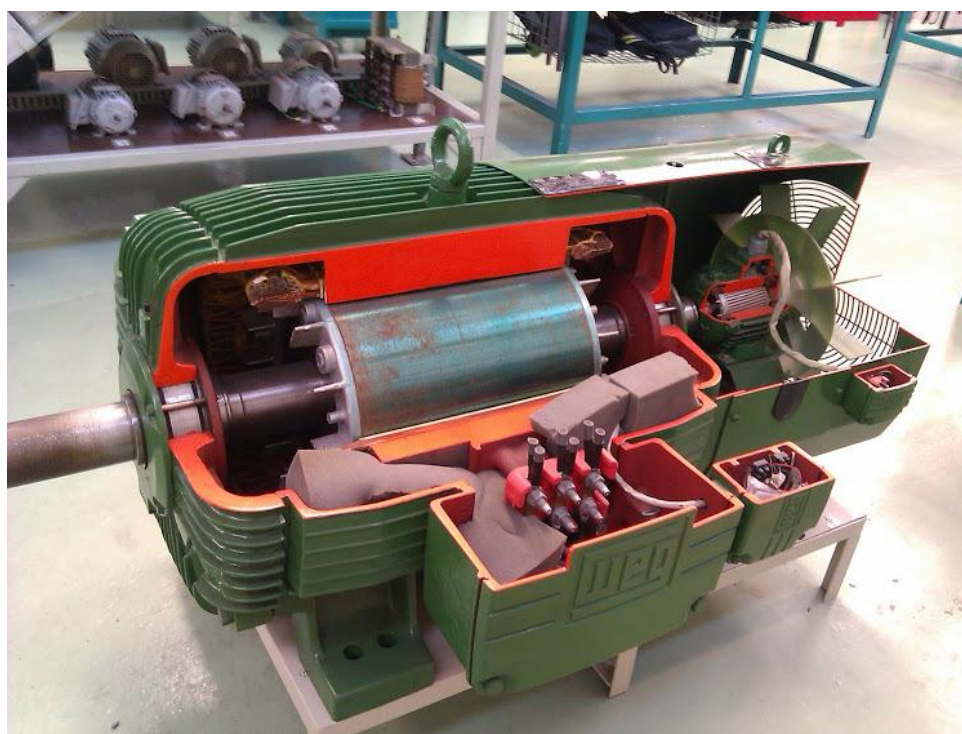
Figura 4 – Partes construtivas da máquina de indução; (a) esquemático da distribuição das fases no estator; (b) partes do rotor em gaiola; (c) Imagem real de um motor WEG em corte longitudinal.



(a)



(b)

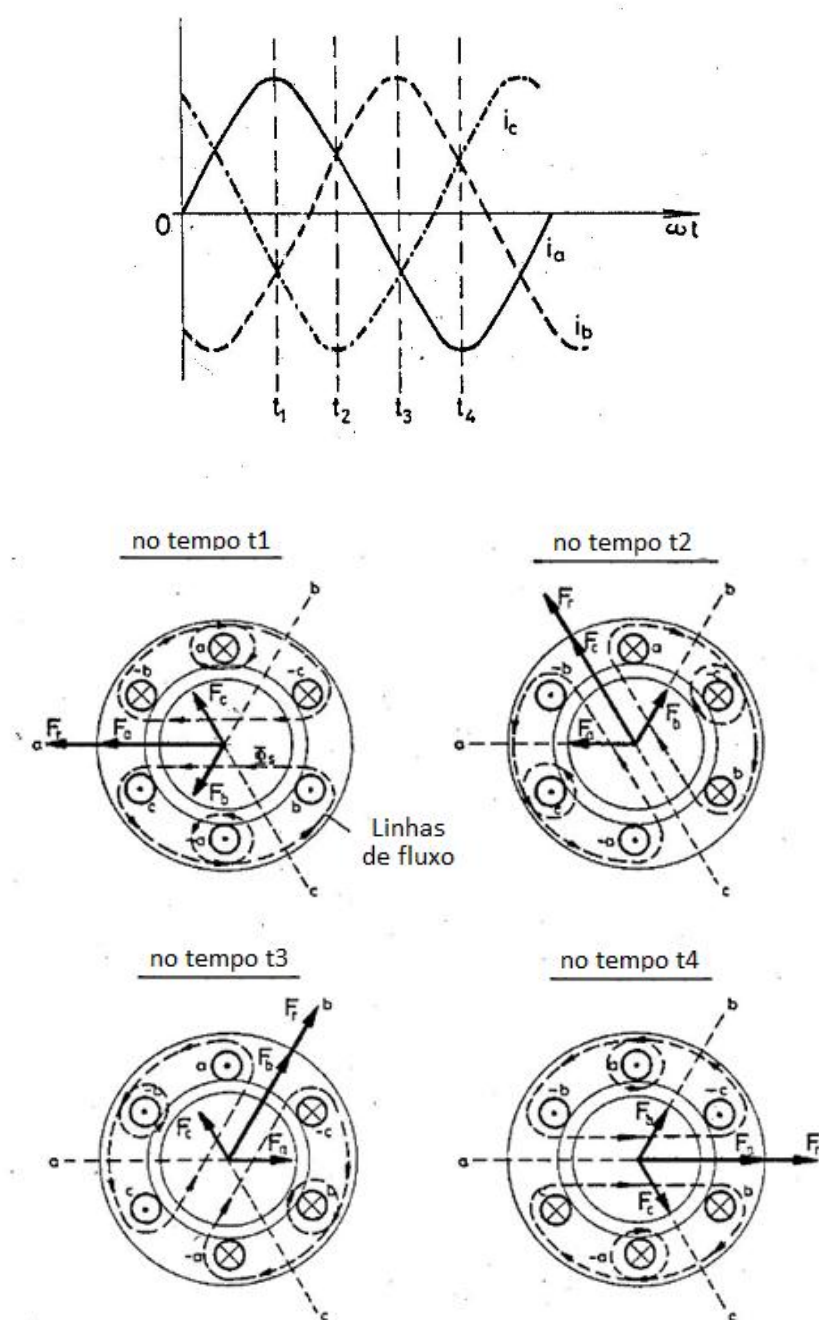


(c)

3.3 DESENVOLVIMENTO DE CONJUGADO NA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Operando como motor, os enrolamentos do estator são supridos por tensões trifásicas e correntes circulam nos enrolamentos de cada fase. Essas correntes são fasores deslocados um em relação ao outro em 120° . Considerando um estator de dois polos com uma bobina por fase como na figura 5, a corrente que circula através de cada fase gera um campo magnético com uma polaridade na direção de seu eixo magnético (segundo regra da mão direita, 90° deslocado em relação à bobina). Devido à natureza alternada da corrente aplicada, a força magnetomotriz de cada fase permanece oscilando entre um valor máximo positivo e um valor máximo negativo, formando uma onda estacionária. Embora cada uma das fases gere ondas de força magnetomotriz estacionárias, o campo magnético resultante B_s da superposição dessas ondas é rotativo. Os instantes do gráfico da *figura 5* estão esquematizados abaixo para facilitar a visualização da resultante das três ondas estacionárias.

Figura 5 – Ilustração do campo magnético girante em quatro instantes diferentes em um estator trifásico de dois polos [1].



Assim como na máquina síncrona, a velocidade do campo girante depende do número de polos e pode ser encontrada a partir da equação 2. Dessa forma, a velocidade síncrona é dada por:

$$n_s = \frac{120f_e}{P} \quad (3)$$

Onde: f_e = frequência elétrica, em Hz.

n_s = velocidade síncrona em rpm

P = número de polos da máquina

Cabe observar que ao inverter a sequência das fases de alimentação, o sentido de giro do campo girante inverterá e, conseqüentemente, o rotor também inverterá o sentido de rotação.

Para que haja força eletromotriz induzida no rotor, é necessário que as barras ou enrolamentos do rotor cortem as linhas de fluxo magnético do campo girante. Isto apenas ocorre se houver um movimento relativo entre o rotor e o campo girante. Trabalhando como motor, a velocidade angular do rotor n é sempre menor que a do campo girante n_s . A diferença entre a velocidade síncrona e a do rotor chama-se deslizamento das rotações, ou escorregamento de rotação, ou escorregamento de fase ou ainda simplesmente escorregamento [7]. Prefere-se apresentar o escorregamento s correspondente a uma determinada velocidade n em RPM como uma fração da velocidade síncrona n_s , também em RPM. Desta forma:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4)$$

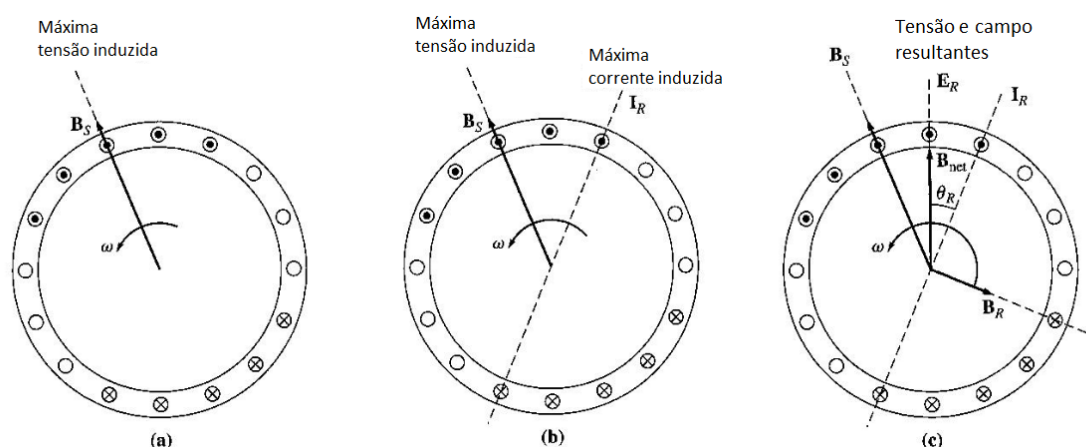
Sendo s o escorregamento, n_s a rotação síncrona em rpm e n a rotação do rotor em rpm. Para facilitar o cálculo da velocidade do motor podemos reescrever a equação 4 na forma $n = (1 - s)n_s$.

A tensão que surge nas barras do rotor devido a essa velocidade relativa também é uma função do comprimento do condutor e da densidade de fluxo magnético. Devido o surgimento de tensão nas barras, o rotor também produz um campo magnético \mathbf{B}_r que ao interagir com o campo magnético girante \mathbf{B}_s produz um conjugado eletromecânico [3].

Na figura 6 as barras superiores se movem para direita em relação ao campo, pois o rotor está rotacionando abaixo da velocidade síncrona. Nesse momento, pela regra da mão direita, a corrente induzida sai das barras superiores e entra nas inferiores. Porém como as barras tem característica indutiva, a corrente induzida estará atrasada em relação a tensão

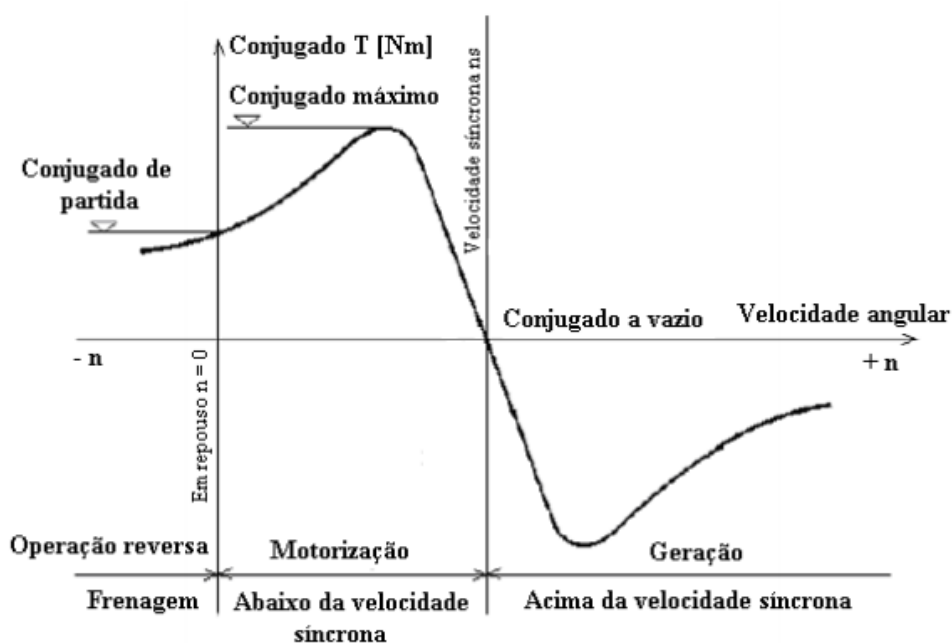
do rotor. É importante notar que em operação normal, ambos os campos B_s e B_r giram juntos na velocidade síncrona n_s .

Figura 6 – desenvolvimento de conjugado em um motor de indução; (a) O campo girante do estator induz tensão nas barras do rotor; (b) A tensão induzida faz surgir uma corrente, que devido a característica indutiva das barras está atrasada em relação a tensão; (c) A corrente induzida produz um campo magnético 90° atrasado em relação a ela, que interage com o resultante B_{net} e fornece um conjugado eletromecânico [3].



Quando comparamos o motor de indução com os outros motores em geral, uma das mais importantes características é a curva conjugado versus velocidade. O gráfico da figura 7 mostra a típica relação existente entre essas grandezas em uma máquina de indução.

Figura 7 – Conjugado x Velocidade na máquina de indução [7].



Carregando o motor de forma a exigir além do conjugado máximo, fará com que a máquina pare e torne o sistema que controla a máquina instável. Basicamente, notamos que para velocidades abaixo da velocidade síncrona se tem um torque positivo e a máquina opera como motor e para velocidades acima da velocidade síncrona se produz conjugado negativo de forma a tornar a máquina um gerador.

Existe ainda a zona de frenagem da máquina que pode ocorrer ao inverter o sentido do campo girante quando a máquina está operando. A inércia do rotor fará com que ele continue se movimentando na direção em que estava no momento anterior à inversão do campo do estator, fazendo surgir um conjugado que tende a parar a máquina. Alguns detalhes dessa curva serão salientados ao avaliar o circuito equivalente da máquina.

3.4 O CIRCUITO EQUIVALENTE

As características elétricas de uma máquina de indução lembram muito um transformador. Dois circuitos elétricos, como os enrolamentos do rotor e do estator, são acoplados por um campo magnético que é responsável pelo “transporte” de energia de um circuito para o outro. A máquina de indução se difere de um transformador pelo fato de um de seus circuitos poder se movimentar em relação ao outro [1]. Primeiramente, se avaliará o circuito equivalente do rotor, posteriormente o do estator. O final da seção une os dois circuitos para avaliar a máquina como um todo.

Em geral, quanto maior a velocidade relativa entre rotor e campo girante, maiores são os valores de tensão e frequência induzida no rotor. Operando fora da zona de frenagem, a maior diferença ocorre quando o rotor está parado, condição conhecida como rotor bloqueado, nesse caso, com tensão E_{r0} e frequência f_s . Considera-se que a magnitude E_r e a frequência f_r das grandezas rotóricas em qualquer velocidade (dentro dos limites aceitáveis) são diretamente proporcionais ao escorregamento.

$$E_r = sE_{r0} \quad (5) \quad e \quad f_r = s f_s = \frac{s n_s}{60} \quad (6)$$

Observando o circuito do rotor por fase, a tensão induzida E_r é limitada pela impedância do rotor Z_r . Naturalmente, essa impedância é composta por uma resistência R_r e

pela reatância X_r do rotor. A reatância X_r é conhecida como reatância de dispersão, que gera todo o campo magnético proveniente do rotor que não possui vínculo com os enrolamentos do estator. Como o escorregamento determina a frequência da corrente CA no rotor, quanto maior o seu valor, maior será X_r , porque a reatância é função da frequência ($X=2\pi f L$). Isso faz com que X_r também seja diretamente proporcional ao escorregamento:

$$X_r = sX_{r0} \quad (7)$$

Onde: X_{r0} = reatância do rotor bloqueado.

Ao se assumir que a reatância de dispersão é conectada em série com a resistência do rotor, o módulo da impedância resultante será:

$$Z_r = \sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2} \quad (8)$$

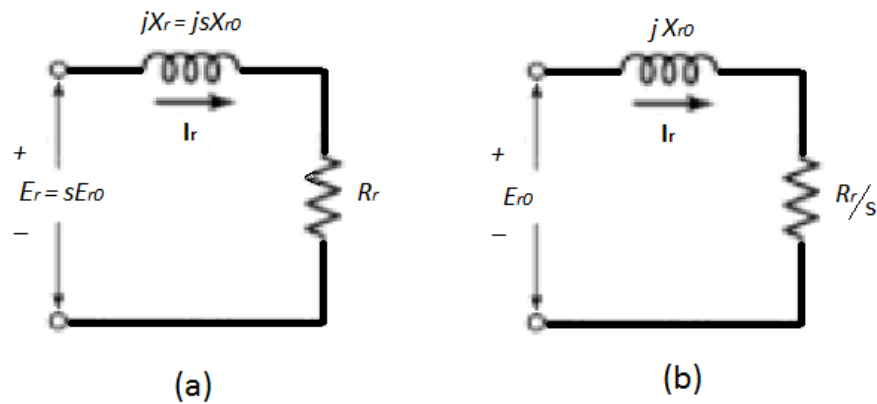
Então o módulo da corrente no rotor vale $I_r = E_r/Z_r$, que resulta em:

$$I_r = \frac{sE_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}} \quad (9)$$

A figura 8(a) mostra o circuito equivalente do rotor na frequência de escorregamento. Na figura 8(b), avalia-se o rotor do ponto de vista do estator, ou seja, na frequência síncrona. Desse modo, fica claro que a potência entregue ao rotor é dependente da componente real da impedância do modelo, que é resultado de uma variação no escorregamento. Matematicamente, basta dividir todos os elementos da figura 8(a) por s para se obter:

$$I_r = \frac{E_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{r0})^2}} \quad (10)$$

Figura 8 – Modelo do rotor em uma máquina de indução; (a) modelo tendo como referência a frequência de escorregamento; (b) modelo tendo como referência a frequência síncrona [3].



A equação 10 comprova que ao diminuir o escorregamento de operação a corrente que flui para o rotor também tende a diminuir. O termo R_r/s dessa equação representa a soma do que é transformado em potência mecânica para movimentação do rotor com as perdas ôhmicas nas barras (ou enrolamentos). Dessa forma, é possível descrever a potência desenvolvida no rotor da seguinte forma:

Potência ativa do rotor = perdas ôhmicas no rotor + potência mecânica desenvolvida.

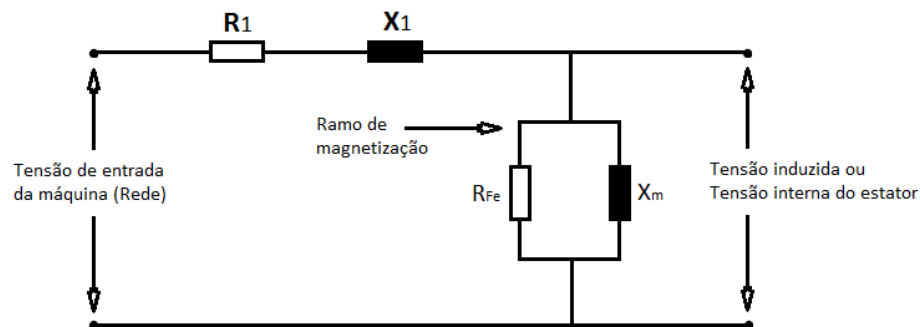
$$I_r^2 \frac{R_r}{s} = I_r^2 R_r + I_r^2 R_r \frac{(1-s)}{s} \quad (11)$$

A potência total da equação 11 é fornecida ao rotor da máquina pelo campo magnético através do entreferro e também é chamada de potência de entreferro.

Ao avaliar o estator, os enrolamentos têm uma resistência R_1 e uma reatância X_1 , além de um ramo de magnetização que possui uma reatância X_m e um elemento resistivo R_{Fe} . A maior parte da potência fornecida ao ramo de magnetização é convertida em campo magnético e é dependente da qualidade do material do núcleo (relacionado com a curva de magnetização da máquina que será avaliada no capítulo 4) e do comprimento do entreferro. Em geral, quanto maior o entreferro, maior será a potência reativa requerida para gerar linhas de campo magnético que concatenem o rotor e, conseqüentemente maior será a demanda por corrente de magnetização. Pequena parte da potência fornecida ao ramo de

magnetização supre as perdas devido correntes de Fucoalt e por efeitos de histerese, justificando a existência de R_{Fe} . A figura 9 mostra o modelo elétrico do estator:

Figura 9 – Circuito equivalente do estator [1].



A combinação dos circuitos das figuras 8(b) e 9 resultam no circuito monofásico da máquina de indução. Contudo, esses circuitos estão acoplados magneticamente como em um transformador, então o circuito do rotor deve ser referenciado ao do estator para obter o equivalente. É importante observar que, quando as correntes e tensões são refletidas no estator, sua frequência também é alterada para a frequência do estator. Todos os fenômenos elétricos do rotor, quando vistos a partir do estator, tornam-se fenômenos que têm frequência síncrona, simplesmente porque o enrolamento do estator vê o campo girante na velocidade imposta pela frequência da rede.

Em um transformador comum, podemos referir tensões, correntes e impedâncias do lado secundário do dispositivo para o lado primário, por meio da relação de espiras do transformador. Exatamente o mesmo tipo de transformação pode ser feito com o circuito do motor de indução. Se a relação de espiras efetiva de espiras de um motor de indução for N_{ef} , a tensão de rotor transformada torna-se:

$$E_1 = N_{ef} E_{r0} \quad (12)$$

E a corrente do rotor torna-se:

$$I_2 = \frac{I_r}{N_{ef}} \quad (13)$$

Logo, tem-se que a impedância do rotor torna-se:

$$Z_2 = N_{ef}^2 \left(\frac{R_r}{s} + jX_{r0} \right) \quad (14)$$

Agora, se adotarmos as seguintes definições,

$$R_2 = N_{ef}^2 R_r \quad (15)$$

$$X_2 = N_{ef}^2 X_{r0} \quad (16)$$

Então o circuito equivalente final por fase do motor de indução será como está na figura 10. A resistência do rotor R_r e a reatância do rotor X_{r0} com o rotor bloqueado são de determinação muito difícil em rotores de gaiola de esquilo. A relação de espiras efetiva N_{ef} também é de difícil obtenção no caso de rotores de gaiola de esquilo. Felizmente, contudo, é possível realizar medidas e ensaios que darão diretamente os parâmetros do circuito equivalente, não sendo necessário conhecer R_r , X_{r0} e N_{ef} para realização de cálculos.

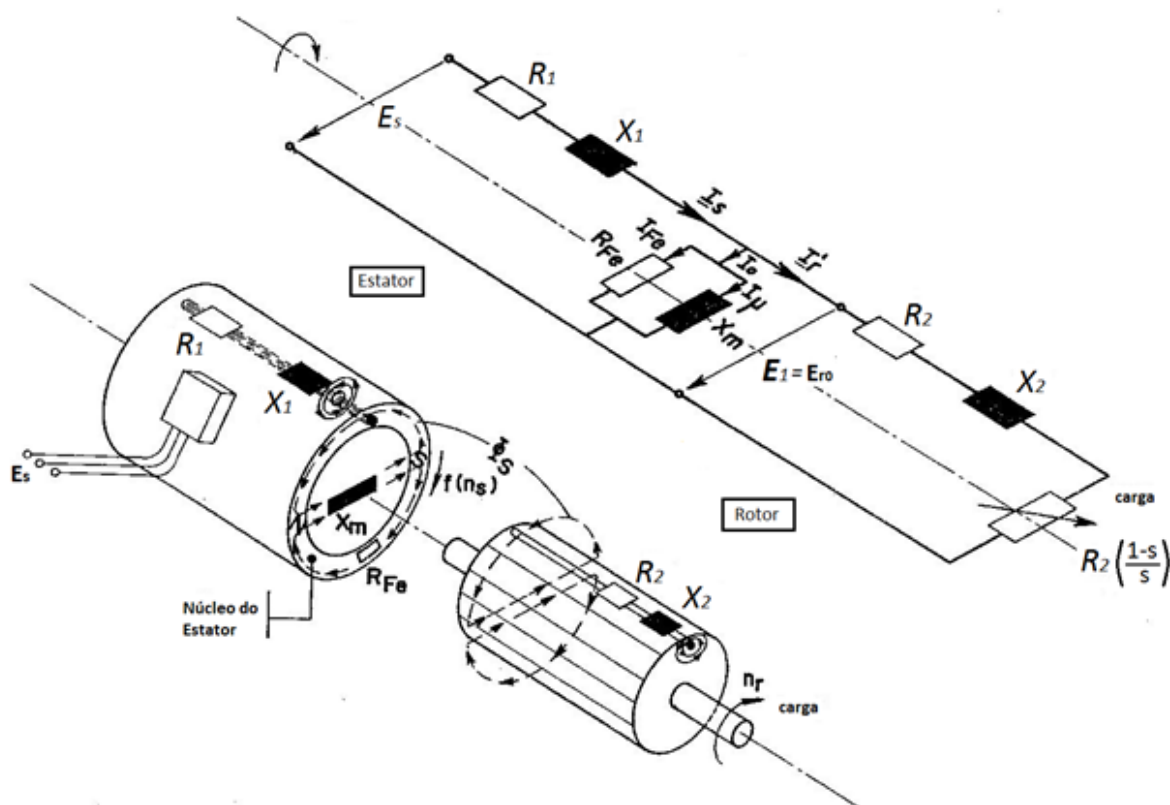
A seguir, deve-se observar que a onda de fluxo resultante no entreferro é determinada pela soma fasorial da corrente de estator I_s e a corrente de carga equivalente I_r' . Além disso, ela é responsável por induzir força eletromotriz na frequência de escorregamento no rotor e na frequência síncrona no estator.

Se o rotor gira sem carga mecânica associada, o escorregamento será muito pequeno. Nesse caso, os enrolamentos do estator conectados à rede absorverão praticamente apenas a corrente I_0 que alimenta o ramo de magnetização para promover o surgimento de campo. O elemento mais relevante nesse ponto de operação é a reatância X_m , fazendo com que o circuito fique altamente indutivo e o fator de potência se torne baixo.

Por outro lado, se a carga mecânica associada ao eixo da máquina for elevada, a velocidade do rotor decresce, o escorregamento tende a aumentar e a corrente I_r' passa a tomar maiores proporções. Dessa forma, a carga equivalente da máquina deixa de ser plenamente indutiva e o fator de potência aumenta. Nesse caso, a variação de corrente no rotor provocará uma redução no fluxo resultante da máquina, pois segundo a Lei de Lenz, essa variação criará um fluxo que se opõe ao fluxo que deu origem a corrente do rotor.

Um fluxo decrescente reduz a tensão induzida nos enrolamentos do estator e causa um aumento na diferença entre a tensão da rede e a tensão interna da máquina. Esse fato permite que uma maior corrente percorra o circuito do estator e, conseqüentemente, a tensão induzida aumenta novamente para compensar a tendência do circuito do rotor de reduzir o fluxo através do núcleo.

Figura 10 – Circuito equivalente completo de uma máquina de indução [1].



4. Gerador de Indução

A tecnologia de geração assíncrona, ou seja, a utilização de máquinas de indução operando como geradores, foi utilizada desde o início do século 20, até que foi abandonada e quase desapareceu nos anos 60. Na década de 70, o aumento do preço do petróleo e o elevado custo da energia elétrica, aliado a importantes objetivos como o uso racional de energia, trouxe de volta a cena a MIG. Mais recentemente, com o a generalização do uso da eletrônica de potência, computadores e microeletrônica, tornou-se mais fácil a implementação desses geradores [7].

Um gerador de indução (GI) pode estar presente em um micro ou minissistema de geração operando isoladamente ou interligado a rede. Obviamente, os dois modos de operação possuem diferentes características que serão avaliadas nesse trabalho.

Para operação interligada, o sistema de controle é simples porque tensão e frequência são estabelecidas pela rede. Deve-se apenas estar atento à regulamentação vigente no local onde se fará a instalação de um micro ou minissistema de geração em termos de proteção, fator de potência, níveis de tensão, desvio de frequência e conteúdo harmônico da instalação elétrica.

No caso da operação isolada, o sistema de controle deve manter tensão e frequência em níveis aceitáveis, independentemente de variações no acionamento mecânico da máquina motriz ou da carga do sistema. Atualmente os geradores síncronos não são a única opção se tratando de geração isolada para micro e mini geração, pois o desenvolvimento da eletrônica de potência trouxe soluções de baixo custo para o controle de todas as grandezas elétricas para os geradores de indução.

A máquina de indução opera como motor quando rodando abaixo da velocidade síncrona e como gerador quando acima da velocidade síncrona. Apesar de existirem metodologias de projeto de máquinas de indução que melhoram seu desempenho como gerador, qualquer motor de indução rodando acima da velocidade síncrona pode fornecer energia para a rede.

O motor de indução requer injeção potência reativa de uma fonte externa para estabelecer seu campo magnético. Na operação interligada, a potência reativa pode ser

inteiramente drenada da rede, mas o fluxo de potência ativa será invertido, ou seja, do motor para a rede. Na operação isolada, praticamente não há formas de gerar energia sem a utilização de bancos de capacitores.

Detalhes sobre os modos de operação serão abordados no capítulo 4. No capítulo 5 se apresentará resultados de ensaios feitos em laboratório em diferentes cenários.

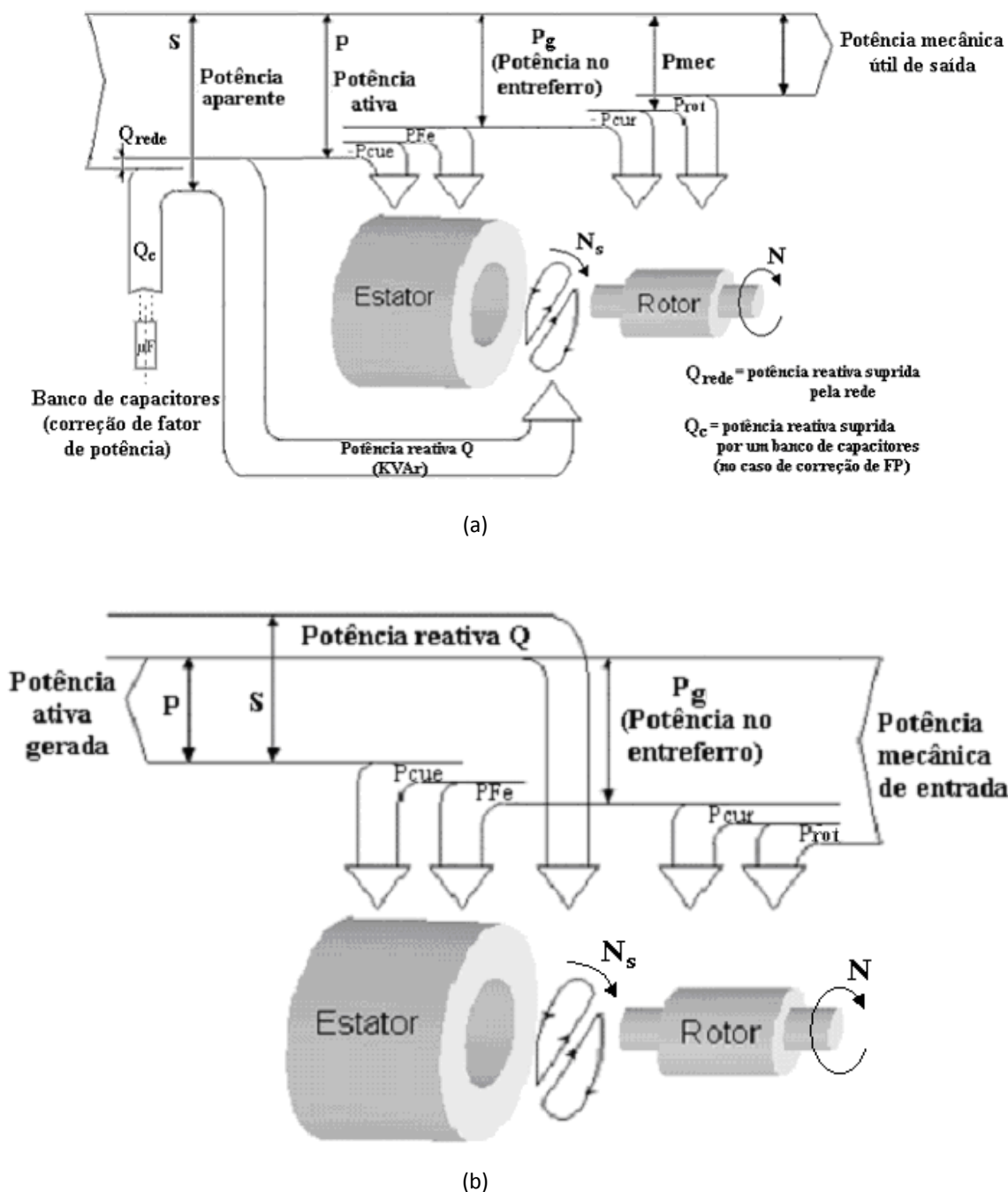
4.1 MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO GERADOR

Para compreender o funcionamento de uma máquina de indução em modo gerador é fundamental comparar o fluxo de potência quando a máquina está acima, e abaixo da velocidade síncrona. O balanço das componentes de potência auxilia a análise de conversão de energia eletromecânica. As potências convertidas em perdas são qualitativamente iguais, indiferentes do modo de operação. Assim, as perdas são atribuídas da seguinte forma:

A figura 11 traz um esquema que resume o fluxo em ambos os modos.

- Perdas mecânicas (rotacionais) P_{rot} - Incluem todas as perdas rotacionais tais como atrito em rolamentos e perdas devido à ventilação forçada ou resfriamento [7].
- Perdas no núcleo P_{Fe} - Perdas por histerese, correntes de Foucault e anômalas devido a variações de densidade de fluxo magnético. As perdas no ferro do rotor são desprezadas, pois as variações de densidade de fluxo no rotor são pequenas (a frequência da tensão induzida no rotor é baixa) [7].
- Perdas no cobre (efeito Joule) P_{cuc} e P_{cur} - Estas perdas são devido às resistências ôhmicas do estator e rotor, respectivamente [7].

Figura 11 – Fluxo de potência na máquina de indução; (a) no modo motor; (b) modo gerador.



Quando uma máquina motriz aciona o eixo de um motor de indução acima da velocidade síncrona o fluxo de potência ativa inverte. A mesma equação 4 pode ser utilizada, mas o escorregamento passa a ser negativo, assim como o conjugado. É importante observar que o fluxo de potência reativa não se altera no modo gerador. A potência reativa necessária para produzir campo magnético, não pode ser fornecida pelo rotor gaiola de esquilo e nem pela máquina motriz. Assim, a máquina de indução pode fornecer potência ativa desde que

exista alguma fonte de potência reativa externa. Quando conectado a uma rede com outros tipos de geradores a potência reativa pode ser suprida por geradores síncronos trabalhando em modo sobre-excitado.

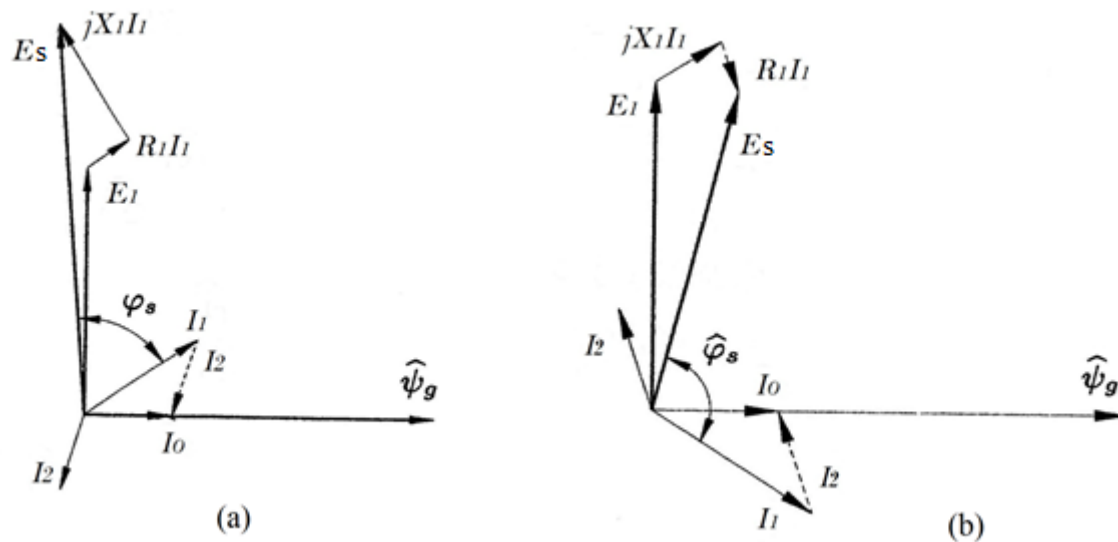
Uma dada máquina de indução não é capaz de entregar a mesma potência ativa no modo gerador para a rede na mesma quantidade que absorveria no modo motor, desde que não tenha sido especificamente projetada para gerar energia. Isso acontece porque as perdas (no cobre, no núcleo e fricção) aumentam, já que a máquina opera mais próxima da região de saturação. Teoricamente, a potência mecânica poderia aumentar para compensar as perdas e alcançar uma potência elétrica de saída mais elevada. No entanto, há uma limitação pelo fato de que um acréscimo não controlado de potência mecânica de entrada sobrecarregaria a máquina, resultando em um aquecimento elevado dos enrolamentos do estator e prejudicando o isolamento das bobinas. Para evitar isso, a máxima corrente injetada na rede ou entregue para uma determinada carga não deve ultrapassar a corrente nominal de placa.

Ao comparar as figuras 11(a) e 11(b), percebe-se que a potência eletromagnética P_e através do entreferro é maior no modo gerador que no modo motor apesar de a potência aparente S ser a mesma em ambos os casos. Isso acontece porque a potência utilizada para suprir as perdas no estator devem ser transmitidas através do entreferro quando gerando, mas não quando no modo motor. Transmitir uma potência maior no entreferro significa a necessidade de mais corrente de magnetização para suprir o campo magnético que vincula o rotor ao campo do estator. Nesse caso, o consumo de potência reativa aumenta e o fluxo de potência ativa diminui, tendo em vista que a potência aparente é limitada, para não haver sobreaquecimento. As mudanças nos valores de potência ativa e reativa resultam na alteração do fator de potência do sistema. O que geralmente se observa é que o fator de potência visto pela rede de uma máquina de indução operando como gerador é menor que operando como motor se não houver nenhuma banco de capacitor envolvido para compensação de reativos.

Esse fenômeno pode também ser explicado através do circuito equivalente apresentado no Capítulo 3. Quando motor, a tensão induzida E_1 é menor que a tensão da rede E_s por causa da queda de tensão na impedância equivalente do estator, enquanto no modo gerador, E_1 deve ser maior que a tensão da rede e por isso deve haver um aumento

na magnetização da máquina, fazendo a potência reativa absorvida ser maior que quando operando quando motor. Os diagramas fasoriais para as tensões do circuito equivalente estão na figura 12.

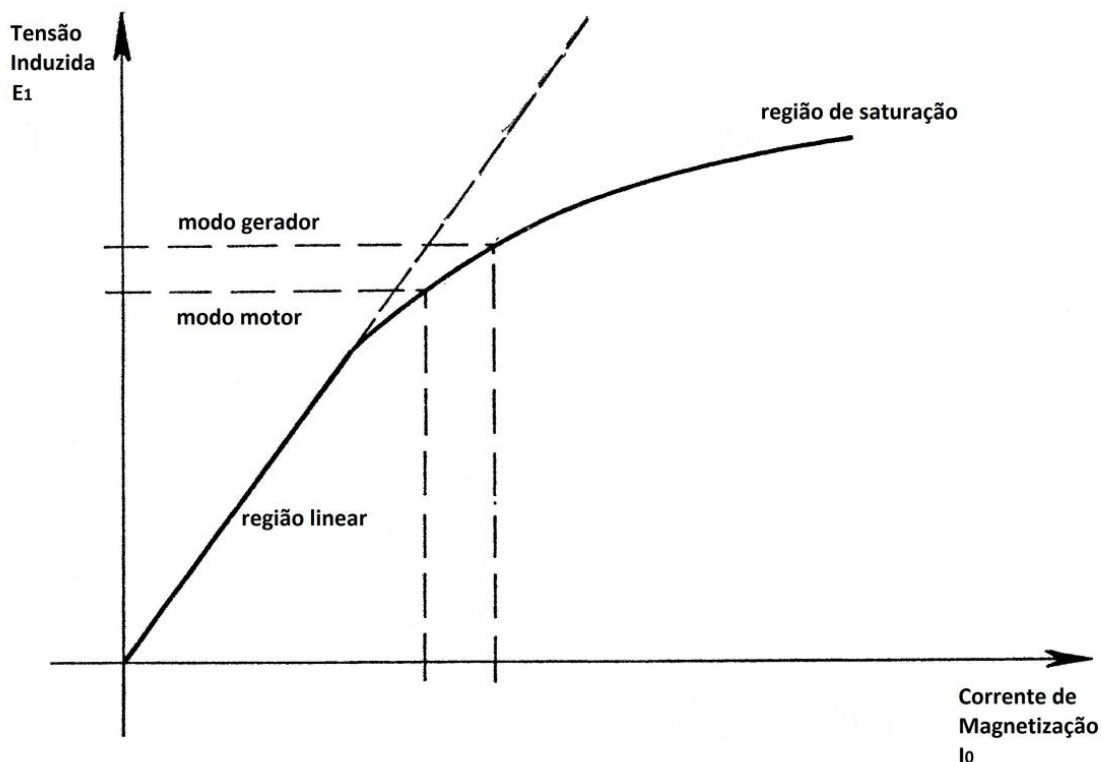
Figura 12 – Diagramas fasoriais; (a) modo motor; (b) modo gerador [21].



4.1.1 O efeito da saturação

Na operação com gerador, o baixo fator de potência pode ser justificado por efeitos de saturação magnética. O aço no núcleo do estator e do rotor apresenta boa característica ferromagnética enquanto não se ultrapassa determinado valor de fluxo magnético. O fenômeno de indução de tensão aumenta linearmente com a corrente de magnetização até o ponto indicado na curva da figura 13, comumente chamado joelho. Para correntes de magnetização maiores que esse valor, a tensão não cresce mais linearmente, conseqüentemente, um pequeno aumento de tensão exige grande aumento da corrente de magnetização.

Figura 13 – Efeito da saturação [1]



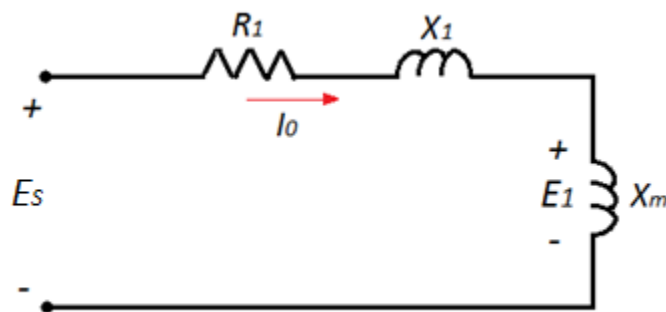
O aumento das necessidades de magnetização no modo gerador tende a deslocar o ponto de operação para a faixa de saturação magnética na maioria dos motores modernos de indução. Ao tentar manter a tensão induzida ao nível exigido, a corrente de magnetização, e com ela a demanda de potência reativa do gerador,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

A curva de magnetização é obtida experimentalmente quando se aciona um GI através de uma máquina motriz na velocidade síncrona e alimentando-o com uma fonte externa de tensão variável e frequência fixa referente à síncrona. Desse modo, o escorregamento tende a zero e a impedância equivalente do rotor tende a infinito, fazendo com que toda a corrente flua através do ramo de magnetização. Variando-se a tensão de alimentação desde zero até em torno de 25% acima da tensão nominal da máquina, e medindo a corrente correspondente, pode-se obter a curva de saturação. Como a impedância do ramo de magnetização varia com a frequência, tem-se uma curva de saturação para cada frequência de operação do GI.

4.1.2 Levantamento teórico da curva de magnetização

Se os parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução forem conhecidos, é possível adaptar o modelo para obtenção teórica da curva de magnetização [4]. Do item anterior, sabe-se que a curva de magnetização é obtida em um ensaio na velocidade síncrona. Portanto, nessa condição o circuito equivalente assumirá a forma da figura abaixo, se desconsideradas as perdas no núcleo (R_{fe}).

Figura 14 – Circuito para levantamento da curva de magnetização teórica



A tensão RMS no ramo de magnetização vale

$$E_1 = X_m I_0 \quad (17)$$

O módulo da corrente de magnetização calculado depende da impedância equivalente para escorregamento zero Z_{eq0} .

$$I_0 = (E_s) / Z_{eq0} \quad (18)$$

O produto do módulo da corrente de magnetização pela reatância de magnetização resulta no módulo da tensão induzida. Logo,

$$Z_{eq0} = R_1 + j(X_1 + X_m) \quad (19)$$

Elevando todos os elementos ao quadrado:

$$Z_{eq0}^2 = R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \quad (20)$$

Isola-se X_m :

$$X_m = \sqrt{(Z_{eq0}^2 - R_1^2)} - X_1 \quad (21)$$

$$E_1 = \left[\sqrt{(Z_{eq0}^2 - R_1^2)} - X_1 \right] I_0 \quad (22)$$

Mantendo a tensão terminal constante, pode-se determinar a curva de magnetização fazendo I_0 variar. O resultado da equação 23 é observado no capítulo 5. É importante lembrar que essa equação foi determinada para uma máquina conectada em Δ . Para uma máquina conectada em Y deve dividir a tensão terminal por $\sqrt{3}$ [4].

$$E_1 = \left[\sqrt{\left(\frac{E_S^2}{I_0^2} - R_1^2 \right)} - X_1 \right] I_0 \quad (23)$$

4.2 OPERAÇÃO INTERLIGADA

O conhecimento dos parâmetros do circuito equivalente por fase discutido no capítulo 3 possibilita determinar as características eletromecânicas da máquina de indução em regime permanente. Além das grandezas indicadas na figura 11, é possível analisar as variações de corrente, conjugado máximo (e de partida) e velocidade que ocorrem quando as exigências de carga são alteradas. Como na máquina de indução os parâmetros do circuito equivalente são constantes para uma frequência constante (60 Hz), somente o escorregamento define o modo de operação (frenagem, motor e gerador), o circuito equivalente monofásico mostra-se útil na análise das mais variadas aplicações [7]. Contudo, esse comportamento constante dos parâmetros pode não se manter devido ao efeito térmico sobre as resistências ôhmicas dos enrolamentos. O conjugado eletromagnético

correspondente à potência transferida através do entreferro pode ser obtido a partir da equação abaixo, onde T_{mec} é o conjugado eletromagnético em N.m, P_g é a potência transferida através do entreferro da máquina (representa a potência transferida ao circuito do rotor) e ω_s é a velocidade angular síncrona em radianos por segundo [3].

$$T_{mec} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (24)$$

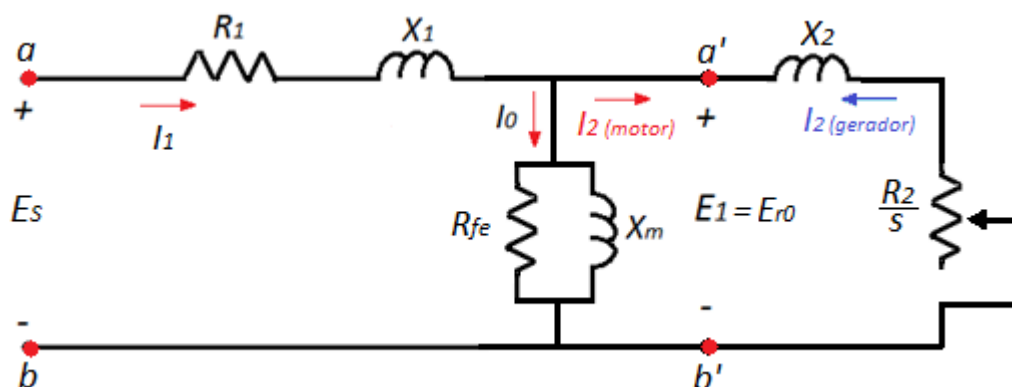
Observando o circuito equivalente do Capítulo 3 na figura 15, pode-se dizer que a potência transferida através do entreferro é:

$$P_g = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \quad (25)$$

Sendo n_{fases} o número de fases, I_2 a corrente referida ao circuito do rotor e R_2 a resistência do rotor. As perdas ôhmicas associadas ao circuito do rotor P são calculadas pela equação:

$$P_{cur} = n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (26)$$

Figura 15 – Circuito equivalente monofásico da máquina de indução



A potência mecânica desenvolvida pelo motor pode ser determinada pelo resultado da subtração da dissipação de potência no rotor da potência no entreferro

$$P_{mec} = P_g - P_{cur} = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) - n_{fases} I_2^2 R_2 = n_{fases} I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (27)$$

Porém, unindo a equação 25 ao resultado final da equação 27, tem-se:

$$P_{mec} = (1-s)P_g \quad (28)$$

$$P_{cur} = sP_g \quad (29)$$

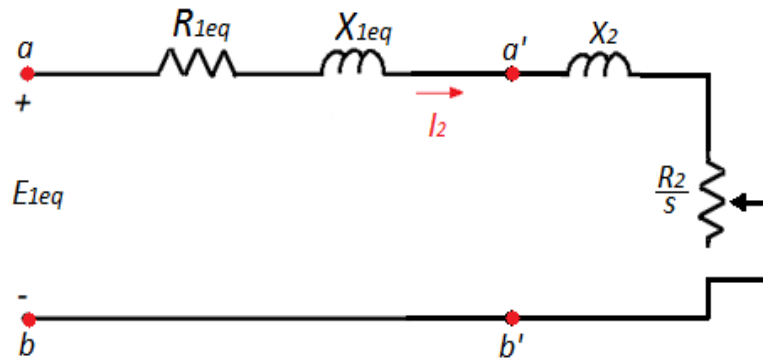
A partir desse ponto, se dividirá o comportamento da máquina. Primeiramente se avalia o comportamento no modo motor e posteriormente no modo gerador.

4.2.1 Caracterização em regime permanente no modo motor

A partir da curva característica de conjugado da figura 6, sabe-se que a operação no modo motor vale para escorregamentos entre zero e um. Conseqüentemente, as equações apresentadas a seguir não são válidas enquanto a velocidade da máquina motriz não ultrapassa a velocidade síncrona.

O teorema de Thevenin permite escrever as equações de conjugado e potência desenvolvidas no motor de indução a partir dos parâmetros do circuito equivalente. Assim, a partir dos terminais a' e b' vistos pela rede, como mostrado na figura abaixo, o circuito equivalente por fase é simplificado para que apresente uma fonte de tensão AC em série com uma impedância.

Figura 16 – Modelo da máquina de indução após simplificação usando teorema de Thevenin.



Aplicando o teorema, a tensão equivalente E_{1eq} é a tensão obtida por um divisor de tensão, ou seja, escreve-se a tensão entre a' e b' em função da tensão entre a e b [3].

$$E_{1eq} = \frac{(R_{fe} // X_m) E_S}{(R_1 + jX_1) + (R_{fe} // X_m)} \quad (30)$$

A impedância equivalente é encontrada através do paralelo entre o ramo de magnetização e a impedância do estator, considerando a fonte E_S um curto circuito.

$$Z_{1eq} = (R_1 + jX_1) // (R_{fe} // jX_m) = R_{1eq} + jX_{1eq} \quad (31)$$

Assim, a corrente $I_{2(motor)}$, que é a responsável pelo desenvolvimento de potência mecânica, é obtida pela equação:

$$I_{2(motor)} = \frac{E_{1eq}}{Z_{1eq} + jX_2 + R_2/s} \quad (32)$$

Incluindo $I_{2(motor)}$ na equação 27, a potência mecânica deve ser:

$$P_{mec(motor)} = \left[\frac{n_{fases} E_{1eq}^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left[R_{1,eq} + \left(\frac{R_2}{s} \right) \right]^2 + (X_{1eq} + X_2)^2} \right] (1 - s) \quad (33)$$

Substituindo a equação acima na equação 28, obtém-se o a potência de entreferro P_g . Pondo P_g na equação 24, se encontra o conjugado eletromecânico desenvolvido na máquina de indução operando como motor [7] [3].

$$T_{mec(motor)} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{fases} E_{1eq}^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left[R_{1,eq} + \left(\frac{R_2}{s} \right) \right]^2 + (X_{1eq} + X_2)^2} \right] \quad (34)$$

O rendimento é a razão da potência de saída pela potência de entrada. No motor de indução, é a razão entre a potência mecânica disponível no eixo ($P_{mec(motor)}$ – Perdas rotacionais) e a potência elétrica de entrada $P_{in(motor)}$. Logo, o rendimento do motor é [7]:

$$\eta_{motor} = \frac{P_{mecânica\ de\ saída}}{P_{in(motor)}} = \frac{P_{mec(motor)} - P_{rot}}{P_{in(motor)}} \quad (35)$$

Onde, P_{rot} são as perdas rotacionais e a potência de entrada é dada por,

$$P_{in(motor)} = n_{fases} E_S I_1 \cos \varphi \quad (36)$$

Conforme o circuito equivalente mostrado na figura 15, o fator de potência $\cos(\varphi)$ pode ser determinado pelo valor do argumento da impedância do circuito visto entre os terminais a e b:

$$Z_{ab} = (R_1 + jX_1) + \left[\left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) // (R_{fe} // jX_m) \right] \quad (37)$$

$$\cos \varphi = \cos \left(\tan^{-1} \frac{Z_{ab,imag}}{Z_{ab,real}} \right) \quad (38)$$

Sendo $Z_{ab,imag}$ e $Z_{ab,real}$ a parte imaginária e real da impedância equivalente do modelo, respectivamente. A união das equações 35, 36, 38 e 33 resulta em no rendimento do motor [7].

$$\eta_{motor} = \frac{I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) - P_{rot}}{E_S I_1 \cos \varphi} \quad (39)$$

4.2.2 Caracterização em regime permanente no Modo gerador

A partir da curva característica de conjugado da figura 7, sabe-se que a operação no modo motor vale para escorregamentos entre zero e um. Conseqüentemente, as equações apresentadas a seguir não são válidas enquanto a velocidade da máquina motriz não ultrapassa a velocidade síncrona.

Como a tensão induzida no gerador de indução E_1 está em adiantamento em relação à tensão terminal, o divisor de tensão da equação 30 que propicia o cálculo para o conjugado eletromagnético motor, não vale para operação como gerador. Portanto, de acordo com a figura 12, a tensão induzida em um GI é o produto da corrente de magnetização pela impedância do ramo de magnetização. Uma formulação para o conjugado com

escorregamento negativo, como nas equações 40 e 41, pode ser realizada a partir da determinação da corrente presente no circuito do rotor refletido com escorregamento negativo [21].

$$\mathbf{I}_{2(gerador)} = -\frac{\mathbf{Z}_m}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}_r} \left(\frac{\mathbf{E}_s}{\mathbf{Z}_{ab(gerador)}} \right) \quad (40)$$

Onde: \mathbf{Z}_m = impedância do circuito de magnetização (ohms)

\mathbf{Z}_r = impedância do circuito do rotor (ohms)

$\mathbf{Z}_{ab(gerador)}$ = impedância equivalente do circuito com escorregamento negativo (ohms)

$$\mathbf{E}_{1(gerador)} = \left(\frac{\mathbf{E}_s}{\mathbf{Z}_{ab(gerador)}} + \mathbf{I}_{2(gerador)} \right) \mathbf{Z}_m \quad (41)$$

Logo, o conjugado eletromecânico do gerador de indução pode ser calculado com a combinação das equações 41, 25 e 24, e a potência mecânica pelas equações 41, 24 e 28 [7]:

$$T_{mec(gerador)} = \frac{n_{fases}}{\omega_s} \left[(\mathbf{I}_{2(gerador)})^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \right] \quad (42)$$

$$P_{mec(gerador)} = n_{fases} (1 - s) \left[(\mathbf{I}_{2(gerador)})^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \right] \quad (43)$$

4.2.3 Passos para conexão do gerador a rede

Diferentemente do gerador síncrono, o gerador de indução não precisa estar sincronizado em tensão, frequência e fase com a rede para ser conectado. O procedimento a seguir deve ser feito ao conectar o GI na rede [1]:

- Com o GI desconectado, aumenta-se a velocidade da máquina primária até atingir a velocidade síncrona. Dessa forma, ao imprimir tensões nos terminais do estator, não haverá movimento relativo entre o campo e o rotor, assim a máquina pode ser conectada sem riscos de grandes picos de corrente.

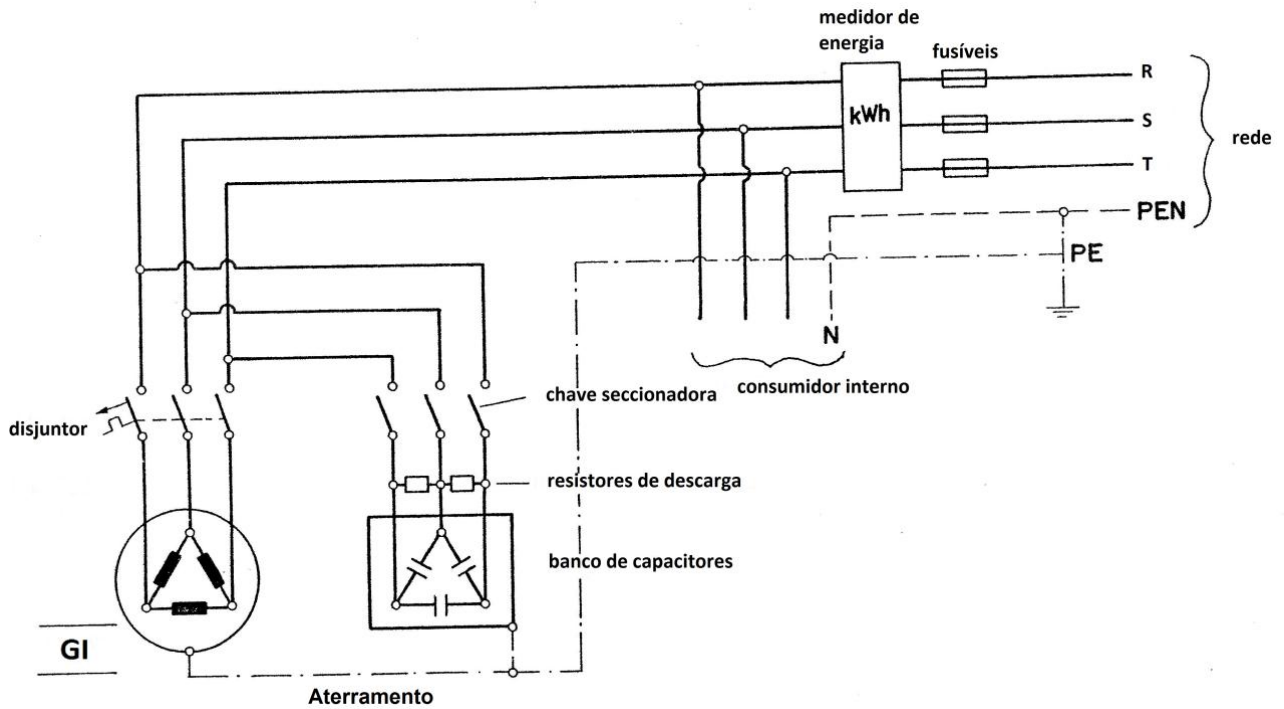
- No entanto, mesmo na velocidade síncrona a chamada corrente de in-rush está presente no momento da conexão. Isso acontece porque o GI se comporta como um curto-circuito para a rede enquanto o estator ainda não está completamente magnetizado e apresenta uma pequena reatância para a corrente. Durante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

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

O processo se inverte no momento da desconexão

- A velocidade da máquina motriz deve ser reduzida até a velocidade síncrona e o GI juntamente com o banco de capacitores podem ser desconectados simultaneamente. É importante que resistores sejam conectados em paralelo com o banco para descarregá-los no momento da desconexão e evitar que ocorram descargas elétricas em pessoas durante manutenção ou formações de arcos elétricos no momento de conexão [1]. A figura 17 mostra um exemplo de conexão do GI à rede

Figura 17 – GI interligado a rede [1].



4.2.4 Compensação da demanda de potência reativa

Capacitores são normalmente conectados em paralelo com as fases de um GI para melhorar o fator de potência. Os enrolamentos do estator e os capacitores formam um circuito ressonante onde a potência reativa oscila somente entre os capacitores e a máquina de indução. Dessa forma menos corrente reativa precisa ser absorvida e diminuem as perdas da rede de distribuição. As concessionárias de energia geralmente exigem um fator de potência mínimo das unidades geradoras distribuídas (ver capítulo 3), que caso não seja respeitado, acarreta em multas para os responsáveis da unidade. A capacitância demandada por fase em um gerador de indução pode ser determinada pela equação abaixo [2] [1]:

$$C_{fase} = \frac{\Delta Q}{3V_l^2(2\pi f)} \quad (44)$$

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

f = frequência da rede

ΔQ = potência reativa a ser compensada

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

$$\Delta Q = P_{atg} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (45)$$

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

No modo motor o fator de potência é um dado de placa, e no modo gerador, ele deve ser medido ou estimado [2]. Sabe-se que a queda do fator de potência (aumento da potência reativa absorvida) na transição de motor para gerador é extremamente dependente das características construtivas da máquina, como por exemplo, o tipo de barra rotórica e saturação magnética.

4.3 OPERAÇÃO ISOLADA

Em operação isolada um banco de capacitores deve ser conectado em paralelo com os enrolamentos do estator da máquina. Dessa forma, os capacitores fornecem os reativos necessários para que o gerador se magnetize. A figura 20 mostra um esquemático exemplificando esse caso.

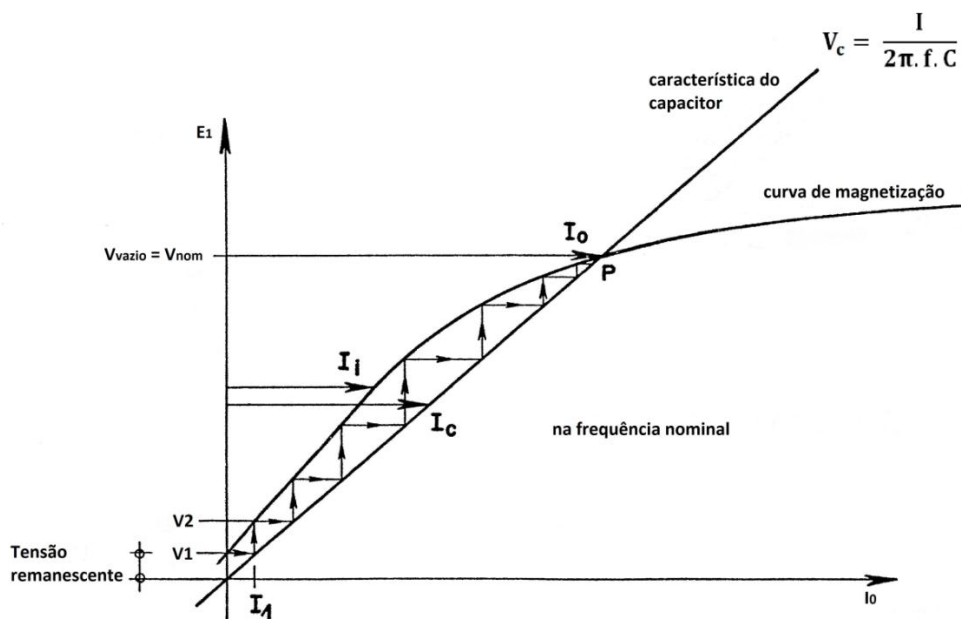
4.3.1 O processo de autoexcitação

A característica V/I de um capacitor representa a sua reatância, e essa característica é linear. Quando um capacitor adequado é conectado nos terminais do GI, a reta que representa a reatância capacitiva intercepta a curva de magnetização em um ponto, definindo o ponto de operação do GI. A Figura 19 mostra a reatância da máquina (curva de magnetização) e a reatância capacitiva.

Como já discutido, o processo de autoexcitação só é necessário em caso de operação isolada. Dessa forma, ao acionar a máquina motriz de um GI, não existe corrente de magnetização disponível nos enrolamentos do estator para produzir campo magnético nem os bancos de capacitores instalados serão capazes de fornecer potência reativa sem estarem inicialmente carregados. Porém, o rotor geralmente retém magnetismo residual de operações anteriores, fazendo com que uma pequena tensão induzida surja quando a máquina é posta a rodar, dando início ao processo de autoexcitação. Essa tensão inicial V_1 causada pelas linhas de fluxo do magnetismo atravessando as bobinas dos enrolamentos do estator é chamada tensão remanescente. A tensão remanescente é capaz de carregar os capacitores que fornecerão uma corrente de magnetização inicial I_1 de volta para os enrolamentos do estator no próximo meio período AC. A corrente I_1 , por sua vez, aumenta a magnetização da máquina e uma tensão V_2 é produzida. Esse processo se repete até que a corrente magnetização I_i (gerada pela tensão induzida V_i) e a corrente de capacitor I_c estejam em equilíbrio. Isso acontece no ponto de intersecção das duas curvas da figura 18.

Esse processo ocorre quando a máquina está a vazio. Selecionando valor de capacitância apropriado para ligar em paralelo aos enrolamentos de cada fase, será possível alcançar a tensão nominal em modo gerador. Na falta de magnetismo residual no rotor, uma bateria pode ser conectada por alguns segundos nos terminais do estator (em apenas uma das fases) quando a máquina estiver parada para reestabelecer um pequeno campo magnético que será suficiente para iniciar o processo. Ao invés disso, também se pode usar o mesmo método nos capacitores que fornecerão a corrente de magnetização, se forem retirados os resistores de descarga e dependendo da dimensão do banco, basta alguns segundos de conexão para carregar os capacitores.

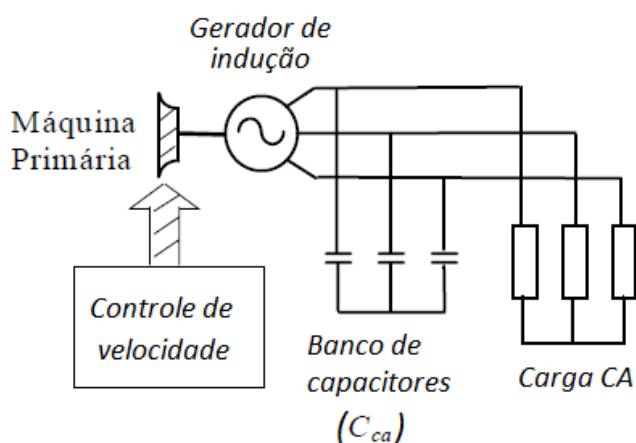
Figura 18 – Processo de autoexcitação de geradores de indução [1]



4.3.2 O problema da regulação de tensão e frequência no geradores de indução isolados

A figura 19 apresenta um sistema no qual o gerador de indução, excitado por um banco trifásico de capacitores, opera isolado da rede elétrica. Nestas circunstâncias, a potência ativa da carga CA influencia consideravelmente a amplitude e a frequência da tensão terminal do gerador, mesmo que a velocidade do rotor seja mantida constante pela ação do regulador de velocidade [5].

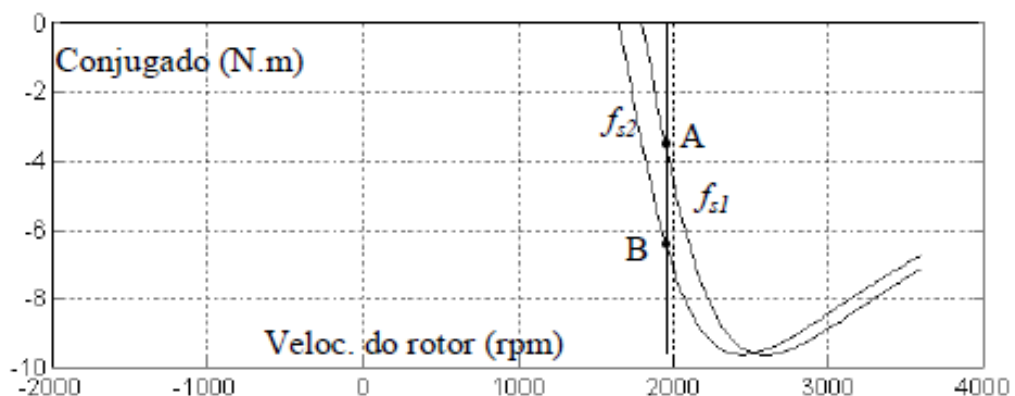
Figura 19 – GI isolado excitado por banco de capacitores [5].



Desconsiderando-se, por simplicidade, as perdas mecânicas, elétricas e magnéticas, a potência elétrica convertida pelo GI é dada pelo produto entre a velocidade angular do rotor e o conjugado no eixo do gerador. Desta forma, supondo-se que a velocidade do rotor é invariável, o aumento na potência ativa da carga CA deve produzir a queda da frequência síncrona, uma vez que esta é a única maneira de elevar o conjugado, a fim de atender à nova demanda de potência da carga [5].

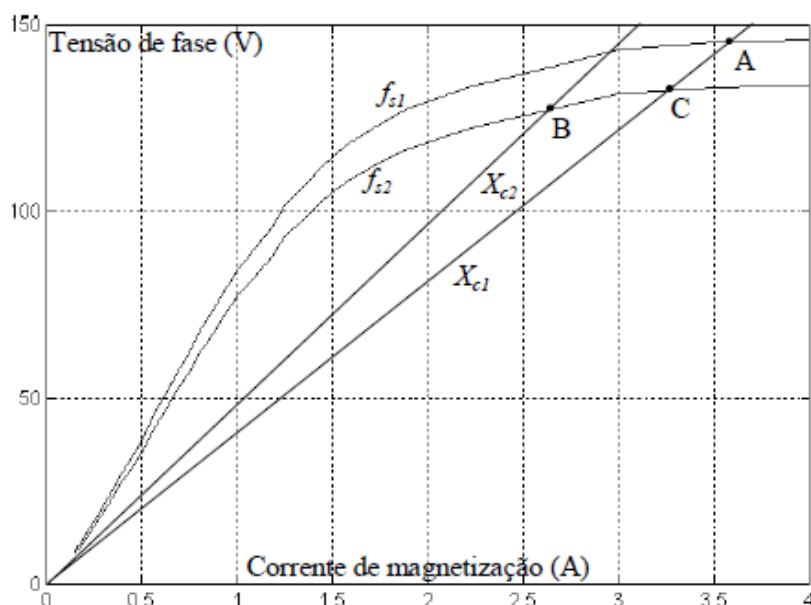
A figura 20 ilustra qualitativamente uma situação em que o GI está alimentando uma carga com fator de potência unitário. O ponto 'A' é o ponto de operação estável, cujo produto do conjugado pela velocidade do rotor equivale à potência da carga CA, desconsiderando-se as perdas. A frequência síncrona (f_s) da força magnetomotriz (FMM) do estator é igual a f_{s1} no ponto 'A'.

Figura 20 – Comportamento do conjugado com a variação da velocidade para diferentes frequências síncronas [5]



O ponto 'A' na característica de conjugado da figura 21 corresponde ao ponto de operação estável 'A' na característica de magnetização do GI, apresentada na figura 21.

Figura 21 – Comportamento da curva de magnetização e da reatância capacitiva com a variação da frequência síncrona [5].



O aumento de potência ativa na carga CA provoca queda na frequência síncrona de f_{s1} para f_{s2} , produzindo assim elevações tanto na frequência de escorregamento do rotor quanto no conjugado desenvolvido pelo gerador. Assim, a potência gerada aumenta para satisfazer a nova demanda da carga CA, conduzindo ao novo ponto estável de operação do gerador (ponto 'B'). Observe que o regulador de velocidade mantém a velocidade do rotor sempre constante em regime permanente [5].

A queda na frequência síncrona para o valor f_{s2} reduz a tensão terminal do GI, apresentada na característica de magnetização da figura 21, na mesma proporção, considerando-se que o fluxo no entreferro é mantido constante. Além de alterar a curva característica de magnetização do gerador, a redução da frequência afeta a reatância capacitiva (X_c) do banco de capacitores, conforme descreve a equação 46. X_{c1} e X_{c2} correspondem às respectivas frequências f_{s1} e f_{s2} , na figura 21 [5].

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_s C_{ca}} \quad (46)$$

A capacitância C_{ca} pode ser elevada a fim de recuperar o valor inicial da reatância capacitiva (X_{c1}). No entanto, o ponto 'C' da curva de magnetização (figura 21) será o novo ponto de operação estável do gerador em lugar do ponto 'A', uma vez que a frequência

permanece com valor f_s . A queda na tensão terminal do GI é o efeito resultante do aumento da potência ativa da carga, como resultado da influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador e no valor da reatância capacitiva do banco [5].

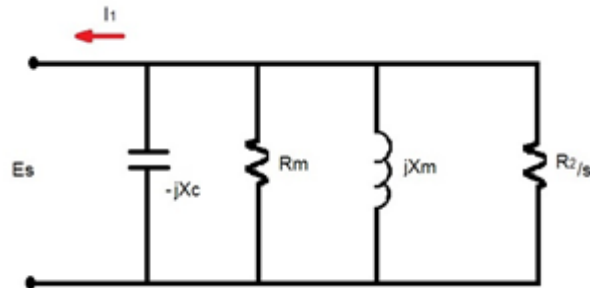
É importante ressaltar que as quedas de tensão nas resistências e indutâncias de dispersão do estator e do rotor do GI em operação isolada não são a causa principal de sua regulação de tensão insatisfatória. A regulação de tensão do GI é afetada principalmente pela influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador e pela dependência desta frequência com a potência ativa da carga CA. No caso ilustrado nas figuras 20 e 21, a variação da tensão terminal do gerador foi analisada exclusivamente sob influência da potência ativa. No entanto, a elevação da potência reativa da carga CA, bem como a queda de velocidade do rotor com o aumento do conjugado, podem ser fatores adicionais de deterioração da regulação de tensão do gerador [5]. Outro fator relevante a ser considerado para controlar a tensão de um GI isolado é a desmagnetização. Caso demanda por potência ativa aumente sem controle adequado do sistema, a corrente de magnetização pode assumir valores pequenos o suficiente para que o campo que mantém o vínculo entre rotor e estator deixe de existir, fazendo com que a tensão induzida se torne zero. Isso pode acontecer inclusive em transitórios, quando ao elevar bruscamente o valor da carga, mesmo que o sistema tenha condições de fornecer os reativos necessários, ocorre a desmagnetização do gerador. No entanto, esse fato torna o GI inerentemente protegido contra sobrecargas para um banco de capacitores fixo, pois sempre que a corrente de carga crescer demais faltará corrente de campo, fazendo a desmagnetização eliminar a alimentação da carga [1] [5].

4.3.3 Efeito da variação da velocidade da máquina motriz

A fim de obter as variações que devem ser impostas na velocidade do acionamento primário para manter a tensão de saída constante sob variação de carga, avalia-se o circuito equivalente do gerador de indução excitado por capacitores da figura abaixo. O modelo da figura 22 foi simplificado ao desconsiderar a resistência R_1 dos enrolamentos do estator e ambas as reatâncias de dispersão do rotor X_2 e do estator X_1 . Isso é aceitável, pois nesse caso a resistência do rotor R_2/s é muito grande em relação à X_2 e a impedância do ramo de

magnetização é muito maior que a impedância do estator. Inicialmente, imagina-se que o gerador está a vazio, e que a tensão terminal é igual à tensão induzida [16].

Figura 22 – Modelo do gerador excitado exclusivamente por capacitores



A admitância equivalente do circuito acima é zero, pois não existe fluxo de corrente do gerador para a carga. Portanto,

$$\left(\frac{1}{R_m} + \frac{s}{R_2}\right) + \left(j\omega C - \frac{1}{\omega L_m}\right) = 0 \quad (47)$$

Separando as parte real e a parte imaginaria dessa expressão, obtém-se:

$$s = -\frac{R_2}{R_m} \quad (48)$$

$$\omega = 2\pi f_e = \sqrt{\frac{1}{L_m C}} \quad (49)$$

Claramente, o escorregamento s é baixo, pois R_m é muito maior que R_2 para uma máquina de indução típica. A excitação do GI corresponde à ressonância entre o capacitor e a indutância de magnetização L_m . Se ω_r é a velocidade angular do rotor (rad/s) e p o número de polos da máquina, o escorregamento pode ser definido alternativamente como:

$$s = 1 - \frac{\omega_r}{(2/p)\omega} \quad (50)$$

Onde ω é a frequência gerada. Unindo a equação acima as equações 48 e 49, a velocidade angular do rotor pode ser escrita como uma função dos parâmetros do circuito equivalente [16]:

$$\omega_r = \left(1 + \frac{R_2}{R_m}\right) \frac{2}{p} \sqrt{\frac{1}{L_m C}} \quad (51)$$

O mesmo pode ser demonstrado ao incluirmos uma carga resistiva R_{carga} nos terminais do circuito equivalente do GI da figura 22. O resultado é expresso pela equação abaixo [16]:

$$\omega_r = \left[1 + \frac{R_2}{R_m} \left(\frac{R_m + R_{carga}}{R_{carga}}\right)\right] \frac{2}{p} \sqrt{\frac{1}{L_m C}} = \left[1 + \frac{R_2}{R_m} \left(\frac{R_m + R_{carga}}{R_{carga}}\right)\right] \frac{2}{p} (2\pi f_e) \quad (52)$$

Pode-se então, escrever a frequência elétrica em função da velocidade angular do rotor.

$$f_e = \frac{\omega_r}{\frac{4\pi}{p} \left[1 + \frac{R_2}{R_m} \left(\frac{R_m + R_{carga}}{R_{carga}}\right)\right]} \approx \frac{\omega_r}{\frac{4\pi}{p} \left[1 + \frac{R_2}{R_m}\right]} \quad (53)$$

Diminuindo-se o valor de R_{carga} na equação 53 (aumento de carga), verifica-se que a segunda parcela do denominador tende a aumentar. A consequência disso é uma queda no valor da frequência.

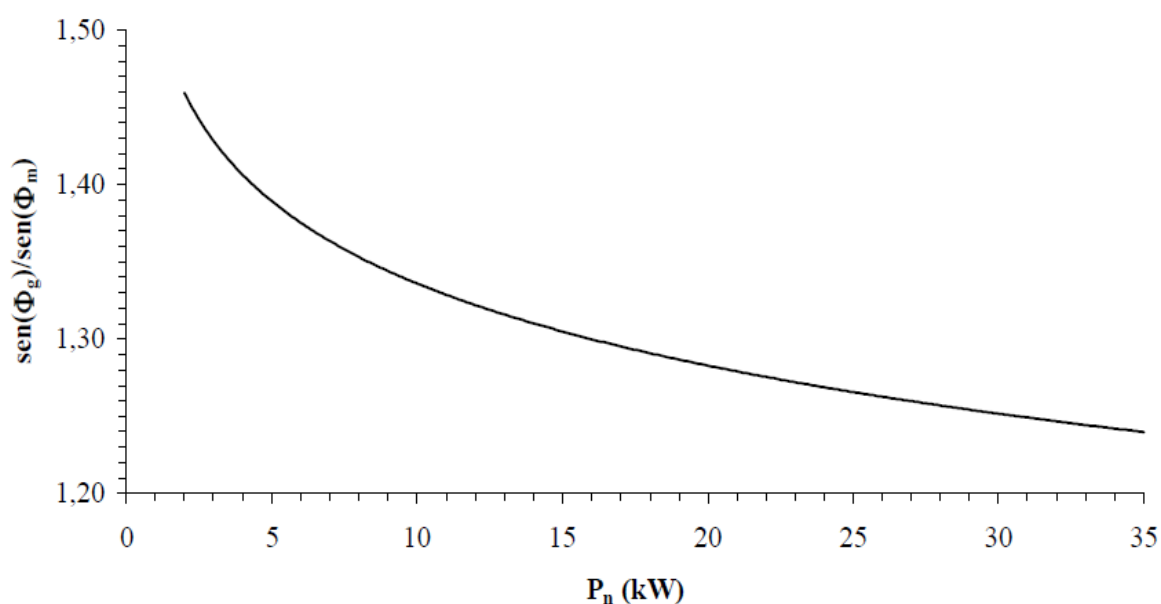
A influência da velocidade justifica-se pelo fato de alterar a frequência, e, conseqüentemente, a curva de magnetização da máquina. De acordo com a referência [2] existe uma velocidade mínima, abaixo da qual, a máquina não inicia a autoexcitação. Também mostram que, quanto menor for a velocidade de rotação, maior será a capacitância necessária para excitar o gerador. Portanto, trabalhar com baixas rotações não é conveniente, já que, aumenta-se a necessidade de magnetização, e, conseqüentemente, a potência reativa na máquina, aumentando-se dessa forma, as perdas por efeito Joule, devido ao aumento da corrente de excitação do gerador. Por outro lado, isto também reflete na capacidade de fornecimento de potência ativa para uma carga qualquer, visto que,

quanto maior a potência reativa, menor será a potência ativa, pois a capacidade nominal do motor depende da potência aparente.

4.3.4 Determinação da capacitância para excitação

Após determinar qual a máquina de indução que será utilizada para gerar energia isoladamente de acordo com a referência [1], deve-se calcular a capacitância necessária para promover excitação. É importante salientar que o método foi proposto para máquinas de quatro polos e 50 Hz, mas mostrou-se satisfatório para a máquina utilizada neste trabalho, cuja frequência era de 60 Hz. Conhecida a potência nominal da máquina, determina-se a relação $\text{sen}(\phi_g)/\text{sen}(\phi_m)$ da figura 23, que foi obtida experimentalmente para máquinas de 50Hz [2].

Figura 23 – Razão entre seno do argumento no modo gerador e seno do argumento no modo motor [2].



Conhecida esta relação, calcula-se a potência elétrica do motor de indução, utilizando a equação a seguir:

$$P_{elm} = \frac{P_n}{\eta_m} \quad (54)$$

Onde: P_{elm} = potência elétrica absorvida pelo motor de indução [kW];

P_n = potência nominal do motor [kW];

η_m = rendimento do motor a plena carga [1].

Então, calcula-se a potência reativa absorvida pelo motor de indução através da equação:

$$Q_m = P_{elm} \tan \varphi_g \quad (55)$$

Onde: Q_m = potência reativa absorvida pela máquina operando como motor [kVAr];

φ_m = ângulo de fase do motor, que pode ser determinado com base no fator de potência [°];

P_{elm} = potência elétrica absorvida pela máquina operando como motor [kW].

A potência reativa necessária para excitar a máquina quando estiver operando como gerador pode ser calculada pela equação

$$Q_g = \frac{\text{sen } \varphi_g}{\text{sen } \varphi_m} Q_m \quad (56)$$

Onde: Q_g = Potência reativa necessária para promover excitação

$\frac{\text{sen } \varphi_g}{\text{sen } \varphi_m}$ = relação experimental da figura 24 [1];

Q_m = energia reativa absorvida pela máquina operando como motor [kVAr].

Assim, para um banco de capacitores ligado em triângulo, a capacitância necessária à autoexcitação do gerador operando a plena carga, poderá ser determinada através da equação [2].

$$C = \frac{Q_g}{3V^2(2\pi f_e)} 10^9 \quad (57)$$

Onde: C = capacitância necessária à autoexcitação do gerador [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

Q_g = Potência reativa necessária à autoexcitação do gerador [kVAr];

V = tensão de linha [V];

f = frequência [Hz].

A frequência da equação acima deve ser igual a 50 Hz, pois, como foi informado antes, a curva da figura 24 foi obtida experimentalmente, para máquinas de quatro polos e 50 Hz. Determinada a capacitância nesta frequência, ajusta-se seu valor para f = 60 Hz, através da equação 58.

$$C_{60} = C_{50} \left(\frac{50}{60} \right)^2 \quad (58)$$

Onde: C60 = capacitância a 60 Hz [μ F/fase];

C50 = capacitância a 50 Hz [μ F/fase].

4.3.5 Potência e rendimento

A potência elétrica gerada pela máquina de indução pode ser calculada pela equação a seguir [1]:

$$P_{elg} = \frac{\cos \varphi_g}{\eta_m \cos \varphi_m} P_n \quad (59)$$

Onde: P_{elg} = potência elétrica gerada pela máquina de indução [kW];

$\cos \varphi_g$ = fator de potência do gerador de indução [1];

$\cos(\varphi_m)$ = fator de potência do motor de indução [1];

P_n = potência nominal do motor de indução [kW].

O fator de potência do gerador de indução pode ser calculado em função da relação $\sin \varphi_g / \sin \varphi_m$ determinada através da figura 24. Calculada a potência elétrica do gerador, calcula-se a potência de eixo necessária para acionar a máquina de indução, através da equação abaixo.

$$P_{mec} = P_{elg} + P_n \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (60)$$

Onde: P_{mec} = potência de eixo do gerador [kW];

O rendimento do gerador de indução, operando isoladamente, é calculado através de:

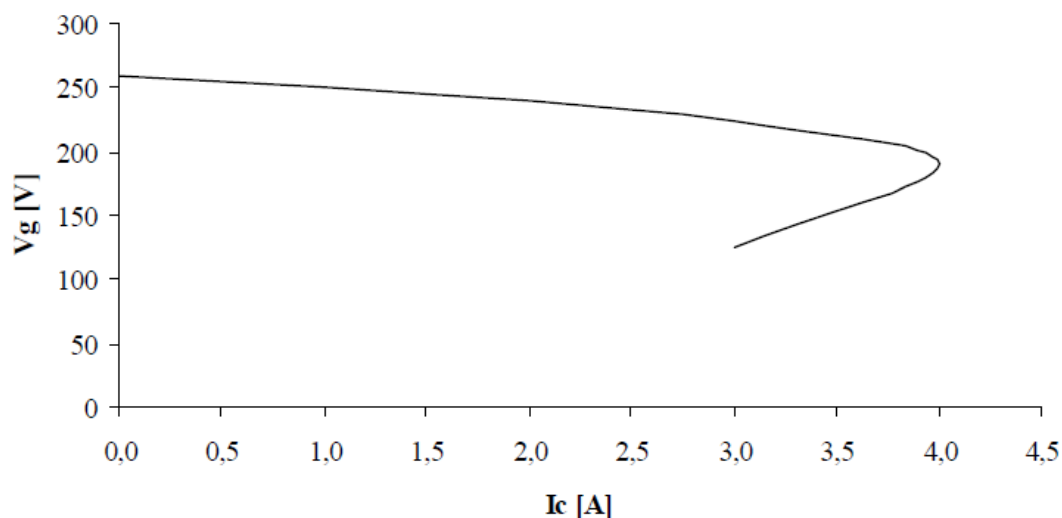
$$\eta_g = \frac{P_{elg}}{P_{mec}} \quad (61)$$

É de fundamental importância não escolher motores “saturados”, para ambos os modos de operação (geração isolada e interligada). Isso se faz através da escolha de motores que tenham baixa resistência rotórica, ou seja, aqueles que apresentam o menor escorregamento a plena carga. Uma alta resistência rotórica está presente em motores de maior conjugado, conseqüentemente, eles drenam mais potência reativa da rede para manter o vínculo entre os campos do rotor e do estator mesmo com grandes cargas. Esse fato é ruim para geradores de indução, que naturalmente são maiores consumidores de reativos, tendo direto impacto no rendimento do gerador.

4.4 REGULAÇÃO DE TENSÃO NO GERADOR DE INDUÇÃO

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

Figura 24 – Curva característica do comportamento da tensão em função do aumento de carga em um gerador de indução isolado [2]



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

I_c = corrente da carga [A].

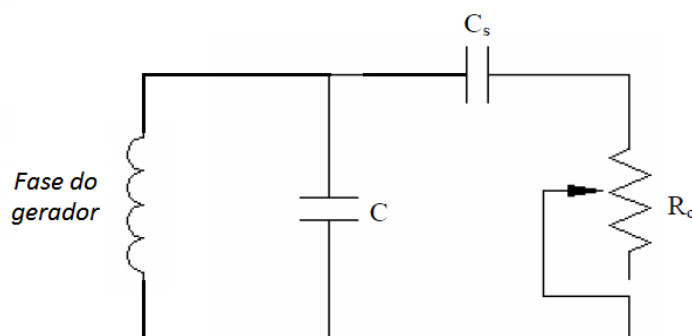
A figura 24 mostra que a tensão do gerador decresce conforme a carga aumenta. Isto é justificado no item 4.3.2, onde se trata sobre o problema de regulação de tensão no GI.

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

4.4.1 Regulação por capacitor em série

Consiste na inserção de um capacitor em série com a carga conforme mostra a figura 25 [17].

Figura 25 – Método do capacitor em série



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

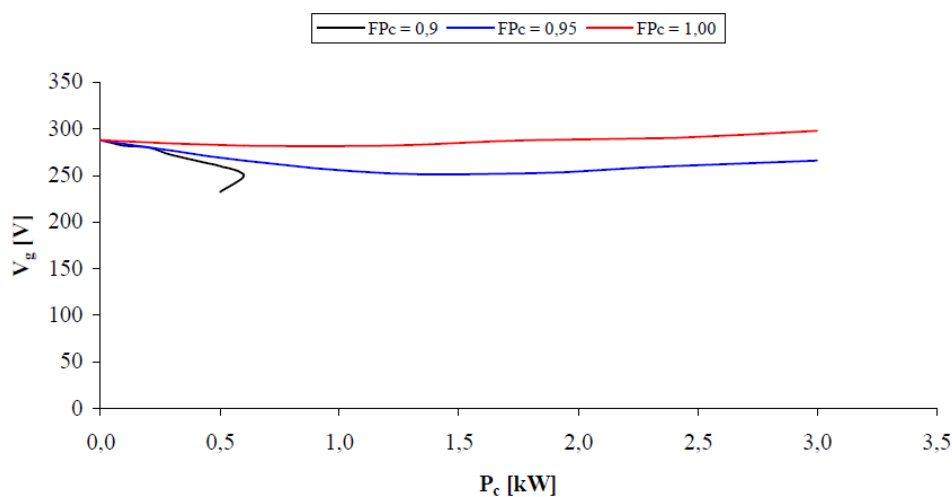
C_s = capacitor série [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

R_c = resistência da carga [Ω/fase].

Do item 4.3.4, sabe-se que o capacitor C é aquele que promoverá a excitação da máquina. Porém, na carga inclusão de carga, a capacitância equivalente vista dos terminais do gerador é dada pela soma das capacitâncias C e C_s . Portanto, quanto maior for o valor da carga nos terminais do gerador de indução, maior será a capacitância vista pelos terminais do gerador de indução. Conseqüentemente, um aumento na capacitância causa um aumento na tensão terminal da máquina. Logo, as quedas de tensão internas devido às perdas nos circuitos do estator e do rotor, podem ser compensadas pelo aumento na tensão devido ao capacitor série.

Os trabalhos das referências [18] e [19] mostram que esta técnica de regulação é razoável para cargas resistivas, porém insatisfatório para cargas indutivas, onde o fator de potência varia como pode ser visualizado na figura 26 abaixo.

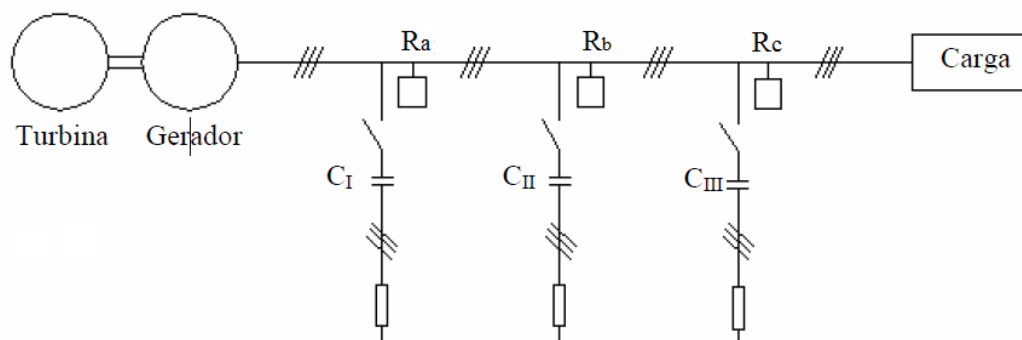
Figura 26 – Resultados de regulação para regulação por capacitor em série [2]



4.4.2 Regulação por capacitores chaveados

Este método consiste no chaveamento de capacitores a medida que a necessidade de excitação do gerador e de energia reativa da carga aumentam. A figura 27 mostra um esquema utilizando capacitores conectados em paralelo com o gerador [1].

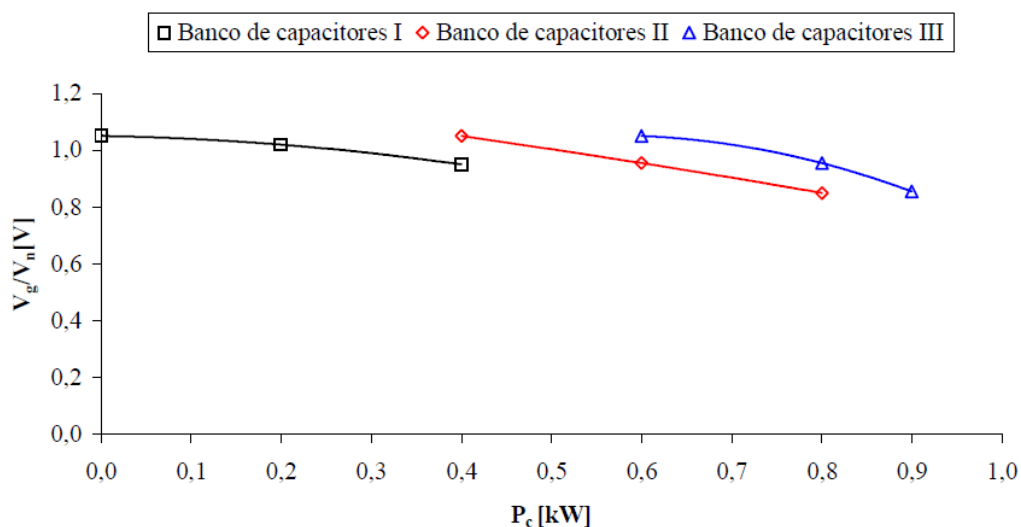
Figura 27 – Regulação por chaveamento de capacitores [2]



À medida que a carga aumenta ou diminui, os bancos de capacitores **CI**, **CII** e **CIII** são inseridos ou retirados do circuito, através dos relés **Ra**, **Rcb** e **Rc** que monitoram a tensão, a fim de atender às necessidades de magnetização tanto do gerador como da carga e manter a tensão dentro de limites considerados satisfatórios. Um resultado típico da variação de tensão em função da carga acoplada aos terminais do gerador utilizando este método está na figura 28.

Uma desvantagem da regulação por chaveamento é que o sistema de controle responsável pela inclusão e retirada dos capacitores deve ser robusto o suficiente para que em uma súbita mudança de carga não ocorra sobre tensão ou desmagnetização do gerador. Além disso, tanto para o método de capacitor em série quanto o método de chaveamento, se não houver correção de velocidade da máquina motriz acontece sub ou sobre frequência.

Figura 28 – Resultados da regulação por chaveamento de capacitores [2]

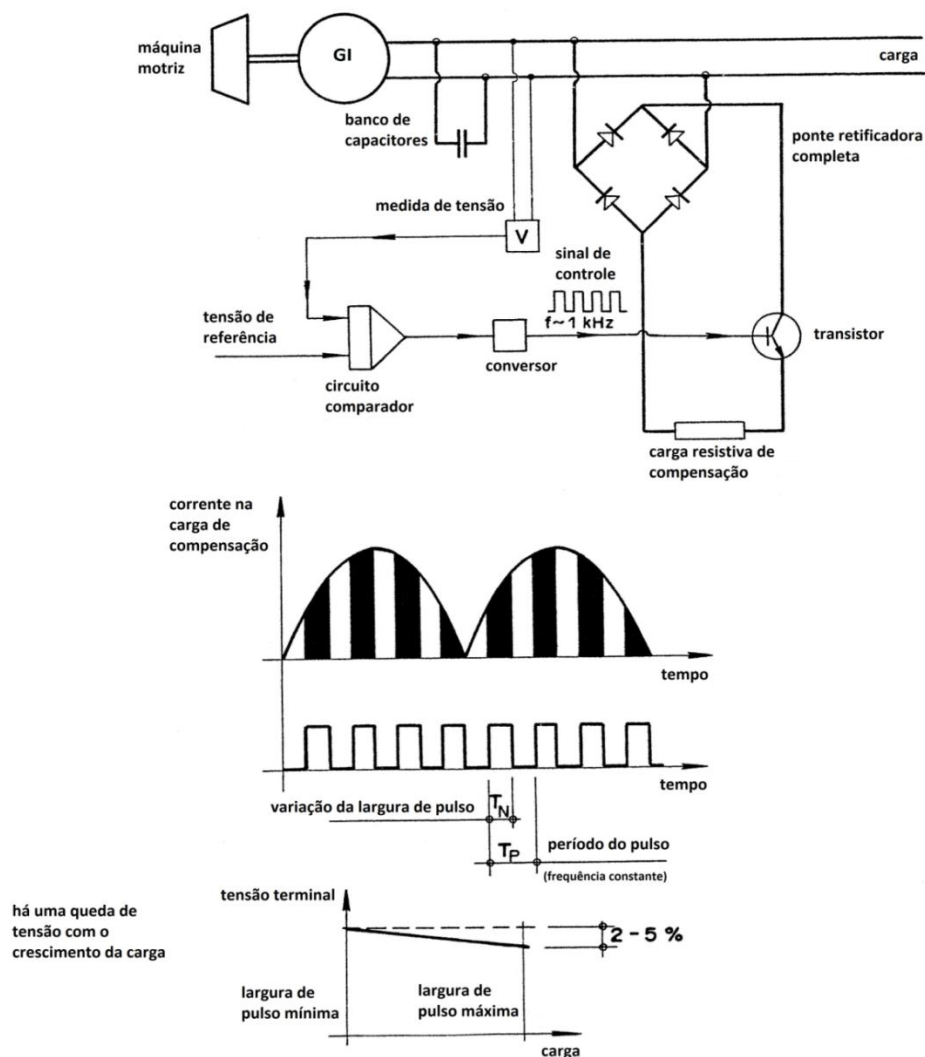


4.4.3 Regulação por controle de fluxo de potência ativa

Nesse método, o gerador trabalha fornecendo um valor fixo de potência ativa, pois o sistema de controle trabalha para manter a resistência equivalente da carga constante. Desta forma a máquina sempre opera no seu ponto nominal de funcionamento, considerando que a potência reativa não varie, e que o banco de capacitores foi previamente dimensionado para fornecer os reativos necessários para o gerador e para a carga. Portanto, a variação de potência reativa só pode ser compensada pela mudança da velocidade do acionamento e, conseqüentemente, na frequência gerada (alteração da curva de magnetização).

Com este método é possível manter a rotação da máquina constante, pois mesmo que a demanda por potência ativa não esteja no valor máximo possível, o controle faz com que o gerador “enxergue” sempre a mesma carga [2]. Isso só é possível implantando uma carga de compensação e um controle que compare a tensão de saída com uma tensão de referência, gerando um sinal de modulação por largura de pulso (PWM) que faz com a potência na carga P_{carga} mais a potência na compensação P_{comp} ser igual em todos os instantes. Um esquemático para melhor compreensão do método está na figura 29 abaixo.

Figura 29 – Regulação por controle de fluxo de potência ativa [1]



Pode-se citar como vantagens desse método:

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

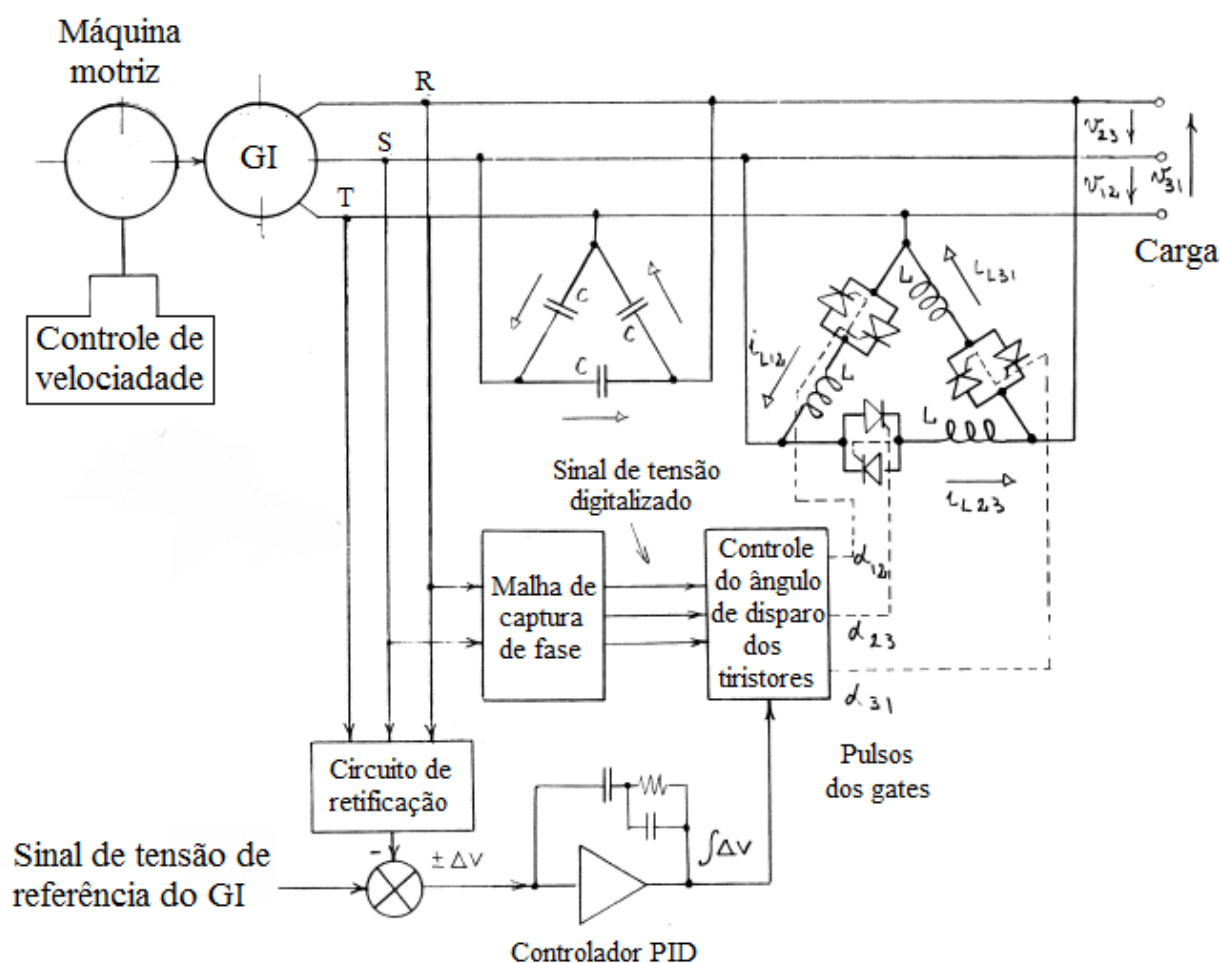
4.4.4 Regulação por controle de fluxo de potência reativa

Consiste na utilização de indutores controlados por meio de tiristores e de capacitores. Os capacitores mostrados na figura 30 têm a finalidade de alimentar o gerador

de indução e as cargas indutivas, tais como motores, com potência reativa. Quando há variação na carga, como por exemplo, o desligamento de um motor, a tensão tende a crescer, pois há excesso de potência reativa circulando pelo circuito. É neste momento que tiristores atuam, simulando a inserção de indutores no sistema, cuja finalidade é drenar a potência reativa excedente gerada pelo banco de capacitores. Este excedente é controlado por meio da ponte de tiristores que controla a quantidade necessária de potência reativa para manter a tensão no valor desejado.

O esquemático da figura 30 também é conhecido como fonte estática de compensação de reativos. Segundo os autores, possíveis aplicações desse tipo de sistema incluem fornecimento de energia para áreas rurais e para grandes equipamentos de terraplanagem, além de sua inclusão no contexto de turbinas eólicas de alta velocidade [20].

Figura 30 – Esquemático para regulação de tensão por chaveamento de tiristores [20]



4.4.5 Regulação por inversor de frequência

O inversor de frequência possibilita a melhoria do comportamento do sistema de geração isolada não apenas em relação à regulação de tensão, mas também estabilização da frequência e compensação da potência reativa. A estratégia de operação do sistema consiste em fixar a frequência síncrona do gerador de indução através do inversor PWM. Para obter balanço de potência e regulação de tensão do gerador, os autores apresentaram duas alternativas: através da regulação da velocidade do rotor; ou enviando-se parte da energia acumulada no lado CC do inversor para rede através de linha monofásica, caso a velocidade do rotor não seja regulada e exista disponibilidade de conexão monofásica à rede. Segundo os autores, os resultados obtidos demonstram que o sistema é estável, robusto e capaz de gerar tensões trifásicas reguladas [5].

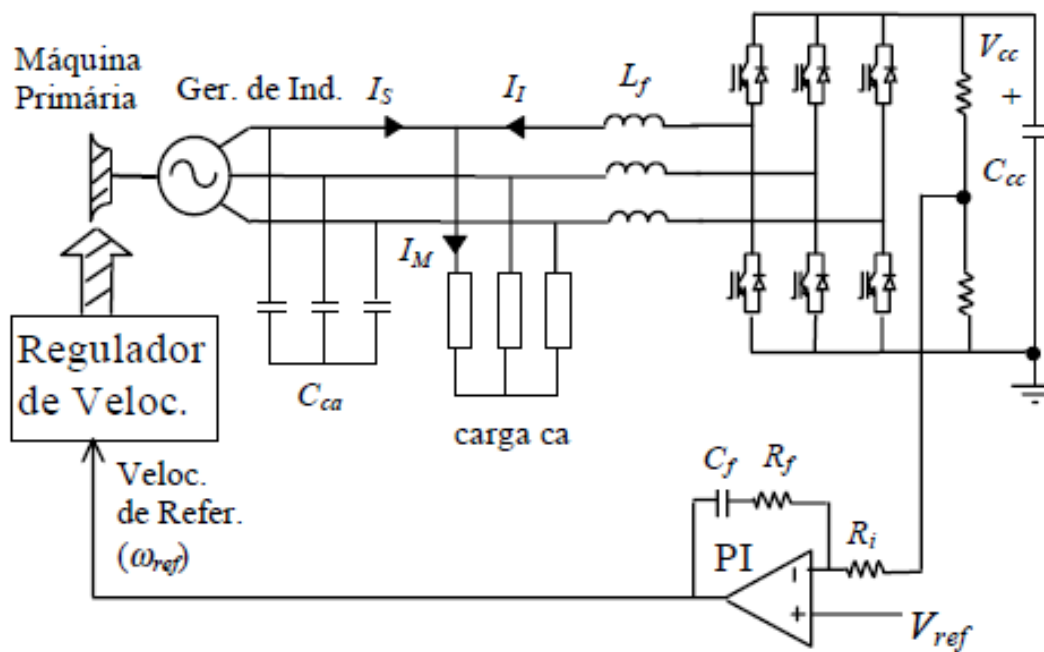
- Sistema com controle de velocidade

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

- Sistema sem controle de velocidade

Similar ao método de controle do fluxo de potência ativa, uma vez que a ausência de regulador de velocidade não permite o controle do valor da potência elétrica gerada. Neste caso o excedente da energia gerada, não consumida pela carga CA, pode ser enviado à rede através de uma linha monofásica. Esta configuração pode ser aplicada em propriedades rurais atendidas por linhas monofásicas, e com disponibilidade hídrica para geração de energia. Na ausência da rede, a energia excedente pode ainda ser consumida por cargas auxiliares ajustáveis no lado CC ou CA do inversor [5].

Figura 31 – Sistema de regulação por inversor com velocidade controlada [5]



5. Modelagem e Simulações

A fim de levantar os parâmetros da máquina de indução, ensaios podem ser realizados para que a partir de seus resultados seja possível calcular as reatâncias e resistências do modelo da figura 15. Geralmente os ensaios realizados são [7]:

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

No entanto, apenas os três primeiros desses ensaios são realmente necessários para obter um circuito equivalente que represente razoavelmente bem a realidade. A medida que é necessário maior exatidão dos resultados, além da utilização de instrumentos mais precisos, é necessário realizar também o ensaio a velocidade síncrona.

Esse trabalho visa à comparação de resultados provenientes do modelo da máquina com medições das grandezas eletromecânicas da máquina funcionando como gerador apresentados no capítulo 6. A metodologia adotada para realização dos cálculos desse capítulo se encontra na referência [6].

Os resultados práticos desse trabalho foram desenvolvidos utilizando uma máquina de indução da fabricante Voges Metalurgia Ltda., que é uma empresa gaúcha com sede na cidade de Caxias do Sul. Abaixo, tem-se uma imagem do motor utilizado, seguido de uma tabela com seus dados de placa.

Figura 32 – Motor de indução trifásico Voges, modelo VTOP 90L, 4 Polos, 2,2 KW



Tabela 32 – Dada de placa do motor utilizado para os ensaios

DADOS DE PLACA DA MÁQUINA					
3 CV	2,2 Kw		60 HZ		1715 rpm
Ip/In. 7,2	ISOL. F	CAT. N	REG. S1	IP. 55	F.S. 1,15
RENDIMENTO. 85.0			COS ϕ 0,84		
<p style="text-align: center;">220 V - 8,1 A</p>			<p style="text-align: center;">380 V - 4,7 A</p>		

As medições das grandezas elétricas necessárias para calcular os parâmetros do modelo e os ensaios de geração interligada, foram feitas com os seguintes instrumentos.

➔ Medidor digital de tensão, corrente, potência ativa e reativa.

- Fabricante: Yokogawa
- Tipo: Digital Power Meter
- Modelo: WT1030M
- Resolução: 16 bits

→ Tacômetro

- Fabricante: Minipa
- Faixas: 0.5 a 19999 RPM (contato)
- Precisão: RPM $\pm(0.05\%Leit. + 1Díg)$
- Resolução: 0.1 RPM (<1000 RPM)

→ Torquímetro

- Fabricante: HBM
- Torque nominal: 50 N.m
- Incerteza: ± 2 N.m

→ Multímetro digital

- Fabricante: Hewlett Packard
- Modelo: 3478a
- Resolução: $300\mu\Omega$ (escala 30 ohms)

5.1 ENSAIO A VAZIO

O ensaio a vazio de um motor de indução mede as perdas rotacionais do motor e fornece informações sobre sua corrente de magnetização. O esquemático das conexões realizadas em laboratório para realizar esse ensaio está na figura 33. Um wattímetro, um voltímetro e um amperímetro (todos do instrumento WT1030M), foram conectados em cada fase motor Voges. Ligado a vazio, as perdas por atrito e ventilação são a única carga do motor. Desse modo, toda a potência convertida para a forma mecânica desse motor é consumida por perdas mecânicas e o escorregamento do motor é muito pequeno (possivelmente tão baixo quanto 0,001 ou menos). Nesse caso, a impedância total do circuito é praticamente igual à soma das reatâncias do ramo de magnetização e do estator, resultando da reatância a vazio. Usualmente, o fator de potência a vazio é pequeno o suficiente para descobrir a reatância a vazio pela equação 62: [6]

$$X_{vz} = \frac{E_{S,vz}}{I_{1,vz}} \quad (62)$$

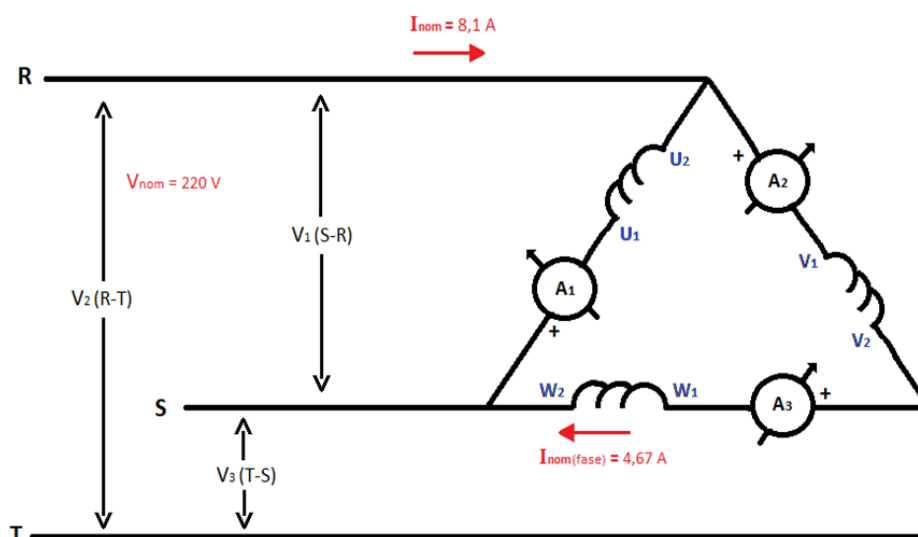
No entanto, tendo acesso a medidas de potência, a reatância a vazio por fase é dada por:

$$X_{vz} = \frac{Q_{vz}/fase}{(I_{1,vz})^2} \quad (63)$$

Onde: Q_{vz} = potência reativa medida ou calculada a partir da medida de potência ativa

$I_{1,vz}$ = corrente eficaz absorvida pelo motor nessa condição.

Figura 33 – Conexão dos ensaios a vazio



A tabela 10 contém os valores de todas as medidas realizadas no ensaio. Nota-se que a obtenção dos resultados é proveniente dos amperímetros conectados em série com os enrolamentos do estator e uma média aritmética das medidas de cada fase é tomada como referência para futuros cálculos, devido ao desequilíbrio entre as potências medidas nos ensaios de rotina.

Tabela 10 – Resultados do ensaio a vazio

ENSAIO A VAZIO							
Enrolamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Pativa (W)	Paparente (VA)	Preativa (VAR)	FP	Ângulo entre tensão e corrente
U1-U2	1,91	220,08	20,7	420,5	420	0,05	87,18
V1-V2	1,99	222,45	43,3	443,3	441,2	0,1	84,4
W1-W2	1,91	219,98	65,6	419,1	414	0,16	81
Média	1,937	220,837	43,200	427,633	425,067	0,103	84,193

Onde FP é o fator de potência da fase e DEG é o módulo do ângulo entre a tensão e a corrente na fase.

5.2 ENSAIO A ROTOR BLOQUEADO

Para executar esse teste, o rotor é travado e uma tensão CA variável é aplicada ao estator até que a corrente absorvida seja igual a nominal. Assim, o escorregamento é igual a 1 e o circuito do rotor tem impedância $R_2 + jX_2$, passando quase totalidade da corrente absorvida através dela. É do conhecimento da impedância total do circuito equivalente nessas condições que se pode calcular os parâmetros R_2 e X_2 do modelo obtido no capítulo 3. A reatância X_{bl} e a resistência R_{bl} na condição de escorregamento igual a 1 são dadas por [6]:

$$X_{bl} = \frac{Q_{bl}/fase}{I_{1,bl}^2} \quad (64)$$

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{I_{1,bl}^2} \quad (65)$$

Onde Q_{bl} , P_{bl} e $I_{1,vz}$ são, respectivamente, a potência reativa, a potência ativa e a corrente absorvida pelo motor para a condição de rotor bloqueado.

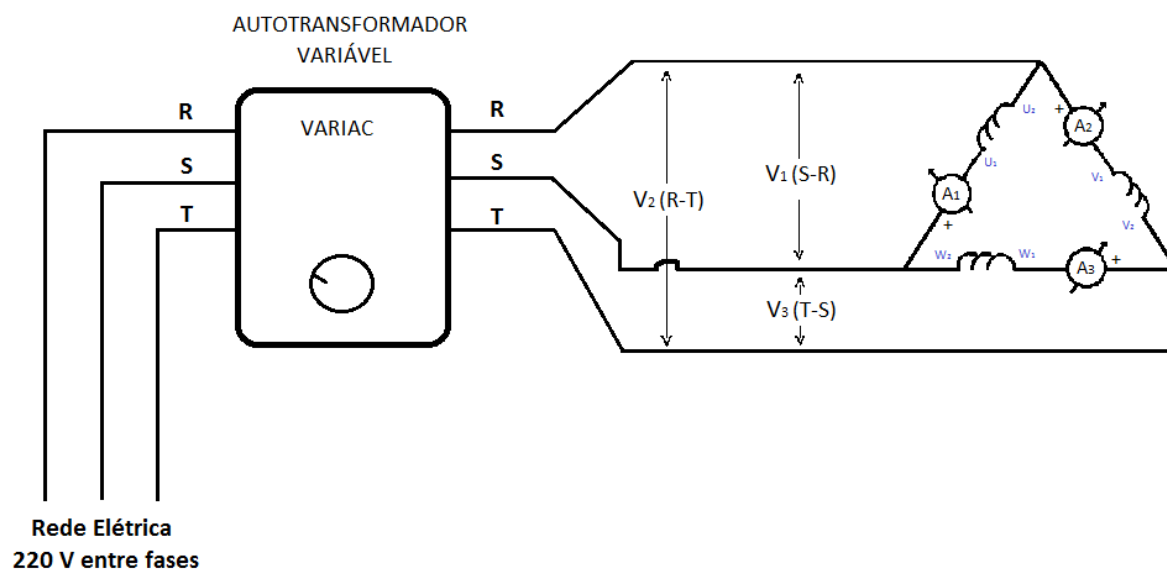
A tabela 11 é o resultado deste ensaio, cujo esquemático de montagem está representado na figura 34.

Tabela 11 – Resultados do ensaio a rotor bloqueado

ROTOR BLOQUEADO							
Enrolamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Pativa (W)	Paparente (VA)	Preativa (VAR)	FP	Ângulo entre tensão e corrente
U1-U2	4,72	47,08	109,3	222,4	193,7	0,49	60,57
V1-V2	4,9	47,52	115,6	233	202,3	0,5	60,26
W1-W2	4,74	47,67	111,9	225,8	196,2	0,5	60,31
Média	4,787	47,423	112,267	227,067	197,400	0,497	60,380

Utilizou-se um transformador de saída em tensão variável (Variac) para conseguir o valor de corrente mais próximo ao valor nominal da máquina de indução.

Figura 34 – Montagem do ensaio a rotor bloqueado



5.3 ENSAIO A VELOCIDADE SÍNCRONA E MEDIDA DE RESISTÊNCIA DO ESTATOR

Através de uma máquina motriz, coloca-se a máquina de ensaio na velocidade síncrona ($s=0$) com a intenção de desconectar a impedância do rotor do circuito equivalente ao roto.

Desta forma, não há potência transferida através do entreferro da máquina, logo, a potência ativa medida é a soma das perdas ôhmicas estatóricas mais as perdas no núcleo do estator. Os resultados obtidos pelo ensaio são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultado dos ensaios a velocidade síncrona

VELOCIDADE SÍNCRONA							
Enrolamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Pativa (W)	Paparente (VA)	Preativa (VAR)	FP	DEG
U1-U2	1,92	220,82	15,3	424,2	423,9	0,04	97,93
V1-V2	2	223,29	34,7	447,2	445,8	0,08	85,55
W1-W2	1,92	220,99	61,1	424,4	420	0,14	81,73
Média	1,947	221,700	37,033	431,933	429,900	0,087	88,403

A fim de realizar a medida de R1 mais próximo da temperatura de operação, após ter atingido a corrente nominal no ensaio a rotor bloqueado, mediu-se a resistência do estator com o multímetro digital da Hewlett Packard listado anteriormente. Realizaram-se três medidas para cada fase do motor e ao fim se calculou a média. Os resultados estão a seguir.

Tabela 13 – Medidas de resistência do estator

	Enrolamento U1-U2	Enrolamento V1-V2	Enrolamento W1-W2	R1 (Ω)
Medida 1	2,4289	2,4375	2,432	2,433
Medida 2	2,4299	2,4369	2,4338	2,434
Medida 3	2,4302	2,4363	2,4341	2,434
Média	2,430	2,437	2,433	2,433

5.4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO

O primeiro passo é calcular o total de perdas a vazio $P_{rot+fe+sup}$ pela equação 66, através do valor medido R1 [7] [6].

$$P_{rot+fe+sup} = P_{vz} + I_{1,vz}^2 R_1 \quad (66)$$

De acordo com a norma IEEE 112, o motor com conjugado e corrente de partida normais apresenta reatâncias de dispersão X_1 e X_2 de mesmo valor, pertencendo então à classe A. Então, os valores das reatâncias são calculadas da seguinte forma:

$$X_2 = (X_{bl} - X_1) \left(\frac{X_{vz} - X_1}{X_{vz} - X_{bl}} \right) \quad (67)$$

Tendo o valor de X_1 (igual a X_2 , para esse caso), calcula-se a reatância de magnetização:

$$X_m = X_{vz} - X_1 \quad (68)$$

A referência [6] utilizada para essa etapa do trabalho, conclui que o parâmetro R_2 é dado por

$$R_2 = (R_{bl} - R_1) \left(\frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2 \quad (69)$$

Onde: R_2 = resistência monofásica calculada e relacionada ao circuito do rotor [Ω];

X_2 = reatância monofásica calculada e relacionada ao circuito do rotor [Ω];

X_m = reatância do ramo de magnetização monofásica calculada [Ω];

R_1 = resistência estatórica média das três fases.

Para obter o parâmetro que representa as perdas no núcleo R_{fe} , é necessário ter medido a potência ativa consumida no ensaio a velocidade síncrona.

$$P_{fe} = P_{vs} + I_{1,vs}^2 R_1 \quad (70)$$

Na equação acima, P_{fe} representa as perdas no núcleo do estator por fase [W], P_{vs} é a potência ativa monofásica medida no ensaio a velocidade síncrona [W], $I_{1,vs}$ é a corrente eficaz de fase monofásica medida no ensaio a velocidade síncrona [A].

Segundo a referência [7], após obter P_{fe} é possível calcular o parâmetro R_{fe} pela equação:

$$R_{fe} = \frac{\frac{X_m^2}{P_{fe}} + \sqrt{\left(\frac{X_m^2 I_{vs}^2}{P_{fe}}\right)^2 - 4X_m^2}}{2} \quad (71)$$

O resultado das equações 66 até 71 estão colocados na sequência de tabelas a seguir;

Tabela 14 – Resultado dos cálculos de perdas

Enrolamento	Pfe	Prot+fe+sup
U1-U2	6,332	11,835
V1-V2	24,966	33,677
W1-W2	52,129	56,735
Média	83,427	102,247

Tabela 15 – Resultados dos cálculos de reatância do circuito equivalente

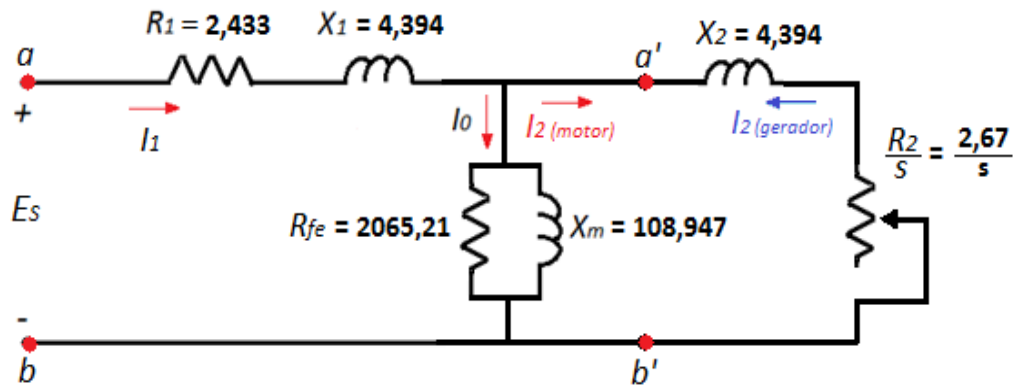
Enrolamento	X2=X1	Xm
U1-U2	4,433	110,696
V1-V2	4,296	107,116
W1-W2	4,454	109,030
Média	4,394	108,947

Tabela 16 – Resultado dos cálculos para as resistências do circuito equivalente

Enrolamento	R2	Rfe
U1-U2	2,675	4532,996
V1-V2	2,576	1142,679
W1-W2	2,759	519,959
Média	2,670	2065,211

A figura 35 é o modelo encontrado para representar a máquina Voges utilizada nos ensaios do Capítulo 6.

Figura 35 – Circuito equivalente resultante da máquina Voges VTop



5.5 SIMULAÇÕES

A fim de prever o comportamento da máquina para operação interligada em regime permanente, utilizaram-se os parâmetros calculados indicados na figura 35 para implementar um código em MATLAB, sendo que o produto desse código são os gráficos para os resultados teóricos das equações apresentadas no Capítulo 4. Como as simulações são feitas para um motor de quatro polos, sabe-se que a transição de modo motor para gerador acontece ao passar de 1800 RPM. Todos os resultados são uma função da variação da velocidade, sendo que para as que são maiores que 1800 RPM, o código abaixo passa a considerar as equações de modo gerador.

```
clc
clear
```

```
% Parâmetros da máquina
```

```
Vt = 220;
nf = 3;
polos = 4;
fe = 60;
%-----
R1 = 2.433;
X1 = 4.394;
X2 = 4.394;
Xm = 108.947;
Rfe = 2065.11;
R2 = 2.670;
```

```
% Cálculo da velocidade síncrona
```

```
omegas = 4*pi*fe/polos;
ns = 120*fe/polos;
```

```
% Thévenin (análise modo motor)
```

```
Z1eq = (j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))*(R1+j*X1)/(R1+j*X1+(j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm)));
R1eq = real(Z1eq);
X1eq = imag(Z1eq);
```

```
Vteq = abs(Vt*(j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))/(R1+j*X1+(j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))));
```

```
% Laço de escorregamento
```

```
s = [-1:0.005:2];
```

```
for n = 1:601
```

```
% Velocidade mecânica
```

```
rpm(n) = ns*(1-s(n));
```

```
% Corrente do equivalente
```

```
I2 = abs(Vteq/(Z1eq + j*X2 + R2/s(n)));
```

```
% Conjugado e Potência mecânica (modo motor)
```

```
Tmec(n) = nf*I2^2*R2/(s(n)*omegas);
```

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

```
% Impedância equivalente do motor
```

```
Zgap = ((j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm)*(j*X2+R2/s(n)))/((j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))+(j*X2+R2/s(n))));
```

```
%Zgap = j*Xm*(j*X2+R2/s(n))/(R2/s(n)+j*(Xm+X2));
```

```
%Zgap = (((j*Xm)*(j*X2)+R2/s(n)))/((j*(Xm+X2))+R2/s(n));
```

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

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

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

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

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

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

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

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

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

```
% Potência ativa e reativa de entrada (modo motor)
```

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

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

```
% Rendimento motor
```

```
rend(n) = ((nf*I2^2*R2*(1-s(n))/s(n))-(102.25-83.427))/abs(3*Vt*I1a)*100;
```

```
%Fator de Potência
```

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

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

```

% Tensão Induzida (interna) e corrente de fase (modo gerador)
I2g = abs(-11*(j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))/(((j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))+((R2/s(n))+j*X2)))));% (E2/(j*X2+(R2/s(n)))));
IR = (-11*(j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))/(((j*Xm*Rfe/(Rfe+j*Xm))+((R2/s(n))+j*X2)))));
IO = I1+IR;
E1(n) = abs(IO*j*Xm); %abs((((Vt^2)/IO^2)-(R1^2))^(1/2))-X1)*IO;

% Demais equações modo gerador
if s(n)<0
    Tmec(n) = (nf*I2g^2*R2/(s(n)*omegas));
    Pmec(n) = (nf*I2g^2*R2*(1-s(n))/s(n));
    %If(n) = (E2-Vt)/(R1+j*X1);% (E2/(j*X2+(R2/s(n)))));
    rend(n) = abs((nf*Vt*I1a))/(abs(nf*I2g^2*R2*(1-s(n))/s(n))+102.25)*100;
end

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

end

end

figure
plotyy(rpm,Tmec,rpm,Pmec); grid on
figure
plotyy(rpm,FP,rpm,If); grid on
figure
plotyy(rpm,Pat,rpm,Preat); grid on
figure
plotyy(rpm,rend,rpm,Pat); grid on
figure
plot(rpm,E1); grid on

```


Figura 36 – Resultado da simulação para Conjugado e Potência mecânica

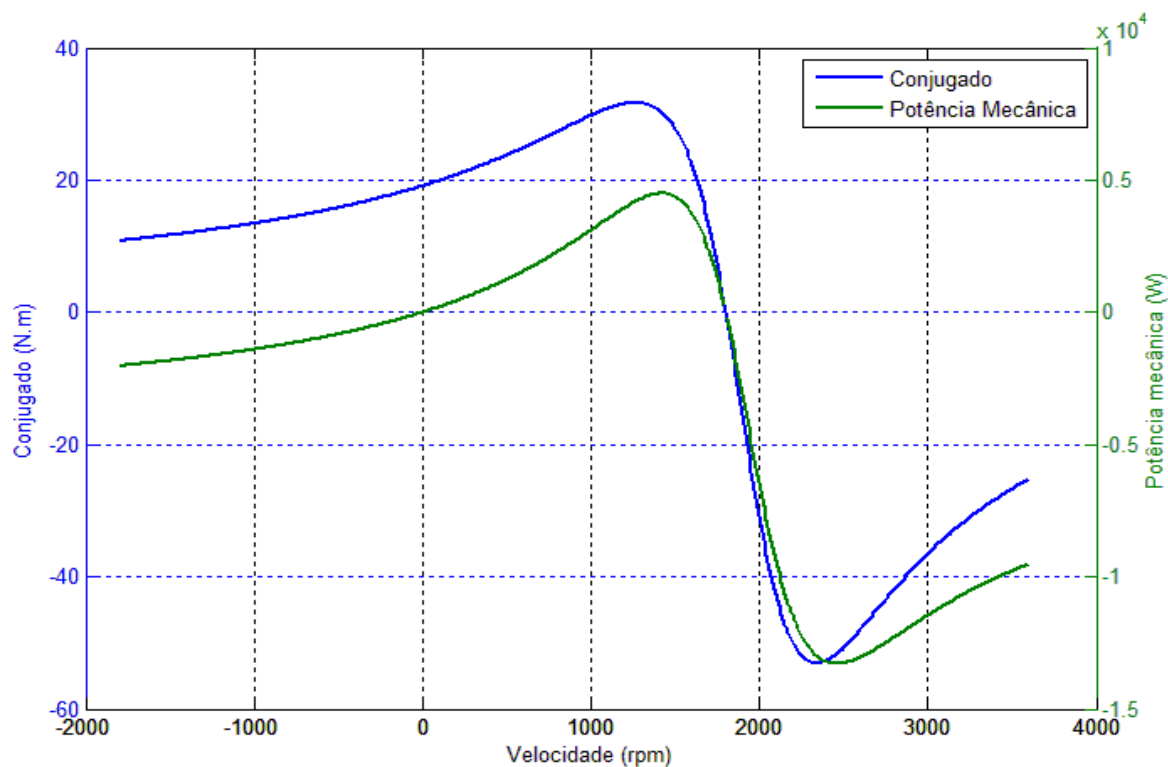


Figura 37 – Resultado da simulação para Fator de Potência e corrente de fase

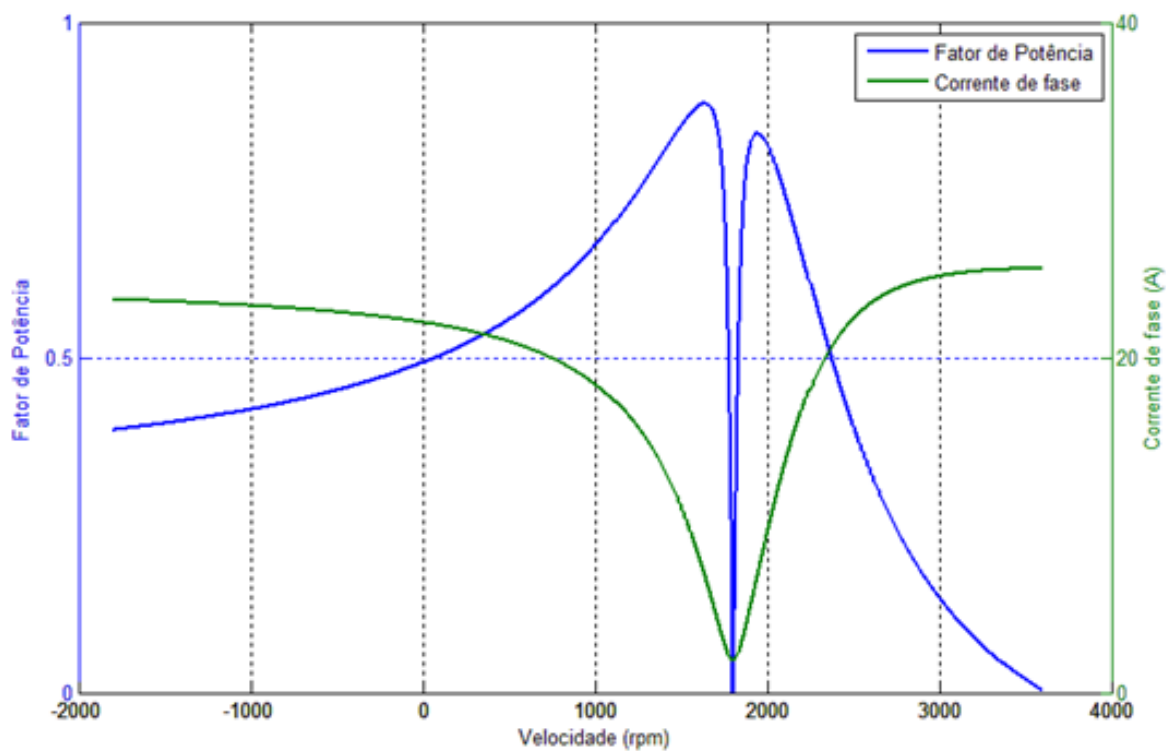


Figura 38 – Resultado da simulação para Potência ativa trifásica e Potência reativa trifásica

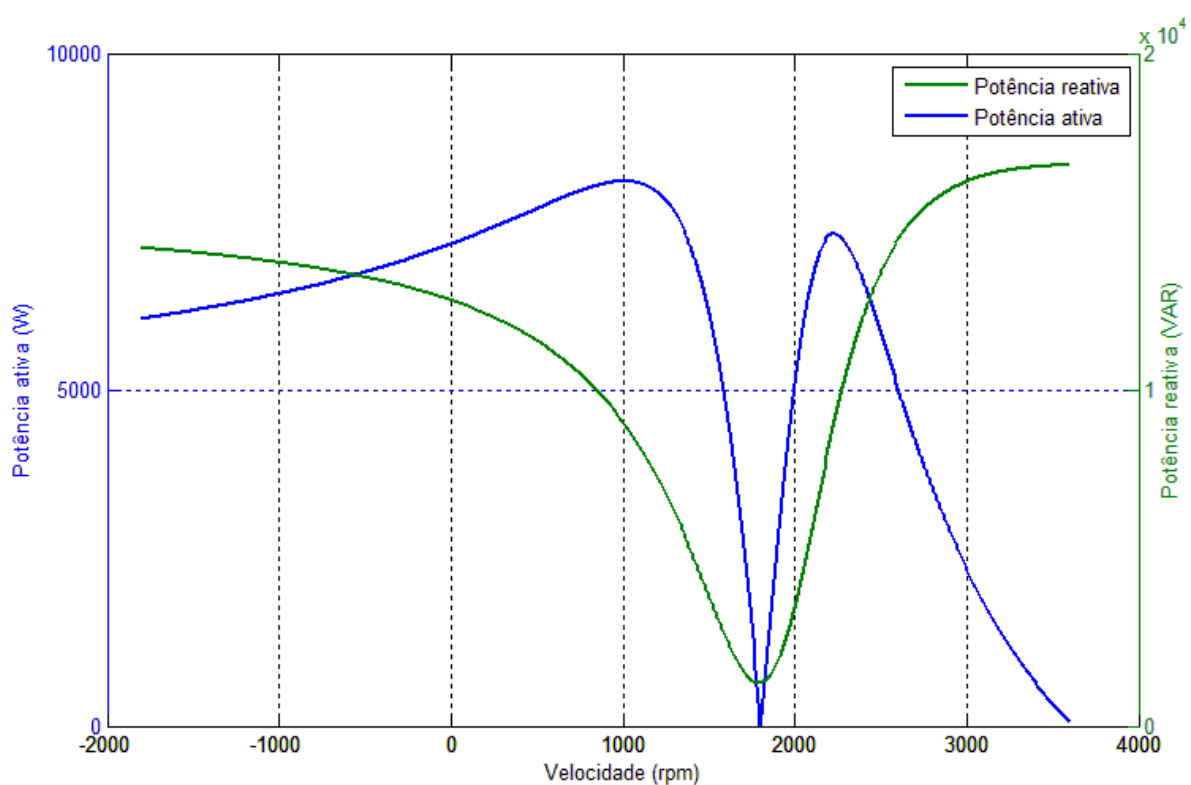


Figura 39 – Resultado da simulação para Rendimento e Potência ativa

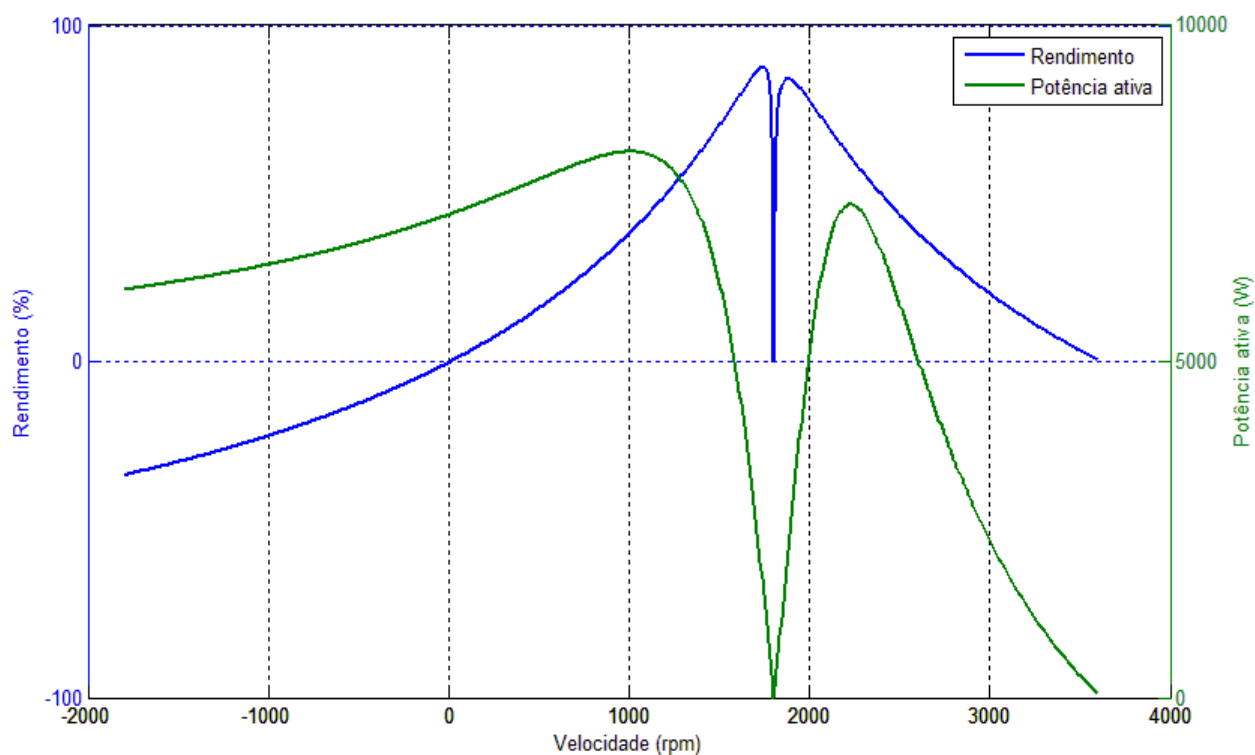


Figura 40 – Resultado da simulação para Tensão induzida

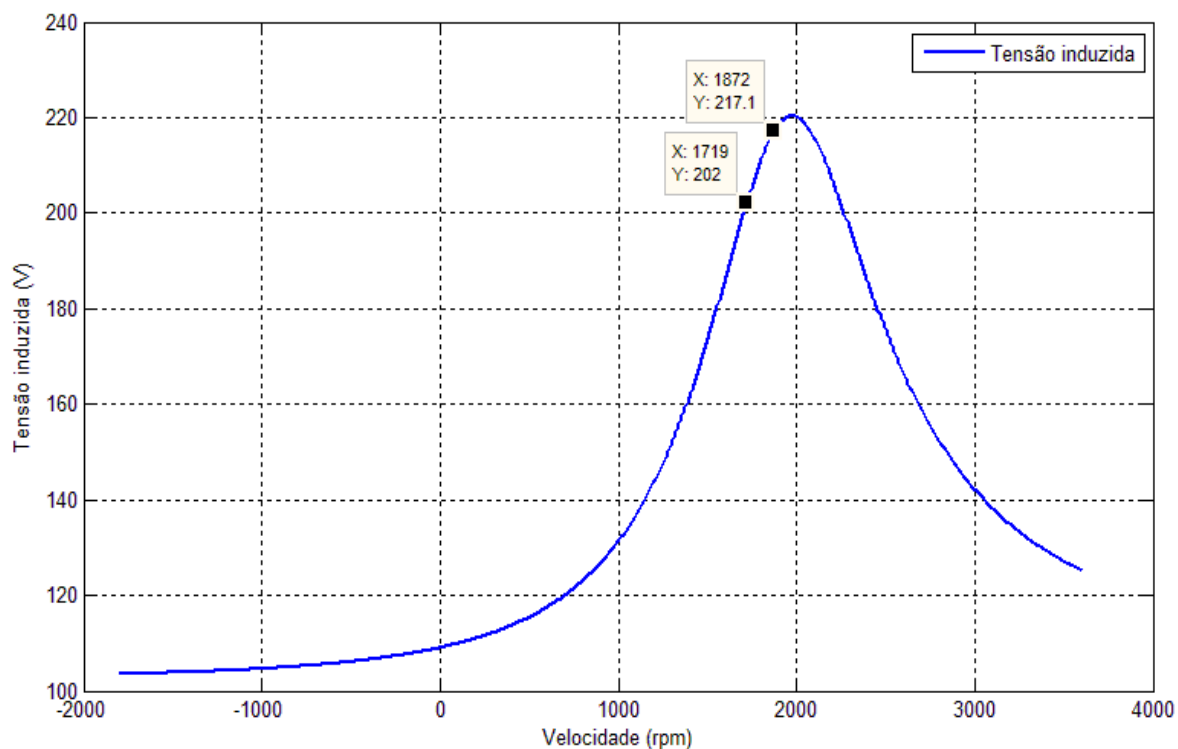


Figura 41 – Resultado da simulação para Conjugado e Potência mecânica na faixa de operação dos ensaios

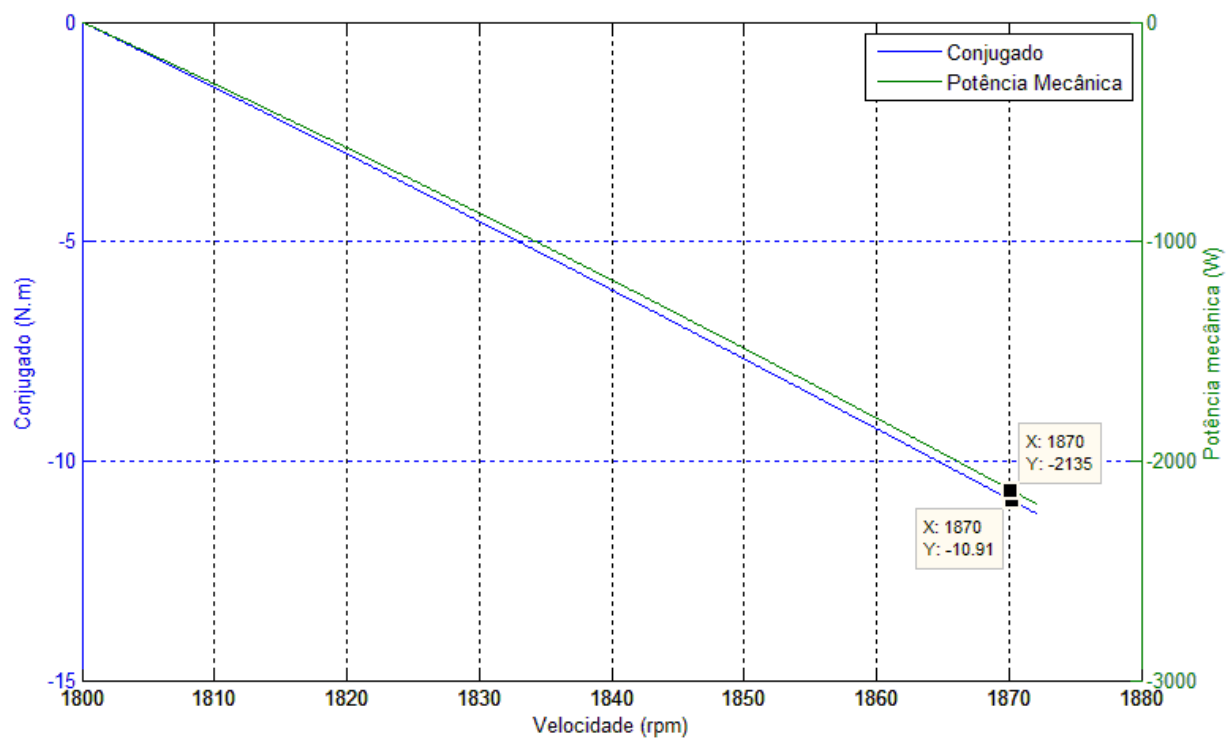


Figura 42 – Resultado da simulação para Fator de Potência e corrente de fase na faixa de operação dos ensaios

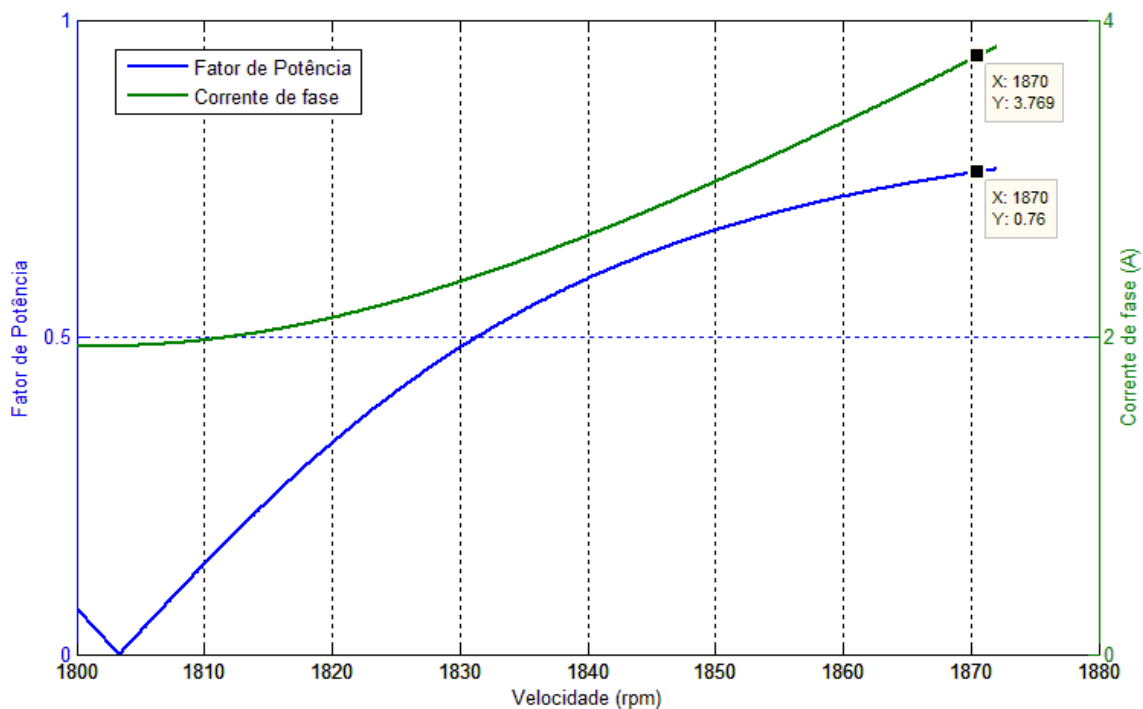


Figura 43 – Resultado da simulação para Potência ativa trifásica e Potência reativa trifásica na faixa de operação dos ensaios

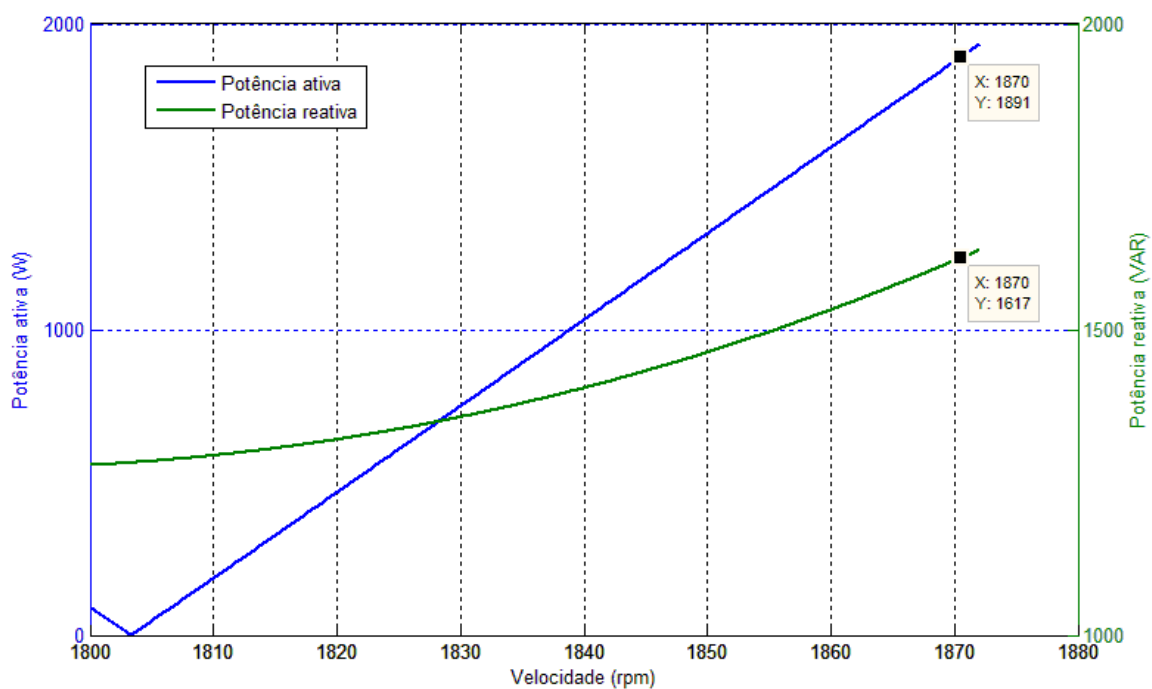


Figura 44 - Resultado da simulação para Rendimento e Potência ativa na faixa de operação dos ensaios

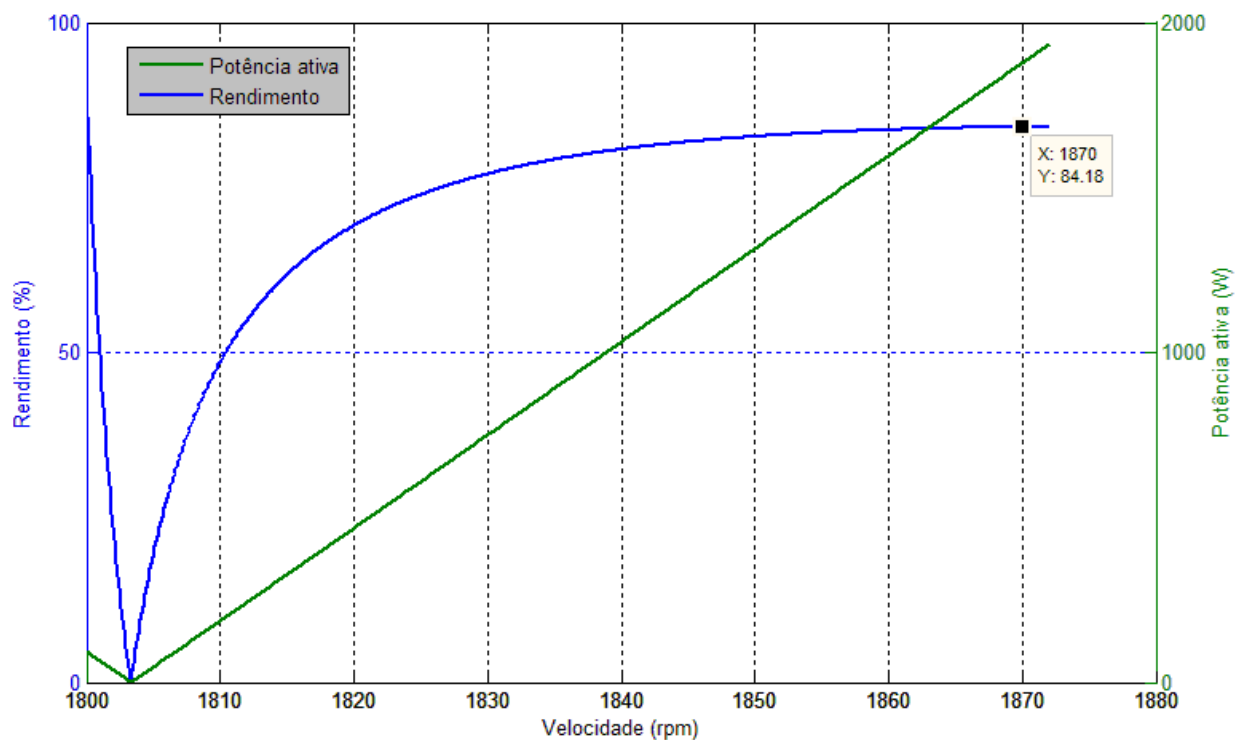
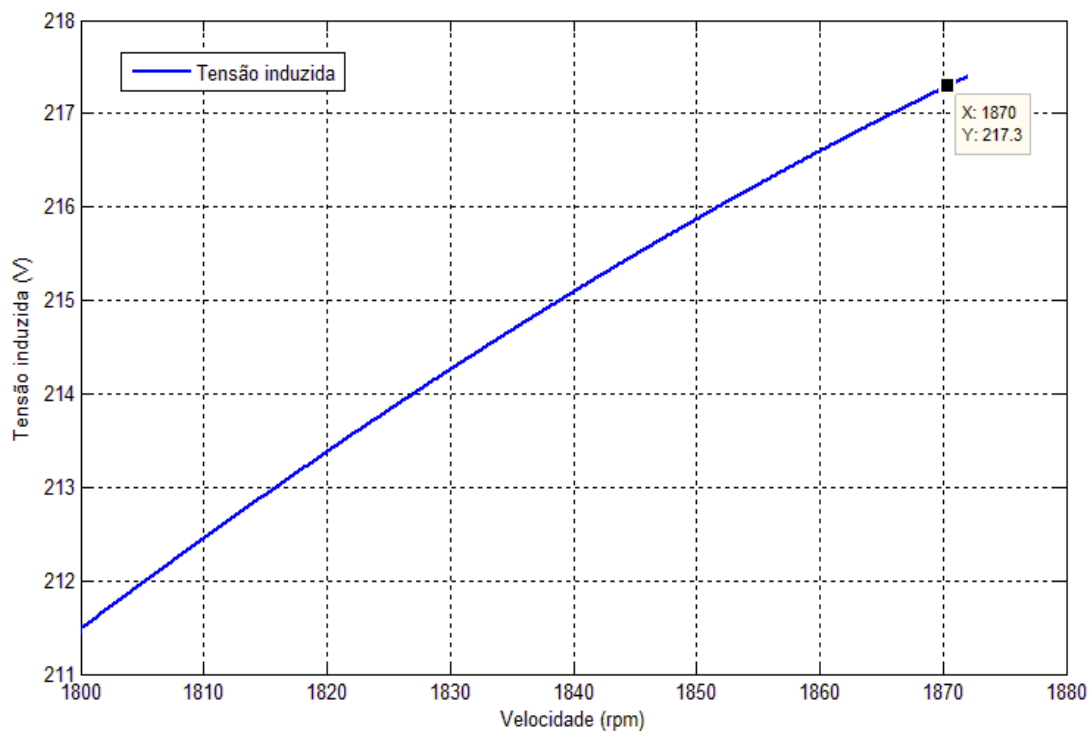


Figura 45 - Resultado da simulação para Tensão induzida na faixa de operação dos ensaios



6. Resultados Experimentais

6.1 OPERAÇÃO INTERLIGADA

A figura 34 é o esquemático de montagem desse ensaio. No entanto, para obter os resultados de geração interligada, uma máquina de corrente contínua desempenhou o papel da máquina motriz. Um conversor aciona e alimenta os enrolamentos de campo e armadura, proporcionando o controle de velocidade desta máquina. As tabelas 17 e 18 mostram os dados da máquina e do conversor, respectivamente.

Tabela 17 – Dados da máquina de corrente contínua utilizada no acionamento primário [7]

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

Tabela 18 – Dados do conversor CA/CC [7]

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

A figura 46 apresenta a bancada de trabalho.

Figura 46 – Bancada de trabalho

O procedimento experimental para conexão do gerador foi o descrito no item 4.3.2. A faixa de trabalho como gerador para a máquina Voges utilizada acontece desde a velocidade síncrona até 1870 RPM. Os resultados das medições estão na tabela abaixo.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios para geração interligada

Velocidade (RPM)	Enrolamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Pativa (W)	Paparente (VA)	Preativa (VAr)	Fator de Potência	DEG (°)	Conjugado (N.m)
1800	u1 - u2	1,760	211,600	16,000	374,600	374,300	-0,043	87,550	1,82
	v1 - v2	1,760	212,000	24,700	374,800	373,900	-0,066	86,230	
	w1 - w2	1,750	210,770	35,100	367,000	365,200	-0,098	84,350	
	Média	1,757	211,457	25,267	372,133	371,133	-0,069	86,043	
1805	u1 - u2	1,800	209,790	39,500	378,200	376,200	-0,100	95,990	2,1
	v1 - v2	1,790	210,620	30,200	376,800	375,600	-0,080	94,590	
	w1 - w2	1,730	209,330	14,500	362,800	362,500	-0,040	92,290	
	Média	1,773	209,913	28,067	372,600	371,433	-0,073	94,290	
1810	u1 - u2	1,970	211,200	118,200	416,700	399,600	-0,280	106,470	3,74
	v1 - v2	1,940	211,940	104,900	411,700	398,100	-0,250	104,760	
	w1 - w2	1,860	210,980	90,200	392,000	381,400	-0,230	103,300	
	Média	1,923	211,373	104,433	406,800	393,033	-0,253	104,843	
1815	u1 - u2	2,030	211,290	139,900	428,200	405,300	-0,330	109,040	4,52
	v1 - v2	1,990	212,050	124,500	421,800	403,000	-0,300	107,170	
	w1 - w2	1,890	210,940	111,400	400,200	384,400	-0,280	106,170	
	Média	1,970	211,427	125,267	416,733	397,567	-0,303	107,460	
1820	u1 - u2	2,250	213,310	209,100	480,700	432,800	-0,440	115,790	5,73
	v1 - v2	2,190	213,960	191,600	479,000	428,100	-0,410	114,110	
	w1 - w2	2,110	212,960	182,100	449,000	410,500	-0,410	113,920	
	Média	2,183	213,410	194,267	469,567	423,800	-0,420	114,607	
1825	u1 - u2	2,370	212,950	243,700	504,600	441,800	-0,480	118,890	6,98
	v1 - v2	2,280	213,330	226,500	486,800	430,200	-0,470	117,730	
	w1 - w2	2,230	212,470	223,400	474,500	481,600	-0,470	118,090	
	Média	2,293	212,917	231,200	488,633	451,200	-0,473	118,237	
1830	u1 - u2	2,670	213,030	326,900	569,300	466,100	-0,570	125,040	7,91
	v1 - v2	2,570	213,630	303,300	549,100	457,800	-0,550	123,530	
	w1 - w2	2,500	212,620	299,600	530,700	438,000	-0,560	124,330	
	Média	2,580	213,093	309,933	549,700	453,967	-0,560	124,300	
1835	u1 - u2	2,830	212,060	368,800	600,400	473,700	-0,610	127,900	8,33
	v1 - v2	2,730	212,550	348,900	580,500	463,900	-0,600	126,950	
	w1 - w2	2,670	211,710	344,500	565,200	448,100	-0,610	127,560	
	Média	2,743	212,107	354,067	582,033	461,900	-0,607	127,470	
1840	u1 - u2	3,140	213,150	443,900	668,800	500,300	-0,660	131,580	9,73
	v1 - v2	3,090	213,680	432,800	660,500	498,900	-0,660	130,940	
	w1 - w2	3,010	213,090	420,200	640,400	483,300	-0,660	131,000	
	Média	3,080	213,307	432,300	656,567	494,167	-0,660	131,173	
1845	u1 - u2	3,53	213,43	-524,3	753,9	541,6	-0,7	134,1	10,3
	v1 - v2	3,38	213,74	-502,2	722	518,8	-0,7	134,1	
	w1 - w2	3,38	212,77	-510,1	720	508,1	-0,7	135,1	
	Média	3,430	213,313	447,800	731,967	522,833	-0,700	134,433	
1850	u1 - u2	3,57	213,500	518,800	742,500	531,200	-0,700	134,320	11,4
	v1 - v2	3,46	214,090	500,300	712,460	524,100	-0,690	133,670	
	w1 - w2	3,43	213,300	494,200	707,200	505,800	-0,750	134,340	
	Média	3,487	213,630	504,433	720,720	520,367	-0,713	134,110	
1855	u1 - u2	3,870	213,170	591,600	824,700	574,600	-0,720	135,840	12,13
	v1 - v2	3,670	213,080	570,600	780,900	533,100	-0,730	136,950	
	w1 - w2	3,770	212,040	592,200	799,600	537,200	-0,740	137,790	
	Média	3,770	212,763	584,800	801,733	548,300	-0,730	136,860	
1860	u1 - u2	4,200	212,700	666,000	892,800	594,500	-0,750	138,240	12,9
	v1 - v2	4,090	212,700	658,000	870,000	569,200	-0,760	139,100	
	w1 - w2	4,130	212,100	662,900	876,600	573,500	-0,760	139,140	
	Média	4,140	212,500	662,300	879,800	579,067	-0,757	138,827	
1865	u1 - u2	4,660	217,460	764,800	1012,700	663,700	-0,755	139,000	14
	v1 - v2	4,480	218,220	739,300	986,600	638,100	-0,760	139,200	
	w1 - w2	4,480	216,990	747,500	972,800	632,500	-0,770	140,200	
	Média	4,540	217,557	750,533	990,700	644,767	-0,762	139,467	
1870	u1 - u2	4,718	216,41	790,900	1033,100	664,600	-0,770	140,000	16,02
	v1 - v2	4,647	217,49	777,900	1003,700	634,300	-0,780	141,000	
	w1 - w2	4,568	216,39	785,800	1010,300	634,900	-0,780	141,000	
	Média	4,644	216,763	784,867	1015,700	644,600	-0,777	140,667	

A partir da tabela acima, plota-se as mesmas curvas das simulações do capítulo anterior, nota-se diferenças entre valores práticos e teóricos. Apesar de haver outras fontes de erro, sem dúvida a maior delas é o fato de a máquina estar operando na região de saturação na curva de magnetização. Teoricamente, a 1870 RPM o módulo da corrente I_1 da figura 35 é 3,84 A e a tensão induzida E_1 é 217,145 V. No entanto, o valor medido para essa corrente nessa velocidade é a corrente nominal (4,64 A/fase), ou seja, o ramo de magnetização está drenando mais corrente porque a reatância de magnetização está menor que a do modelo nesse ponto de operação. Os gráficos a seguir, ajudam a demonstrar esse fenômeno.

Figura 47 – Resultado das medições para conjugado e fator de potência

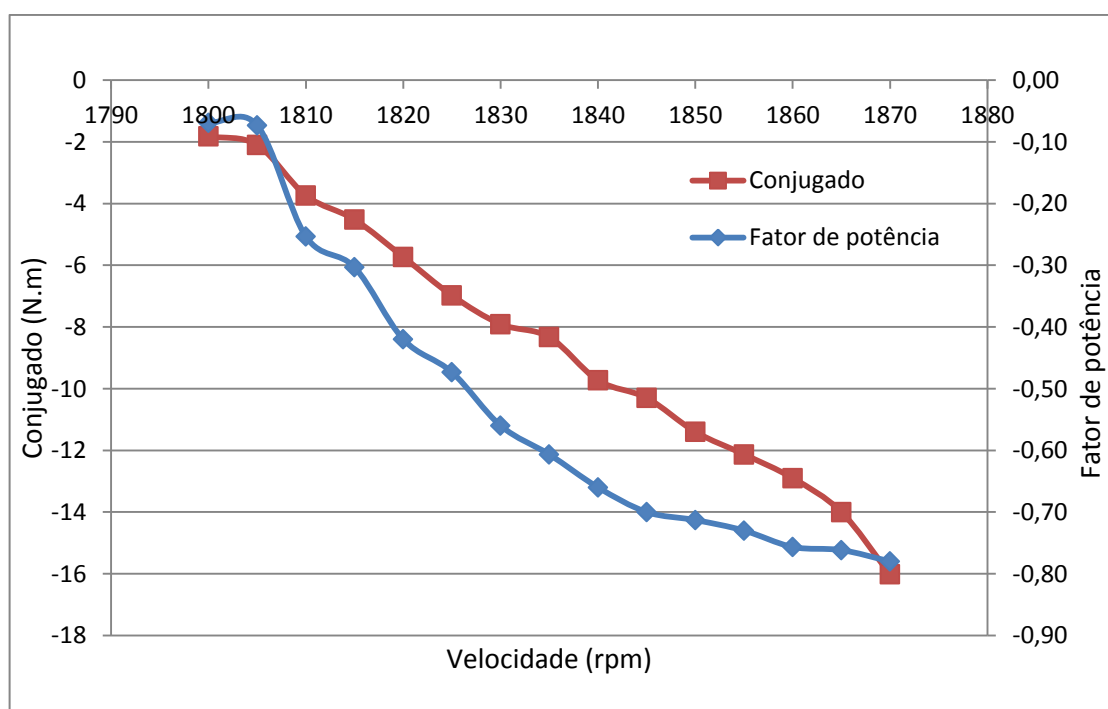


Figura 48 – Resultado das medições para potência ativa trifásica e potência reativa trifásica

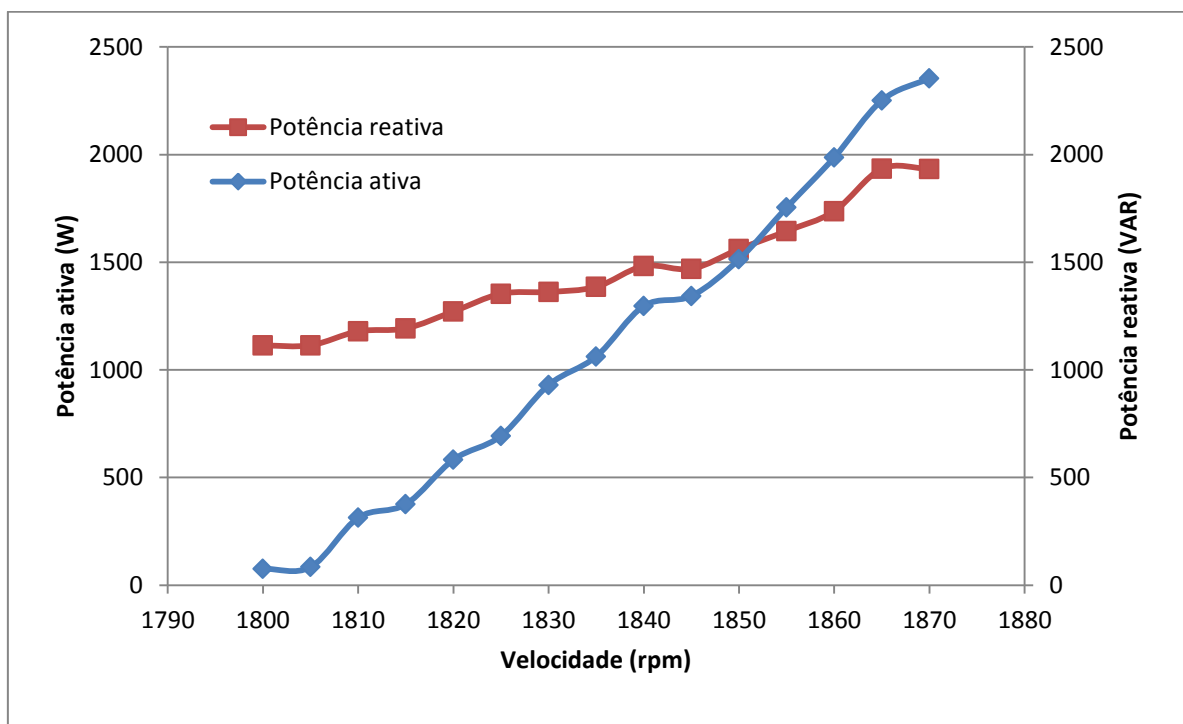
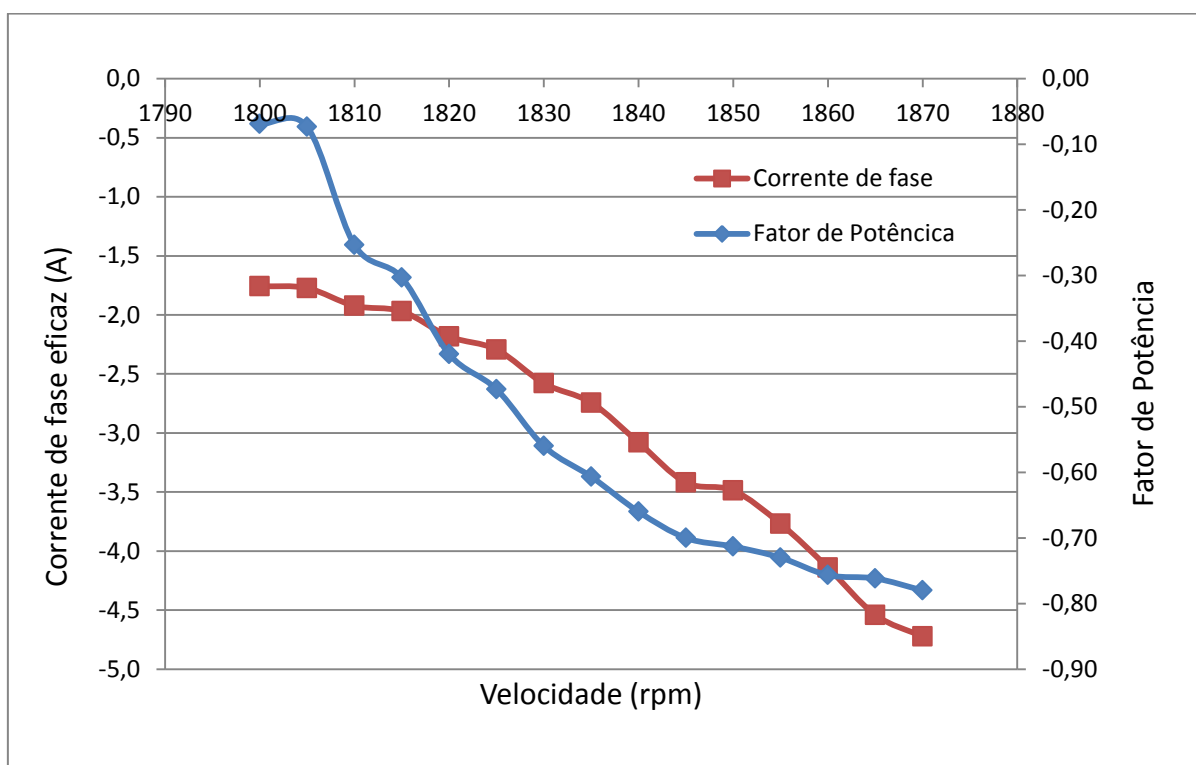


Figura 49 – Resultado das medições para fator de potência e corrente de fase



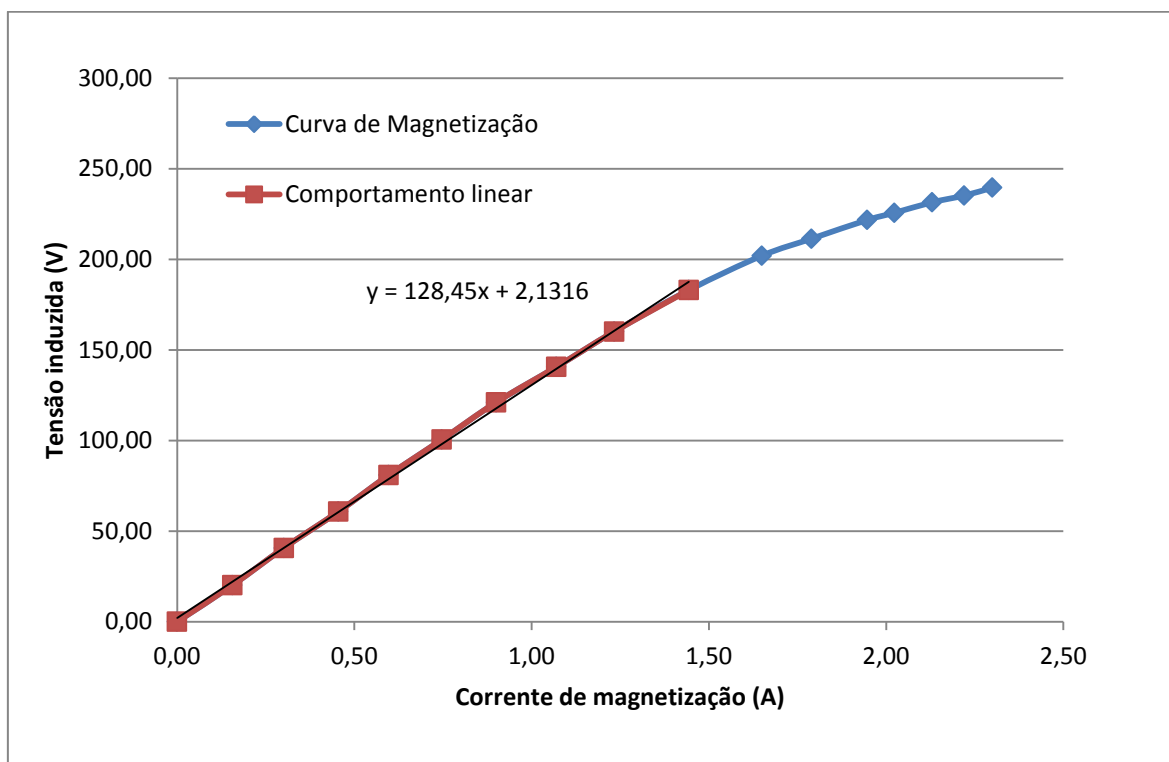
A tabela abaixo apresenta os valores de corrente de magnetização medidos no ensaio de velocidade síncrona ao aplicar uma tensão crescente de zero a 240 V. Com ela, é possível traçar a curva de magnetização da máquina ensaiada.

Tabela 20 – Medições de tensão e corrente para ensaio na velocidade síncrona

Corrente (A)	Tensão (V)
0,00	0,00
0,16	20,14
0,30	40,70
0,45	60,73
0,60	80,87
0,75	100,51
0,90	121,10
1,07	140,66
1,23	160,17
1,44	183,00
1,65	202,03
1,79	211,41
1,95	221,70
2,02	225,67
2,13	231,47
2,22	235,18
2,30	239,53

Fez-se a regressão linear da curva de magnetização desconsiderando a região de saturação. Assim, ao aplicar um valor de corrente de magnetização qualquer na equação resultante, deve-se obter o resultado de tensão induzida para uma máquina não saturada.

Figura 50 – Curva de magnetização obtida experimentalmente



Logo, desconsiderando o efeito da saturação, a tensão induzida E_1 é:

$$E_1 = 128,45I_0 + 2,1316 \quad (72)$$

O cálculo do módulo da corrente de magnetização teórico para o modelo da figura 35 a 1870 RPM resulta em 1,99 A. Inserindo esses 1,99 A na equação 72, a tensão induzida E_1 resulta em 259 V. Isso comprova o fato de estar operando na região de saturação, pois o modelo conduz a uma tensão induzida de 217 V. A tabela abaixo mostra o comparativo de valores teóricos e práticos para velocidade de 1870 RPM.

Tabela 21 – Comparação de resultados práticos e teóricos para 1870 RPM.

Grandeza	Valor teórico	Valor medido
Corrente	3,84 A	4,64 A
Tensão	220 V	216,76 V
Potência ativa (3 fases)	- 1891 W	-2326,9 W
Potência reativa (3 fases)	1617 VAR	1925,5 VAR
Potência Aparente	2488 VA	3019,6 VA
Conjugado	11 N.m	16 N.m
Fator de potência	0,76	0,76

6.2 OPERAÇÃO ISOLADA

Realizaram-se dois procedimentos experimentais utilizando a mesma máquina Voges para operação isolada:

- Variação de carga puramente resistiva sem regulação de tensão;
- Variação do módulo da carga RL e Fator de Potência com pouca variação, incluindo regulação de tensão.

Além dos instrumentos já citados, fez-se uso do instrumento abaixo para medição de frequência.

➔ Fluke 434/PWR Three Phase Power Analyzer

- Faixa de medição: 40 – 70 Hz
- Incerteza: $\pm 0,01$ Hz

Para realizar a variação de carga, utilizou-se um quadro de cargas com as seguintes características:

➔ Quadro de cargas

- Banco de resistores de 3 kW
- Banco de capacitores de 3 kVAR

- Banco de indutores de 3 kVAR

A máquina primária não foi alterada e bancada de trabalho com o quadro de cargas estão na imagem que segue.

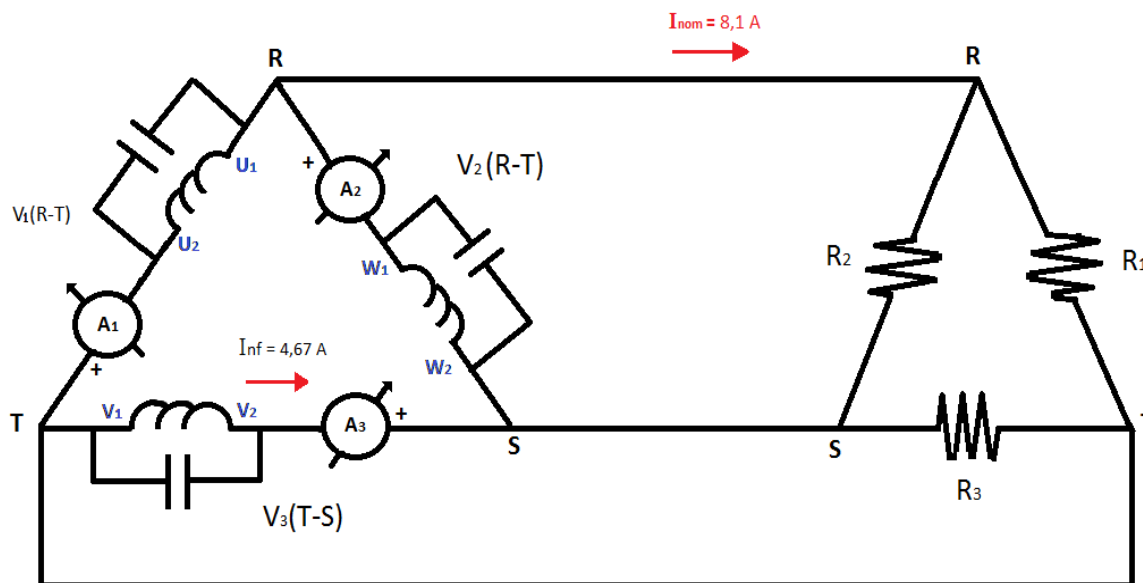
Figura 51 – Montagem do quadro de cargas



6.2.1 Variação de carga puramente resistiva

A fim de melhor compreender o funcionamento da máquina como gerador, fez-se o cálculo da capacitância necessária para excitar a máquina isoladamente e, posteriormente, variou-se a carga resistiva na saída do gerador. A figura a seguir representa o experimento.

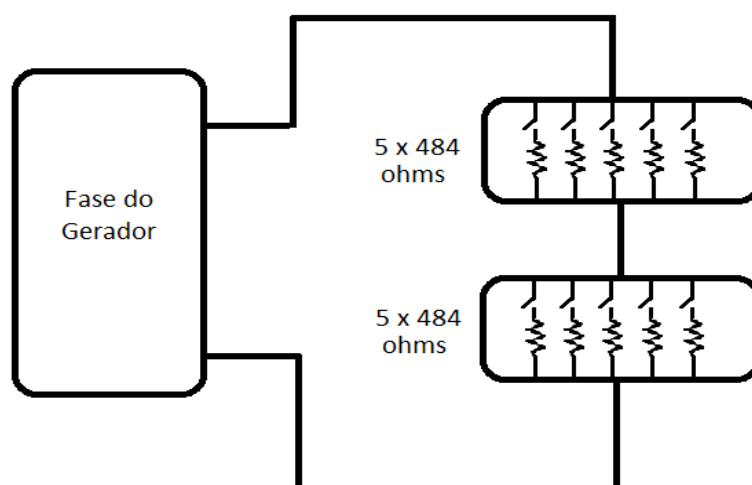
Figura 52 – Esquema de montagem do experimento para variação de carga resistiva



A tabela abaixo descreve a variação de carga. A quinta coluna diz respeito à combinação dos resistores no quadro de cargas. Devido aos problemas em manter a magnetização da máquina com um banco fixo de capacitores, optou-se por variar a carga como demonstra a figura 53. Há dois bancos de resistores conectados em série por fase, a combinação (1 – 0) significa que se conectou um resistor em um banco e nenhum no outro.

Tabela 22 – Variação de carga realizada no ensaio

BANCO DE CAPACITORES				CARGA RESISTIVA			GERADOR	
Número de capacitores em paralelo	Potência do banco em paralelo com cada fase	Capacitância	Reatância capacitiva (Ω)	Combinação dos resistores na fase	Impedância da carga (Ω)	Fator de Potência da carga	Frequência	Tensão
4	354,32	2,20E-05	120,39	1 - 0	VAZIO	0	60,09	206,540
4	326,01	2,20E-05	120,78	1 - 1	968,000	1	59,9	198,430
4	318,55	2,20E-05	120,86	1 - 2	726,000	1	59,86	196,213
4	298,49	2,20E-05	121,06	1 - 3	645,333	1	59,76	190,093
4	313,35	2,20E-05	121,10	1 - 4	605,000	1	59,74	194,800
4	283,28	2,20E-05	121,12	1 - 5	580,800	1	59,73	185,233
4	231,89	2,20E-05	121,28	2 - 5	338,800	1	59,65	167,703
4	141,97	2,20E-05	121,32	3 - 5	258,133	1	59,63	131,240

Figura 53 – Disposição da carga resistiva por fase do gerador

Dessa forma a variação da corrente por chaveamento de resistor é menor, possibilitando coleta de maior número de pontos para os gráficos. A tabela 22 indica que a vazio, se obteve 206,54 V em média por fase. O não atingimento dos 220 V nominais se justifica pelo fato de que apenas um capacitor a mais por fase provoca uma ultrapassagem em mais de 20 V da tensão nominal. Conseqüentemente, por segurança, partiu-se de 206,54 V.

A tabela 23 contém todos os resultados para as grandezas medidas pelo WT1030M e também a frequência, medida pelo Fluke 434.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de geração isolada, com variação de carga resistiva.

Impedância (Carga)	Enrolamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Pativa (W)	Paparente (VA)	Preativa (VAR)	Fator de Potência	DEG (°)	Conjugado (N.m)	Frequência (Hz)
Gerador a vazio	u1 - u2	0,141	207,300	7,600	29,100	28,100	0,260	105,270	1,88	60,09
	w1 - w2	0,141	205,660	5,100	28,900	28,500	0,175	79,910		
	v1 - v2	0,141	206,660	2,600	29,100	28,900	0,092	84,800		
	Média	0,141	206,540	5,100	29,033	28,500	0,176	89,993		
968,00	u1 - u2	0,257	198,650	46,000	51,000	21,900	0,900	154,600	2,48	59,89
	w1 - w2	0,209	197,940	34,500	41,300	22,700	0,830	146,630		
	v1 - v2	0,221	198,700	37,600	44,000	22,800	0,850	148,730		
	Média	0,229	198,430	39,367	45,433	22,467	0,860	149,987		
726,00	u1 - u2	0,313	196,390	57,500	61,400	21,700	0,936	159,340	2,66	59,86
	w1 - w2	0,264	195,820	46,400	51,700	22,800	0,897	153,820		
	v1 - v2	0,280	196,430	50,100	55,000	22,600	0,910	155,690		
	Média	0,286	196,213	51,333	56,033	22,367	0,914	156,283		
645,33	u1 - u2	0,327	190,240	59,500	62,200	18,100	0,957	163,110	2,7	59,76
	w1 - w2	0,281	189,730	49,700	53,300	19,200	0,933	158,840		
	v1 - v2	0,300	190,310	53,800	57,000	18,900	0,943	160,610		
	Média	0,303	190,093	54,333	57,500	18,733	0,944	160,853		
605,00	u1 - u2	0,357	194,940	66,700	69,500	19,500	0,960	163,680	2,74	59,74
	w1 - w2	0,305	194,410	55,500	59,300	20,800	0,936	159,440		
	v1 - v2	0,327	195,050	60,040	63,800	20,600	0,946	161,140		
	Média	0,330	194,800	60,747	64,200	20,300	0,947	161,420		
580,80	u1 - u2	0,342	185,400	61,900	63,500	13,900	0,976	167,310	2,76	59,73
	w1 - w2	0,298	184,900	53,000	55,100	15,300	0,960	163,840		
	v1 - v2	0,318	185,400	57,100	59,000	14,900	0,970	165,370		
	Média	0,319	185,233	57,333	59,200	14,700	0,969	165,507		
338,80	u1 - u2	0,505	167,800	84,400	84,800	7,700	0,990	174,350	2,82	59,65
	w1 - w2	0,466	167,510	77,500	78,000	9,100	0,993	173,320		
	v1 - v2	0,493	167,800	82,400	82,800	8,200	0,995	174,350		
	Média	0,488	167,703	81,433	81,867	8,333	0,993	174,007		
258,13	u1 - u2	0,505	131,280	66,000	66,200	4,000	0,998	176,540	2,89	59,63
	w1 - w2	0,481	131,110	62,900	63,100	4,700	0,997	175,700		
	v1 - v2	0,497	131,330	65,100	65,200	3,900	0,998	176,600		
	Média	0,494	131,240	64,667	64,833	4,200	0,998	176,280		

As imagens a seguir, são os gráficos resultantes da tabela acima.

Figura 54 – Comportamento do conjugado e da frequência com o aumento da carga.

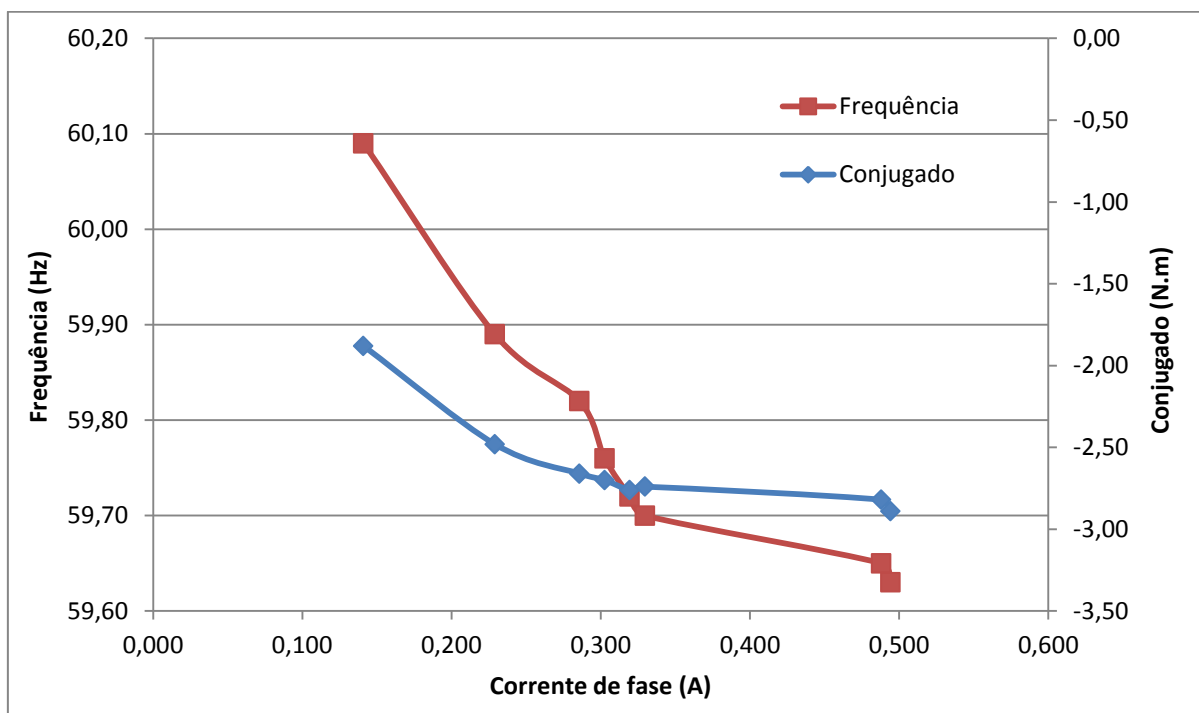


Figura 55 – Comportamento da tensão de saída do gerador e da frequência com o aumento de carga.

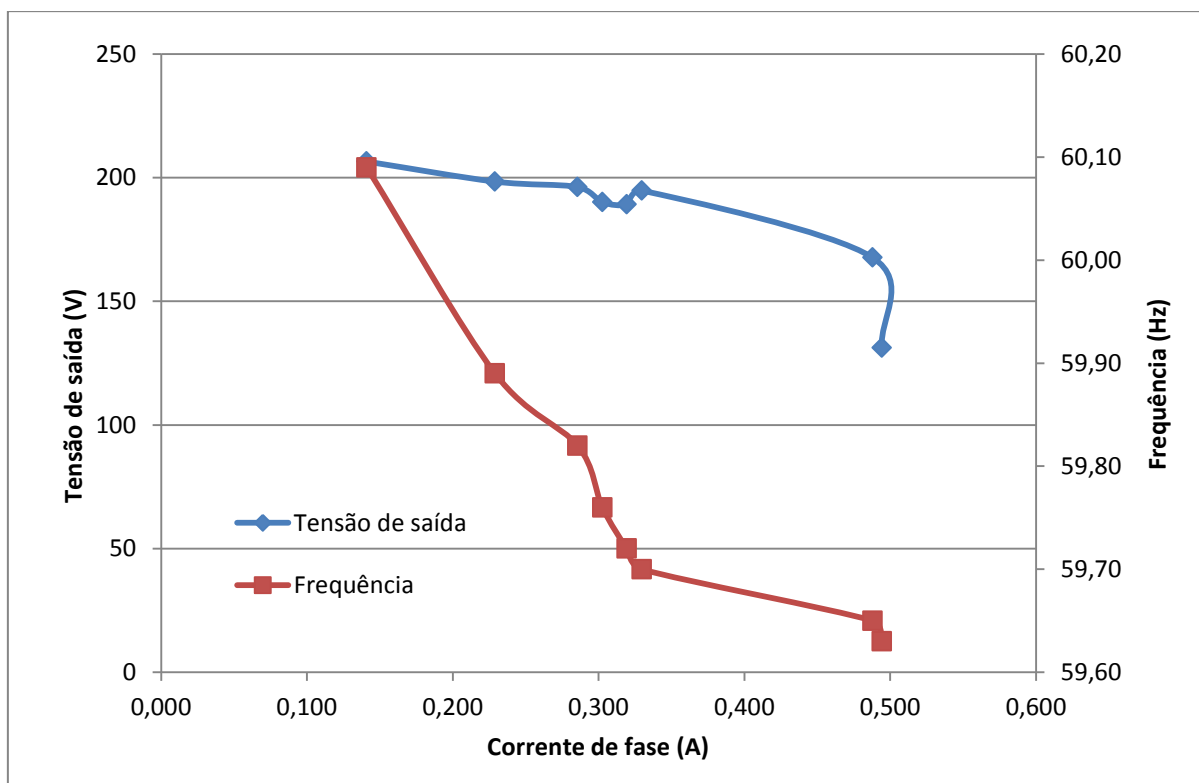


Figura 56 – Comportamento da potência aparente com o aumento de carga

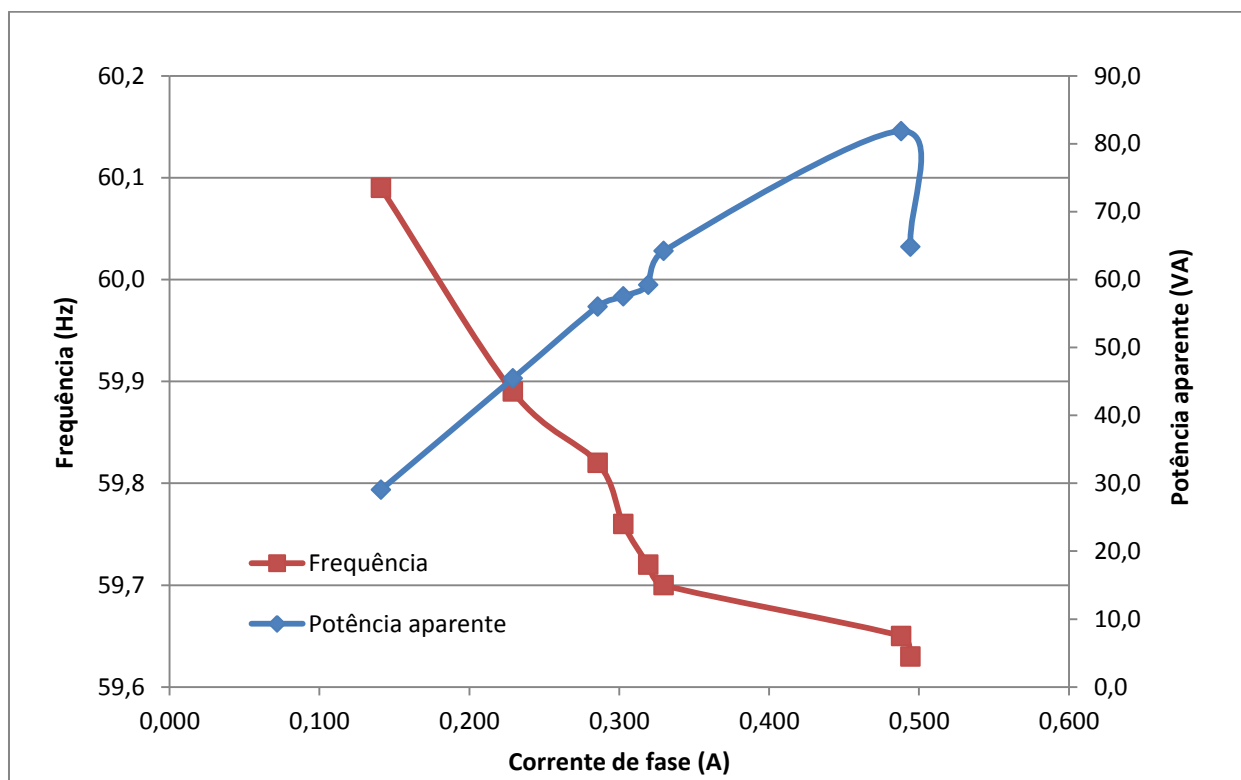


Figura 57 – Comportamento da potência ativa com o aumento da carga

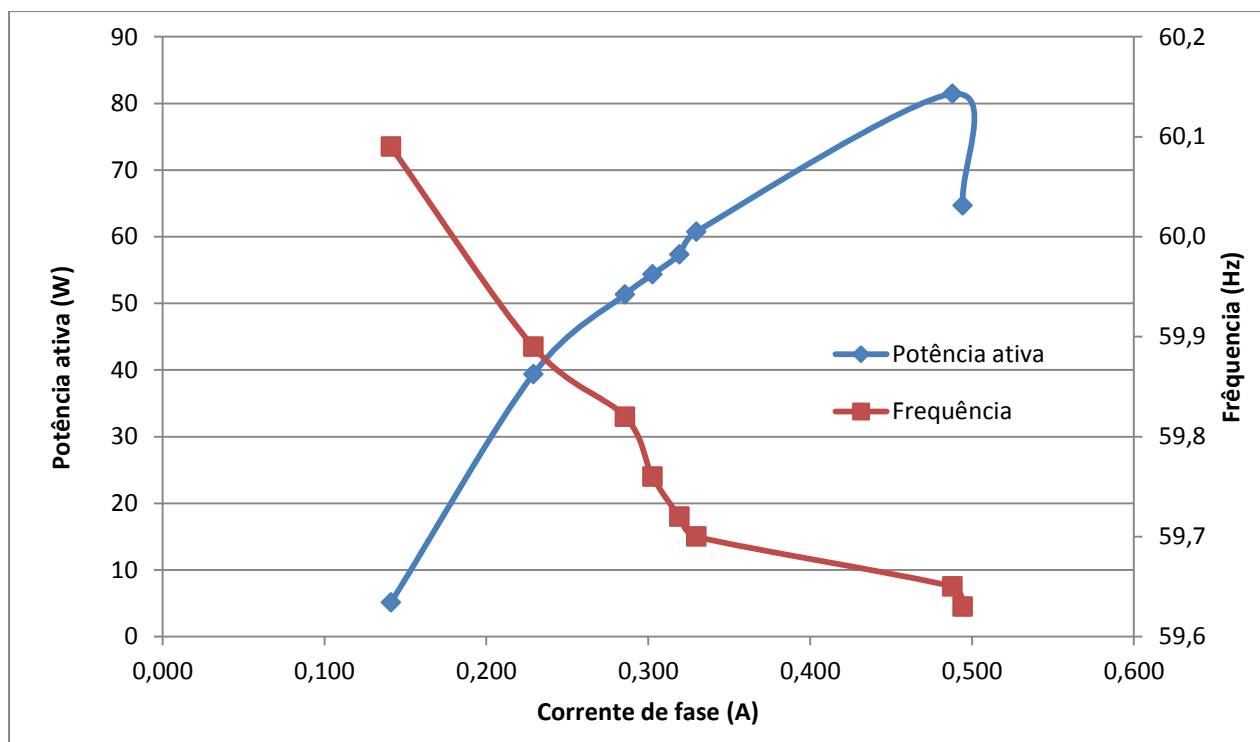


Figura 58 – Comportamento da potência reativa com o aumento da carga

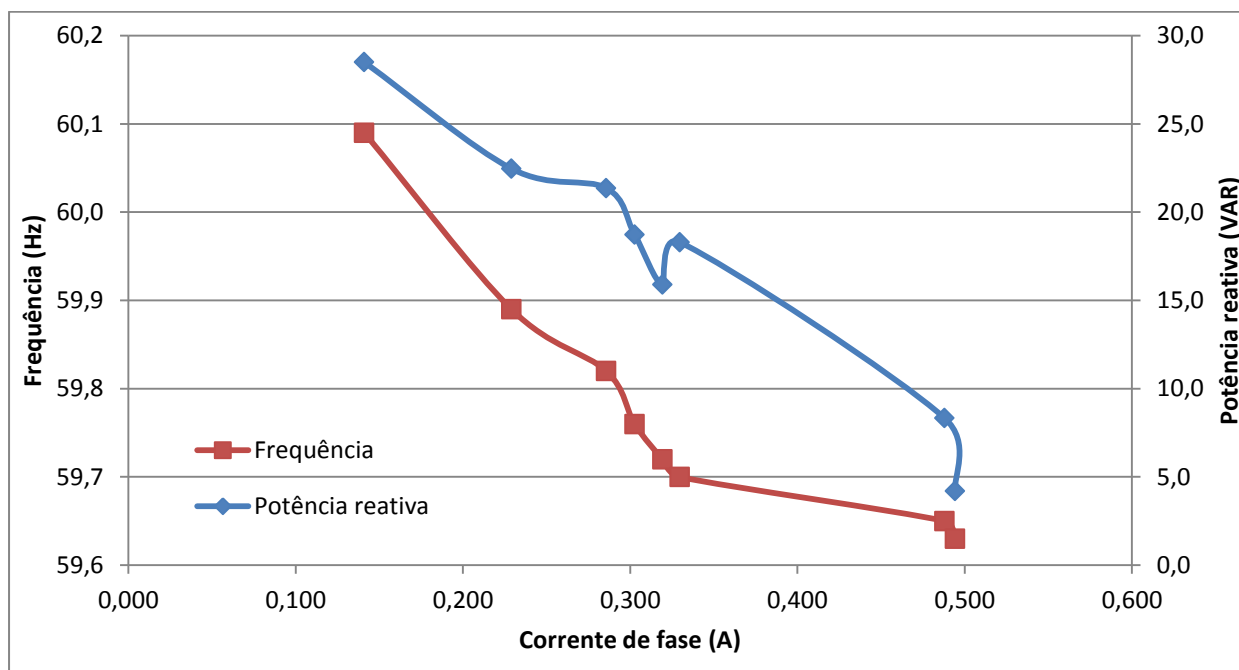
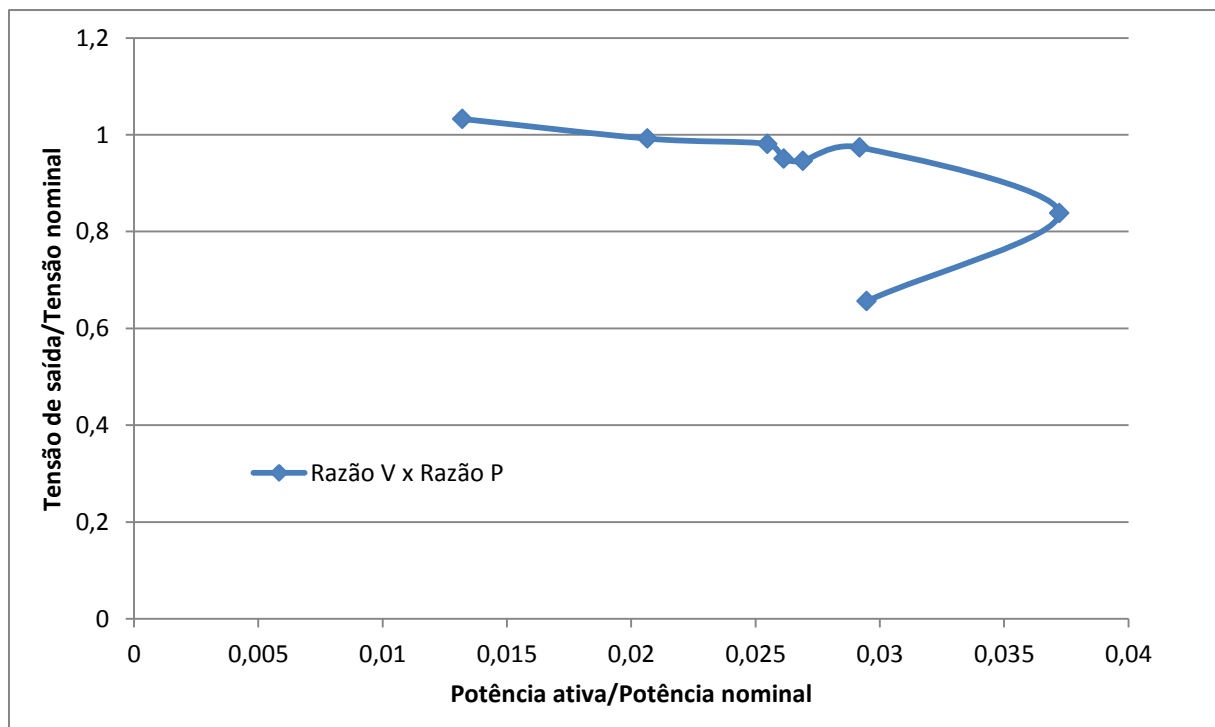


Figura 59 – Variação percentual de carga x Variação percentual de tensão



Com análise dos gráficos, comprova-se a queda da frequência síncrona com o aumento de carga. Toda vez que uma carga se inseriu, regulou-se a velocidade mecânica de

forma a mantê-la constante em 1800 RPM antes de realizar a medida. A velocidade pode ter assumido qualquer valor entre 1799,09 e 1800,91 ($\pm 0,033$ Hz) devido à incerteza do tacômetro, além disso, um erro na medida de frequência de $\pm 0,01$ Hz está associado à medição de frequência. Por mais que exista a incerteza dos dois instrumentos (tacômetro e Fluke 434), constatou-se uma variação de 0,46 Hz, que é 11 vezes maior que a soma das incertezas associadas.

Uma justificativa para os pontos intermediários das curvas (que sofreram variações impedindo que as curvas seguissem uma tendência) é o fato de possivelmente ter ocorrido variação na velocidade da máquina primária antes do momento da amostra.

O último ponto de todas as curvas é o momento onde ocorreu a desmagnetização da máquina e não foi possível coletar mais pontos. Foi interessante constatar que variações bruscas de carga também provocam desmagnetização da máquina, esse foi um dos motivos pelos quais se adotou o método de variação de carga da figura 52.

6.2.2 Variação de carga RL

Nesse ensaio, o cenário se manteve o mesmo que para variação de carga puramente resistiva, porém, conectaram-se indutores em paralelo com os resistores. Dessa forma, o banco de capacitores deve fornecer reativos para a máquina e para a carga. O método escolhido para controle de tensão foi o chaveamento de capacitores. O controle do chaveamento se fez conforme demanda, ou seja, procurou-se manter combinações RLC em paralelo com o gerador para simular uma carga com fator de potência pouco variante ou, no pior dos casos, assumir fator de potência não abaixo de 0,75. A tabela 24 contém o perfil das cargas.

Tabela 24 – Cargas RL conectadas em paralelo com GI isolado.

BANCO DE CAPACITORES				CARGA RL					GERADOR	
Número de capacitores em paralelo	Potência do banco em paralelo com cada fase (VAR)	Capacitância (F)	Reatância capacitiva (Ω)	Combinação dos resistores na fase	Módulo da carga Indutiva (Ω)	Carga Resistiva (Ω)	Módulo da carga	Fator de Potência da carga (indutivo)	Frequência (Hz)	Tensão (V)
5	552,14	2,75E-05	96,46	R:1-2 & L:1-1	968,839	726	580,98	0,800	60	230,780
5	482,14	2,75E-05	96,59	R:1-4 & L:1-2	725,660	605,000	464,684	0,768	59,92	215,800
5	497,59	2,75E-05	97,01	R:2-2 & L:2-1	722,511	484,000	402,110	0,83	59,66	219,707
5	502,13	2,75E-05	97,01	R:3-2 & L:1-1	963,349	403,333	372,041	0,922	59,66	220,707
5	477,10	2,75E-05	97,06	R:3-2 & L:2-1	722,148	403,333	352,130	0,873	59,63	215,190
6	723,44	3,30E-05	80,52	R:2-4 & L:2-2	483,612	363,000	290,316	0,8	59,9	241,350
6	630,70	3,30E-05	80,79	R:3-4 & L:2-3	401,664	282,333	230,977	0,81	59,7	225,727
6	570,96	3,30E-05	81,07	R:4-3 & L:5-2	336,211	282,333	216,210	0,766	59,49	215,15
7	738,52	3,85E-05	69,70	R:5-4 & L:4-4	239,424	217,800	161,110	0,7396	59,31	226,8833
7	736,60	3,85E-05	69,60	R:5-5 & L:3-5	255,773	193,600	154,365	0,797	59,4	226,417
7	658,40	3,85E-05	69,67	R:5-5 & L:0-2	239,545	193,600	150,570	0,778	59,34	214,17

Graficamente, pode-se analisar a variação da carga como na figura 60.

Figura 60 – Variação de carga na saída do gerador de indução.

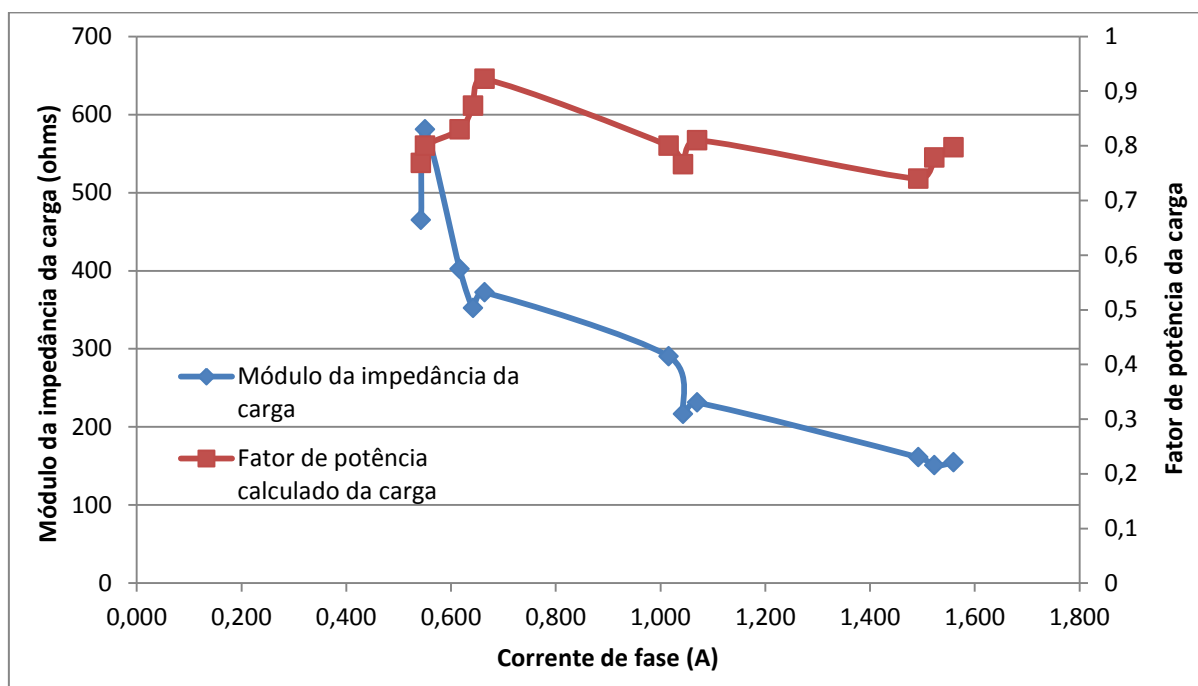


Tabela 25 – Resultados do ensaio para geração isolada com inclusão de carga RL

Módulo da Impedância	Fator de potência calculado da carga	Enrolamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Pativa (W)	Paparente (VA)	Preativa (VAr)	Fator de Potência	DEG (°)	Conjugado (N.m)	Frequência (Hz)
580,98	0,8	u1 - u2	0,574	230,820	85,500	132,600	101,300	0,645	130,140	2,56	60
		w1 - w2	0,506	230,920	68,900	116,900	94,400	0,589	126,150		
		v1 - v2	0,572	230,600	72,200	131,800	110,300	0,547	123,210		
		Média	0,551	230,780	75,533	127,100	102,000	0,594	126,500		
464,684	0,768	u1 - u2	0,564	216,140	86,400	121,900	86,000	0,700	135,130	3,26	59,92
		w1 - w2	0,498	215,490	75,000	107,400	76,800	0,698	134,310		
		v1 - v2	0,566	215,770	78,100	122,100	93,900	0,640	129,750		
		Média	0,543	215,800	79,833	117,133	85,567	0,679	133,063		
290,316	0,8	u1 - u2	1,040	241,460	176,100	251,100	178,900	0,700	134,500	4,17	59,9
		w1 - w2	0,967	241,000	148,800	233,100	179,400	0,640	129,700		
		v1 - v2	1,040	241,590	160,700	251,800	193,800	0,640	129,670		
		Média	1,016	241,350	161,867	245,333	184,033	0,660	131,290		
230,977	0,81	u1 - u2	1,090	225,950	191,700	245,700	153,600	0,780	141,290	4,65	59,7
		w1 - w2	1,030	225,460	172,800	230,800	153,000	0,740	138,500		
		v1 - v2	1,090	225,770	181,600	246,800	167,100	0,740	137,400		
		Média	1,070	225,727	182,033	241,100	157,900	0,753	139,063		
154,365	0,797	u1 - u2	1,580	226,500	277,800	356,900	224,100	0,770	141,100	6,87	59,4
		w1 - w2	1,510	226,300	259,200	342,300	223,500	0,760	139,230		
		v1 - v2	1,590	226,450	268,700	359,600	239,000	0,740	138,350		
		Média	1,560	226,417	268,567	352,933	228,867	0,757	139,560		
372,041	0,922	u1 - u2	0,697	221,020	129,200	154,000	84,000	0,839	147,000	4,01	59,66
		w1 - w2	0,624	220,300	112,100	137,400	79,600	0,815	144,600		
		v1 - v2	0,672	220,800	117,200	148,500	90,800	0,792	142,320		
		Média	0,664	220,707	119,500	146,633	84,800	0,815	144,640		
402,11	0,83	u1 - u2	0,650	219,600	111,000	142,700	89,700	0,770	141,080	3,56	59,66
		w1 - w2	0,570	220,000	93,700	125,400	83,400	0,740	138,360		
		v1 - v2	0,630	219,520	100,500	138,900	95,800	0,720	136,370		
		Média	0,617	219,707	101,733	135,667	89,633	0,743	138,603		
352,13	0,873	u1 - u2	0,675	212,370	120,070	143,400	77,400	0,840	147,330	3,76	59,63
		w1 - w2	0,600	211,800	104,400	127,200	72,600	0,820	145,160		
		v1 - v2	0,653	221,400	110,300	138,800	84,300	0,790	142,610		
		Média	0,643	215,190	111,590	136,467	78,100	0,817	145,033		
216,21	0,766	u1 - u2	1,060	215,290	174,800	229,400	148,600	0,760	139,630	4,73	59,49
		w1 - w2	1,000	215,000	158,300	215,600	146,400	0,730	137,220		
		v1 - v2	1,070	215,160	169,000	231,400	158,000	0,730	136,920		
		Média	1,043	215,150	167,367	225,467	151,000	0,740	137,923		
161,11	0,7396	u1 - u2	1,517	226,800	254,200	344,100	231,900	0,739	137,630	6,17	59,31
		w1 - w2	1,440	226,700	227,500	326,500	234,100	0,697	134,180		
		v1 - v2	1,520	227,150	243,400	345,000	244,500	0,700	134,880		
		Média	1,492	226,883	241,700	338,533	236,833	0,712	135,563		
150,57	0,778	u1 - u2	1,520	214,510	247,300	326,000	212,500	0,758	130,330	6,13	59,34
		w1 - w2	1,488	213,900	239,200	318,300	210,000	0,752	138,710		
		v1 - v2	1,562	214,100	241,600	334,500	231,300	0,723	136,250		
		Média	1,523	214,170	242,700	326,267	217,933	0,744	135,097		

A figura 61 mostra que houve sobre tensão 12% acima do valor nominal durante a variação de carga. A discretização dos capacitores é responsável por isso, a indisponibilidade de realizar ajuste fino da capacitância, resulta em sobre tensão ao incluir um capacitor a mais no banco. Nesse caso, chaveou-se capacitores de 100 VAR e 5,5 uf (484 ohms a 60 Hz). Alternativamente, é possível chavear capacitores de menor valor, 50 VAR e 2,75 uf, por exemplo.

Figura 61 – Variação percentual de carga x Variação percentual de tensão conforme capacitância total incluída por fase

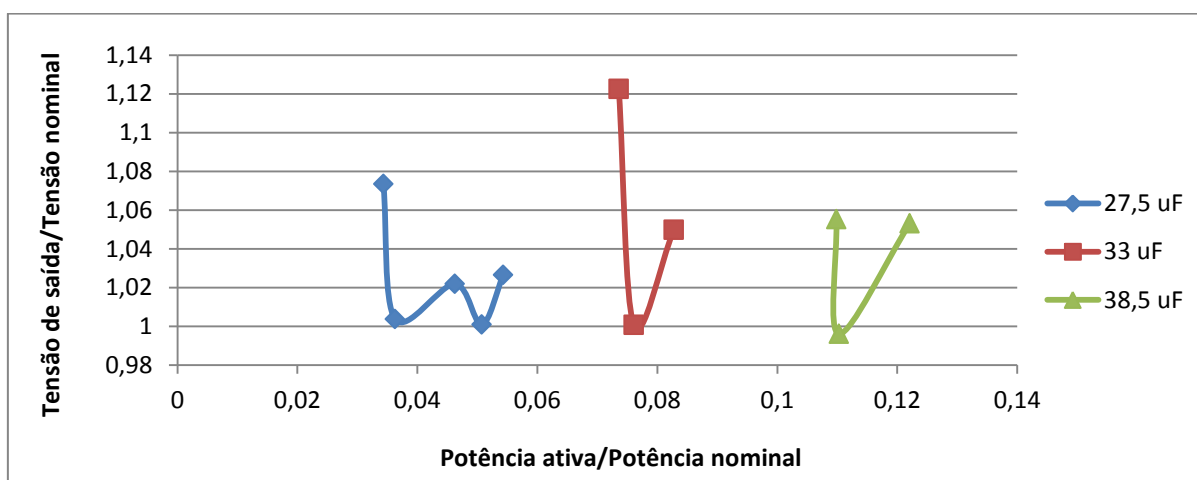
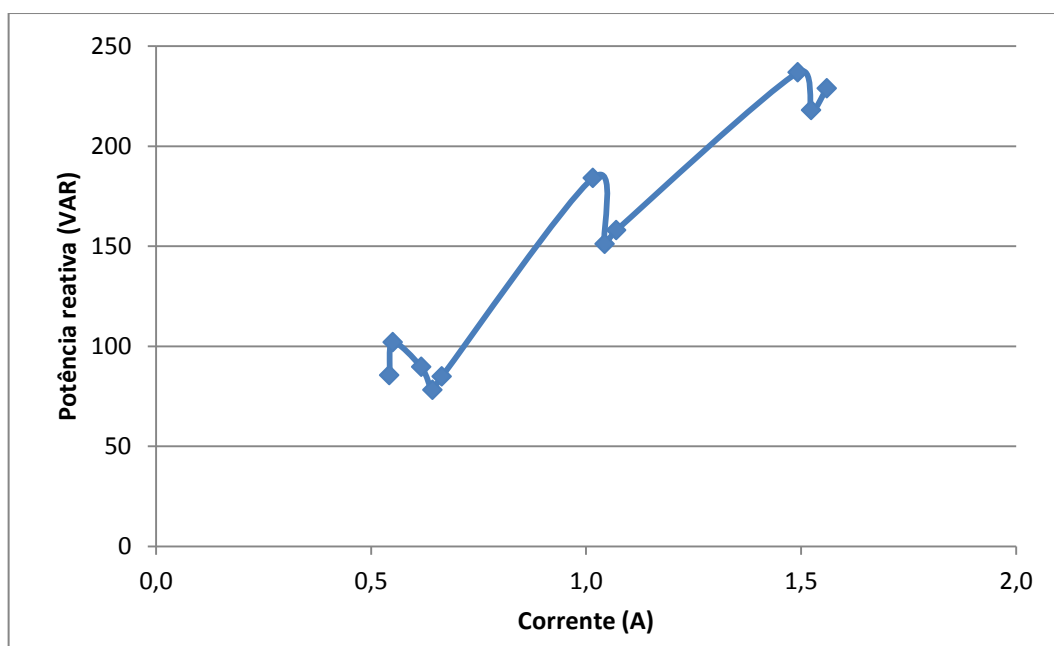


Figura 62 – Variação da potência reativa com o aumento de carga



7. Conclusões e recomendações

A ideia desse trabalho é fazer apanhado geral dos modos de funcionamento do gerador de indução através de análise teórica e experimental. Em relação à operação interligada, conclui-se que apesar de exigir técnicas de controle simples, dificilmente é possível atender todos os requisitos de qualidade de energia sem auxílio de banco de capacitores. Nesse caso, a corrente é proporcional ao acréscimo da velocidade sobre síncrona imposta pela máquina primária e, conseqüentemente, a uma velocidade limite de trabalho para que essa corrente não destrua o gerador de indução. A estimativa da potência do gerador de indução é de considerável relevância, pois as informações fornecidas pelos fabricantes resumem-se apenas a operação como motor [7].

Dos métodos apresentados para regulação de tensão em operação isolada, o mais robusto é o controle por inversores de frequência, no entanto, o custo-benefício do método utilizado está estritamente vinculado ao perfil de carga a ser alimentada.

Além do que se apresentou nesse trabalho, várias configurações de conexão entre os enrolamentos da máquina e capacitores de excitação foram averiguadas. Entre elas, inclusão de capacitores na linha entre gerador e carga, inclusão de capacitores dentro da conexão delta (entre os amperímetros e a as fases da figura 52) e inclusão de capacitores em série com a carga. De todas as formas, com algumas particularidades, se obteve resultados semelhantes de regulação, pois no geral, não é tarefa simples realizar essa tarefa manualmente. Uma continuação para esse trabalho deve propor um método automático, baseado na experiência adquirida em controle manual.

Os resultados obtidos experimentalmente mostram diferenças dos valores calculados teoricamente. Além da questão da saturação da máquina, outras fontes de erro são:

- A dificuldade de controlar a velocidade da máquina primária experimentalmente.
- Desequilíbrio entre as tensões da rede.
- Influência do conteúdo harmônico sobre o processo de medição.

Muitas melhorias ainda são necessárias, para que essa tecnologia seja absorvida em larga escala. Uma sugestão para o desenvolvimento da implementação dos geradores de indução é trabalhar com o desenvolvimento de novas máquinas de indução projetadas especificamente para operar como gerador. Outra boa proposta de trabalho seria realizar o estudo de um sistema de controle que permitisse a comutação de operação isolada para operação interligada, levando em consideração os problemas de sub e sobre frequência, sub e sobre tensão, tomando os devidos cuidados com o problema de desmagnetização da máquina.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAPALLAZ, J.M. et al. Manual On Induction Motors Used As Generators. Braunschweig: Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologien-Gate, 1992. (Mhpg series harnessing water power on a small scale; v.10).
- [2] Medeiros, D.M. A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica. Tese de Mestrado - Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia da Energia.
- [3] CHAPMAN, S.J. Electric Machinery Fundamentals. 5nd ed. Boston: McGrawHill, 1991.
- [4] Lahcene Ouazene, George McPherson, ANALYSIS OF THE ISOLATED INDUCTION GENERATOR, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, August 1983.
- [5] MARRA E.G. & POMILIO J.A, SISTEMAS DE GERAÇÃO BASEADOS EM GERADOR DE INDUÇÃO OPERANDO COM TENSÃO REGULADA E FREQUÊNCIA CONSTANTE - SBA Controle & Automação Vol. 11 no. 01 / Jan., Fev., Mar, Abril de 2000.
- [6] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY Jr., C.; UMANS, S.D. Electric Machinery 5th ed. New York: McGrawHill, 1990. (McGraw-Hill series in electrical engineering).
- [7] NASCIMENTO, S. C. Proposta para Implantação de Microcentrais de Geração a Gás com Utilização de Geradores de Indução. Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [8] <http://www.diarioliberalidade.org/opiniom/opiniom-propia/34036-a-hora-e-a-vez-da-gera%C3%A7%C3%A3o-distribu%C3%ADda-de-eletricidade.html>
- [9] Revista Brasileira de Energia, Vol. 11 | N o 2, Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras
- [10] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição

- [11] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012.
- [12] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 493, DE 5 DE JUNHO DE 2012.
- [13] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 235, DE 14 DE NOVEMBRO DE 2006.
- [14] CEEE-D - ACESSO DE MICRO E MINI GERAÇÃO COM FONTES RENOVÁVEIS E COGERAÇÃO QUALIFICADA AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2012.
- [15] Langsdorf, Alexander S. Theory of alternating-current machinery, 1955
- [16] Bim, E., J. Szajner, Y. Burian (1989). Voltage compensation of an induction Generator with long-shunt connection. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 4, No. 3, pp. 526-530.
- [17] WAGNER, C. F. Self Excitation of Induction Motors. Vol. 58.. AIEE Transactions on Electrical Engineering, February 1939. P. 47-51.
- [18] CALDAS, F. P.; Um Estudo do Gerador de Indução Auto-excitado e Aplicações.
Dissertação de Mestrado; UFRJ; Rio de Janeiro; Agosto; 1987.
- [19] BASSET, E. D.; POTTER, F. M; Capacitive Excitation of Induction Generators. Transactions AIEE; Vol. 54; pp. 540 . 545; 1935.
- [20] BRENNEN, M. B.; ABBONDANT, A.; Static Exciters for Induction Generators. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-13, no. 5, pp 422 . 428, September, 1977.
- [21] BIM, E. Máquinas elétricas e acionamentos: Elsevier, 2009.