

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALLAN GREGORI DE CASTRO

**ANÁLISE DE REGIME PERMANENTE E IMPLEMENTAÇÃO DE
SISTEMA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO EM MICROGERADORES DE
INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO AUTOEXCITADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

ALLAN GREGORI DE CASTRO

**ANÁLISE DE REGIME PERMANENTE E IMPLEMENTAÇÃO DE
SISTEMA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO EM MICROGERADORES
DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO AUTOEXCITADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Beatriz Antonina Fontana de Vargas

Coorientador: Fabio Luiz Bertotti

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ANÁLISE DE REGIME PERMANENTE E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO EM MICROGERADORES DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO AUTOEXCITADOS**, do aluno **ALLAN GREGORI DE CASTRO** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **18** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Beatriz Antonina Fontana de Vargas

Fabio Luiz Bertotti

Everton Luiz De Aguiar

Ricardo Vasques de Oliveira

É muito melhor ousar conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.

Theodore Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo incentivo e apoio imprescindível.

À Heloiza Candeia Ruthes pelo grandioso amor, incentivo e compreensão.

À Orientadora Beatriz Fontana de Vargas por ter acolhido este trabalho e pela grandiosa orientação.

Ao Coorientador Fábio Luiz Bertotti pelas contribuições e atenção investida no trabalho.

Ao Professor José Fabio Kolzer, pela grande contribuição e dedicação à este trabalho.

Aos acadêmicos funcionários da Sala de Apoio do Departamento de Elétrica, Diego J. Ferreto, Ismael Perin e Marlon Grando pelo apoio e contribuições recebidas durante a etapa laboratorial do trabalho.

Aos muitos outros colegas acadêmicos pela amizade e que, de forma ou outra, apoiaram e contribuíram com a realização deste trabalho.

RESUMO

DE CASTRO, Allan Gregori. Análise de regime permanente e implementação de sistema de regulação de tensão em microgeradores de indução gaiola de esquilo auto-excitados. 2014. 68 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2014.

Este trabalho consiste no estudo da máquina de indução gaiola de esquilo de pequeno porte a fim de avaliar sua aplicabilidade como gerador na alimentação de sistemas isolados da rede elétrica. Para isso analisa-se o regime permanente do gerador de indução autoexcitado no que diz respeito à regulação de tensão e frequência, comparando esta análise com experimentação em laboratório de duas máquina de pequeno porte. Além disso, admitido um gerador de indução com velocidade de acionamento constante, é implementado um regulador de tensão à capacitores *shunt* chaveados. Esse regulador permite o gerador operar da condição a vazio à plena carga com variação limitada de tensão de regime permanente. Entretanto, o sistema é funcional para cargas resistivas e seu desempenho é degradado quando consideradas cargas indutivas.

Palavras-chave: Gerador de indução autoexcitado, regulação de tensão, regime permanente.

ABSTRACT

DE CASTRO, Allan Gregori. Steady state analysis and implementation of voltage regulation system in squirrel cage self-excited induction microgenerators . 2014. 68 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Electrical Engineering Department, Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, PR, 2014.

This paper consists in a study of squirrel cage induction machine in order to evaluate its applicability as generator, feeding isolated loads. For this it's analysed the steady state of self-excited induction generator regarding frequency and voltage regulation, comparing this analysis to practical experimentation of two small power machines. Furthermore, considering a induction machine driven at constant speed, it's implemented a switched-capacitor voltage regulator. This device allows the induction generator operate from no load to maximum power condition with limited variation of steady steady voltage . However, the system is functional for resistive loads and its performance is degraded when considered inductive loads.

Keywords: Self-excited induction generator, voltage regulation, steady state.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Enrolamento do rotor gaiola de esquilo.	19
Figura 2:	Circuito elétrico do motor de indução em regime permanente. . .	19
Figura 3:	Fluxo de potência da máquina de indução na motorização. . . .	20
Figura 4:	Conjugado eletromecânico de uma máquina de indução em função da velocidade mecânica.	21
Figura 5:	Fluxo de potência da máquina de indução na geração.	22
Figura 6:	Circuito do SEIG em regime permanente.	23
Figura 7:	Gerador de indução isolado excitado por banco de capacitores. . .	24
Figura 8:	Característica da tensão gerada em função da potência da carga para velocidade v e excitação X_C fixas.	25
Figura 9:	Curvas características do conjugado do gerador em função da velocidade do rotor.	26
Figura 10:	Curvas características de magnetização do gerador de indução e curvas de reatância capacitiva de excitação.	26
Figura 11:	Circuito aproximado de Doxey do gerador de indução auto-excitado em regime permanente.	29
Figura 12:	Circuito aproximado de impedâncias paralelas de Doxey.	29
Figura 13:	Circuito de impedâncias equivalentes do gerador de indução. . .	31
Figura 14:	Polinômio de aproximação V_t/F em função de X_m para o modelo de Doxey da máquina de 5 cv.	35
Figura 15:	Polinômio de aproximação V_t/F em função de X_m para o modelo de Doxey da máquina de 1,5 cv.	35
Figura 16:	Polinômio de aproximação V_g/F em função de X_m para o modelo de impedâncias da máquina de 5 cv.	36
Figura 17:	Polinômio de aproximação V_g/F em função de X_m para o modelo de impedâncias da máquina de 1,5 cv.	36

Figura 18:	Regulação de tensão do gerador de indução autoexcitado de 5 cv	38
Figura 19:	Regulação de tensão do gerador de indução autoexcitado de 1,5 cv	38
Figura 20:	Regulação de frequência do gerador de indução autoexcitado de 5 cv	39
Figura 21:	Regulação de frequência do gerador de indução autoexcitado de 1,5 cv	39
Figura 22:	Técnicas apresentadas na literatura para controle da tensão do SEIG.	43
Figura 23:	Comportamento da tensão de terminal para diferentes capacitâncias de excitação (curvas tracejadas); e formato da tensão regulada por chaveamento de capacitores (curvas contínuas). .	44
Figura 24:	Limites de tensão e frequência para operação de máquinas de indução, estabelecidos pela norma brasileira NBR 7094.	45
Figura 25:	Capacitância para V_t constante em função da carga.	47
Figura 26:	Regulação de tensão com chaveamento de capacitores.	48
Figura 27:	Regulação de frequência com chaveamento de capacitores. . .	49
Figura 28:	Relacionamento do desempenho do gerador com regulador e os limites de operação estabelecidos pela NBR 7094.	50
Figura 29:	Previsão de regulação de tensão para os capacitores $C'_0 = 186 \mu F$, $C'_1 = 216 \mu F$ e $C'_2 = 246 \mu F$	51
Figura 30:	Previsão de regulação de frequência para os capacitores disponíveis.	51
Figura 31:	Previsão de desempenho teórico da tensão e frequência normalizados comparados aos limites da norma NBR 7094.	52
Figura 32:	Estrutura geral do sistema regulador de tensão implementado. .	52
Figura 33:	Circuito de condicionamento de sinal: sensor de tensão.	53
Figura 34:	Máquina de Estados implementada no microcontrolador.	54
Figura 35:	Circuito de acionamento dos capacitores.	55

Figura 36: Banco de Capacitores Controlados (Regulador de tensão do gerador de indução).	56
Figura 37: Bancada de Ensaio do Gerador de Indução Autoexcitado com regulador de tensão.	57
Figura 38: Resultados teóricos e experimentais de regulação de tensão para o gerador de indução com regulador.	57
Figura 39: Resultados teóricos e experimentais de regulação de frequência para o gerador de indução com regulador.	58
Figura 40: Resultados teóricos e experimentais de tensão e frequência normalizados comparados aos limites da norma NBR 7094.	59
Figura 41: Mudança no perfil de tensão em regime permanente em função do fator de potência da carga para o regulador à capacitores chaveados.	60

LISTA DE TABELAS

1	Dados de placa das máquinas utilizadas.	33
2	Parâmetros por fase Y dos geradores.	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente alternada.
SEIG	<i>Self-excited induction generator - Gerador de indução autoexcitado.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V_t	Tensão de terminal
R_s	Resistência do estator
X_s	Reatância do estator
R_r	Resistência do rotor
X_r	Reatância do rotor
R_c	Resistência de perdas no núcleo
X_m	Reatância de magnetização
s	Escorregamento
P_{rot}	Perdas rotacionais
P_{Fe}	Perdas no ferro
P_{cuc}	Perdas no cobre do estator
P_{cur}	Perdas no cobre do rotor
n_s	Velocidade síncrona
X_C	Reatância de excitação
R_L	Resistência de carga
X_L	Reatância de carga
F	Frequência por unidade
v	Velocidade por unidade
V_g	Tensão de entreferro
I_s	Corrente no estator da máquina de indução
C_{ca}	Banco de Capacitores
\vec{Z}_1	Impedância equivalente do estator
\vec{Z}_2	Impedância equivalente do rotor e núcleo da máquina
\vec{Z}_3	Impedância equivalente da carga e capacitor de excitação
P	Potência Ativa
V	Tensão
I	Corrente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS GERAIS	16
1.2.1 Objetivos Específicos	17
2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO	18
2.1 OPERAÇÃO COMO MOTOR	20
2.2 OPERAÇÃO COMO GERADOR	21
2.2.1 O problema da queda de tensão do SEIG	24
3 MODELOS TEÓRICOS DE ANÁLISE DO SEIG	28
3.1 MODELO DE DOXEY	28
3.2 MODELO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE	30
4 MÁQUINAS DE TESTE	33
4.1 DADOS DA MÁQUINA	33
4.1.1 Parâmetros da máquina	34
4.1.2 Polinômio do modelo de Doxey	34
4.1.3 Polinômio do modelo das impedâncias equivalentes	35
5 RESULTADOS COMPARADOS ENTRE MÉTODOS E EXPERIMENTAÇÃO	37
6 ESTRATÉGIAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO	42
6.1 REGULADOR À CAPACITORES COMUTADOS	43
6.1.1 Dimensionamento dos capacitores	46
6.1.2 Construção do regulador	50
6.1.3 Etapa de condicionamento de sinal	53
6.1.4 Etapa de sistemas microcontrolados	53
6.1.5 Etapa de circuito de acionamento	55

6.1.6 Desempenho experimental do regulador	56
7 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A - POLINÔMIOS V_T/FxX_M	67
APÊNDICE B - POLINÔMIOS V_G/FxX_M	68

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis hoje estabelecem-se como a predominante fonte primária de energia consumida no mundo (EIA, 2011).

A posição dominante dos combustíveis fósseis na matriz energética pode ser associada ao impulso de seu consumo proporcionado pela popularização dos automóveis com motores à combustão interna, certos sistemas de produção de energia e outros processos industriais ainda no século XIX. Atualmente os setores mais dependentes dessas fontes em escala mundial são o de geração de energia elétrica, de transportes e industrial (EIA, 2011).

Sobre o setor elétrico, em 2008, cerca de 41% da energia elétrica produzida no mundo provinha do carvão mineral (IEA, 2008). Soma-se a este dado o fato de que os Estados Unidos, maior consumidor de petróleo do mundo, 66% da geração de energia elétrica se dá à partir de fontes fósseis, contra apenas 9% provinda de energias renováveis (EIA, 2011).

Combustíveis fósseis são, objetivamente, fontes finitas de energia com altos índices de poluição atmosférica. Diante disso, compreende-se o engajamento da comunidade científica no desenvolvimento soluções sustentáveis para não só atender a demanda crescente de energia mundial, mas também para tentar diversificar a matriz de consumo, trazendo maior participação de fontes renováveis.

Um destaque na utilização de fontes renováveis está na sua menor emissão de poluentes e também o fato de serem, em alguns casos, inesgotáveis (energia eólica e solar, por exemplo). Esta diferença de características em relação aos combustíveis fósseis serve como incentivo para buscar o desenvolvimento sistemas de geração de energia elétrica baseadas apenas em fontes renováveis.

Nesse contexto, este trabalho se concentra no setor de autoprodução de energia elétrica por consumidores com potencial de microgeração em áreas isoladas¹. O motivo deste foco é que a autoprodução em áreas remotas está fortemente rela-

¹Define-se autoprodução como a geração de eletricidade a partir de instalações próprias, localizadas junto às unidades de consumo, e que não utiliza a rede elétrica de distribuição de concessionárias (EPE, 2012).

cionada à fontes renováveis, uma vez da grande oferta dessas fontes nessas regiões. Além disso, produção de energia elétrica de forma isolada é um meio de abastecimento de consumidores em áreas onde a rede de distribuição não alcança, ou sua expansão não é economicamente viável. Pode-se destacar ainda que a autoprodução não é vulnerável às falhas das redes das concessionárias.

A microgeração é definida pela Resolução nº482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como central de geração com potência instalada inferior à 100KW (ANEEL, 2012). No âmbito da microgeração de eletricidade isolada da rede, o gerador de indução autoexcitado (do inglês SEIG, *self-excited induction generator*) é um dispositivo que vem crescentemente sendo usado e é frequentemente comparada de modo favorável aos demais tipos de máquinas elétricas devido a características como seu custo reduzido e robustez, o que condiz com a atratividade necessária ao consumidor de pequeno porte (HAQUE, 2008).

Apesar as vantagens existentes, o SEIG sofre de inerente baixa regulação de tensão. Isso porque a frequência e a amplitude da tensão do gerador dependem de características como parâmetros da máquina, capacitância de auto-excitação, condições de carga e velocidade de acionamento (BANSAL, 2005; SIMÕES; FARRET, 2008; HAQUE, 2008).

A essência do controle da tensão do SEIG, para mantê-la estável e em níveis adequados, é o controle da potência reativa capacitiva fornecida ao gerador para excitação de seu campo. Numerosos métodos são apresentados em literatura para um controle discreto ou contínuo desta potência reativa, como dispositivos SVC, STATCOM, indutores controlados entre outros. Contudo, sistemas aplicados aos microgeradores isolados da rede devem ser de baixo custo, confiáveis e robustos, tal que seja mínima a necessidade de manutenção (HAQUE, 2008).

Tendo em vista este segmento da microgeração de eletricidade de forma isolada, os esforços deste trabalho estão concentrados na proposta de avaliar o desempenho da regulação de tensão e frequência do SEIG, por meio de modelagem e experimentação, bem como implementar um sistema discreto para controle da tensão desta máquina.

1.1 JUSTIFICATIVA

No contexto de análise teórica do gerador de indução, o estudo do desempenho em regime permanente é importante pois possibilita o planejamento de ações para controle da máquina.

Diversos modelos são apresentados na literatura para análise do SEIG como: modelo de Doxey, modelo das Impedâncias, modelo das Admitâncias, modelo d-q entre outros (BANSAL, 2005)(SIMÕES; FARRET, 2008). Dentre esses, o modelo de Doxey para análise de regime permanente é uma variação do modelo de Impedâncias, no sentido de que aproximações são feitas a fim reduzir a complexidade matemática da análise. Contudo, estas aproximações podem comprometer a confiabilidade dos resultados, e é por isso que este trabalho propõe comparar resultados experimentais com as predições teóricas dos modelos de Doxey e de Impedâncias.

Além disso, é interessante que microcentrais isoladas da rede tenham como característica um baixo custo de implantação, e de manutenção, para que se tornem atrativas frente ao investimento na extensão da rede. O gerador assíncrono se apresenta como uma máquina que dispõe da vantagem do baixo custo, comparado a outras máquinas geradoras, mas também possui a desvantagem da má regulação de tensão. Para o controle de sua tensão, uma série de meios tem sido apresentados em literatura. No entanto, sistemas sofisticados, como SVC e STATCOM, necessitam um investimento elevado tal que pode comprometer a atratividade econômica do emprego do gerador de indução (HAQUE, 2008).

Além da análise teórica para avaliar o grau que os modelos refletem o comportamento real da máquina, este trabalho estuda e implementa um sistema condizente ao consumidor de pequeno porte que controle a tensão do gerador de forma satisfatória.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Dois objetivos principais são contemplados por este trabalho. Primeiramente, é analisada a regulação de tensão e frequência em regime permanente da máquina de indução atuando como gerador autoexcitado, isolado da rede. Esta análise se dará pela comparação entre resultados de modelos teóricos e a experimentação laboratorial de duas máquinas de diferentes potências, de pequeno porte, mantendo a

velocidade de acionamento constante.

O segundo objetivo deste trabalho é implementar um sistema microcontrolado para monitoramento do sistema, atuando em um banco de capacitores para compensação automática de reativos afim de controlar a tensão nos terminais do gerador assíncrono.

1.2.1 *Objetivos Específicos*

- (a) Estudar o comportamento da máquina assíncrona em operação em regime permanente como gerador isolado da rede elétrica;
- (b) Estudar e simular a modelagem de análise de regime permanente do gerador de indução auto-excitado em termos da regulação de tensão e frequência;
- (c) Experimentar duas máquinas assíncronas de diferentes potências atuando como gerador para levantamento das características de regulação de tensão e frequência;
- (d) Avaliar os erros associados aos modelos de regime permanente do gerador pela comparação entre simulação e experimentação;
- (e) Implementar um sistema de controle da tensão do gerador baseado em banco de capacitores chaveados para fornecimento de reativos ao sistema utilizando um microcontrolador monitorando tensão e corrente nos terminais do gerador;
- (f) Avaliar a regulação de tensão de uma máquina quando aplicado o sistema implementado.

2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO

As máquinas elétricas são elementos conversores eletromecânicos de energia. Esta conversão de energia refere-se ao relacionamento de forças elétricas e magnéticas com forças mecânicas aplicadas à matéria e ao movimento. Como resultado desta relação, energia mecânica pode ser convertida em energia elétrica e vice-versa.(SIMONE, 2000; KOSOW, 2005; FITZGERALD *et al.*, 2006)

As máquinas elétricas assumem diversas topologias e são conhecidas por diversos nomes: máquina de corrente contínua, síncronas, de ímã permanente, de indução, de relutância variável, de histerese, entre outras.

Dentre as máquinas citadas, a máquina de indução é a que apresenta o maior número de unidades em operação (SIMONE, 2000). Isso porque possui características como simplicidade construtiva, robustez e custo relativamente pequeno, quando comparado ao custo de uma máquina de corrente contínua ou de uma máquina síncrona de igual potência.(SIMONE, 2000)

Dentro da categoria de máquinas de indução existem duas classificações conforme a construção dos rotores dessas máquinas: máquinas de rotor bobinado e máquinas com rotor gaiola de esquilo. O rotor bobinado é construído na forma de um enrolamento polifásico, sendo seus terminais conectados a anéis deslizantes montados sobre o eixo. Máquinas de rotor bobinado são relativamente incomuns e mais caras que as máquinas gaiola de esquilo.

O rotor gaiola de esquilo consiste em barras condutoras encaixadas em ranhuras no ferro do rotor, estando todas curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores, como pode ser visto na figura 1. A simplicidade e a robustez da construção da máquina de indução gaiola de esquilo fazem sua operação como motor ser muito popular.

O modelo elétrico que representa a máquina de indução em regime permanente está apresentado na figura 2.

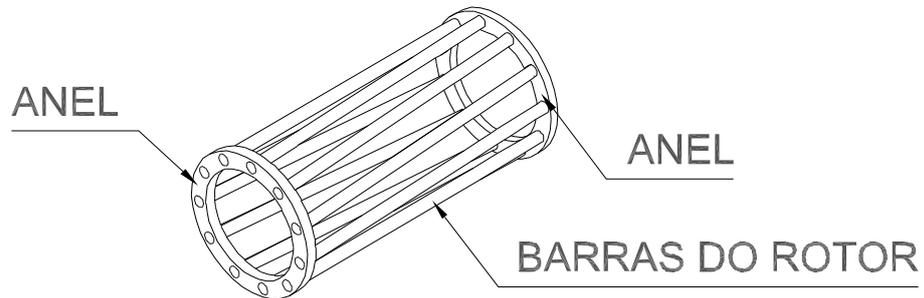


Figura 1: Enrolamento do rotor gaiola de esquilo.
Fonte: Adaptado de Braga (2002)

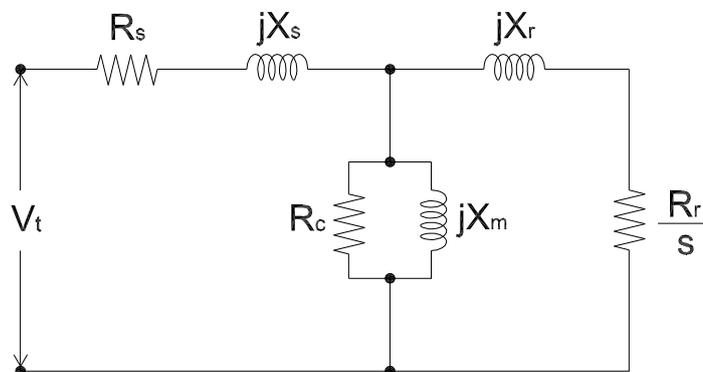


Figura 2: Circuito elétrico do motor de indução em regime permanente.
Fonte: Adaptado de Fitzgerald *et al.* (2006).

Para a máquina gaiola de esquilo, no circuito da figura 2 os parâmetros são:

V_t : tensão de terminal por fase;

R_s : resistência dos enrolamentos do estator;

X_s : reatância de fluxo disperso no estator;

R_r : resistência dos enrolamentos do rotor;

X_r : reatância de fluxo disperso no rotor;

R_c : resistência de perdas no núcleo;

X_m : reatância de magnetização;

s : escorregamento.

O modelo da figura 2 é capaz de informar o comportamento e desempenho do motor de indução em regime permanente. É a partir deste modelo que inicia-se o estudo em regime permanente da máquina de indução atuando como gerador. O

estudo de comportamento transitório da máquina não é contemplada neste trabalho.

2.1 OPERAÇÃO COMO MOTOR

Em sua operação como motor, a potência elétrica requisitada pela máquina é fornecida geralmente por uma rede trifásica. Deste montante de potência, a parte reativa é destinada ao estabelecimento de campo magnético na máquina e a parcela ativa para estabelecimento de potência mecânica útil e suprimento de perdas ativas. Estas perdas ativas são classificadas como:

- Perdas rotacionais P_{rot} : Perdas por atrito em rolamentos e a ventilação forçada;
- Perdas no núcleo P_{Fe} : Perdas por histerese e correntes de Foucault;
- Perdas no cobre no estator e rotor, P_{cue} e P_{cur} : Perdas devido à resistência ôhmica do estator e rotor, respectivamente.

A figura 3 ilustra o fluxo de potência na máquina de indução operando como motor.

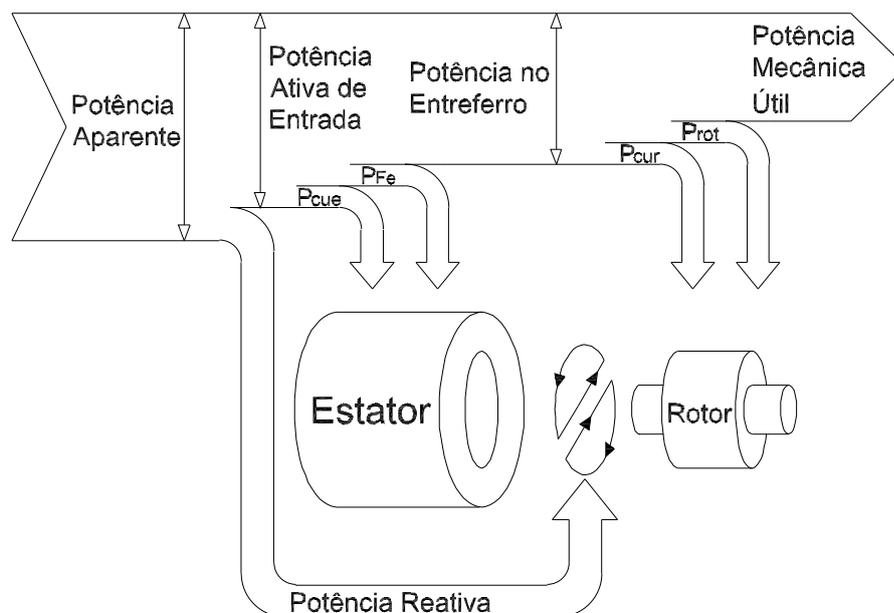


Figura 3: Fluxo de potência da máquina de indução na motorização.
Fonte: Adaptado de Braga (2002)

2.2 OPERAÇÃO COMO GERADOR

A primeira possibilidade de usar o motor de indução como gerador foi mencionada em 1893 (CHAPALLAZ *et al.*, 1990). Este tema foi tratado em muitos trabalhos que estudam máquinas elétricas, porém só recebeu grande impulso na década de 80 (SIMONE, 2000).

A operação de uma máquina assíncrona como gerador pode acontecer de duas maneiras: conectada à rede ou isolado da rede.

Quando conectado à rede, a passagem do modo de operação como motor para gerador é alcançado acionando o rotor da máquina de indução no mesmo sentido de rotação em velocidade superior à velocidade síncrona imposta pela frequência da rede. Este fato pode ser visto na figura 4, que representa o torque eletromecânico da máquina de indução em função da velocidade mecânica.

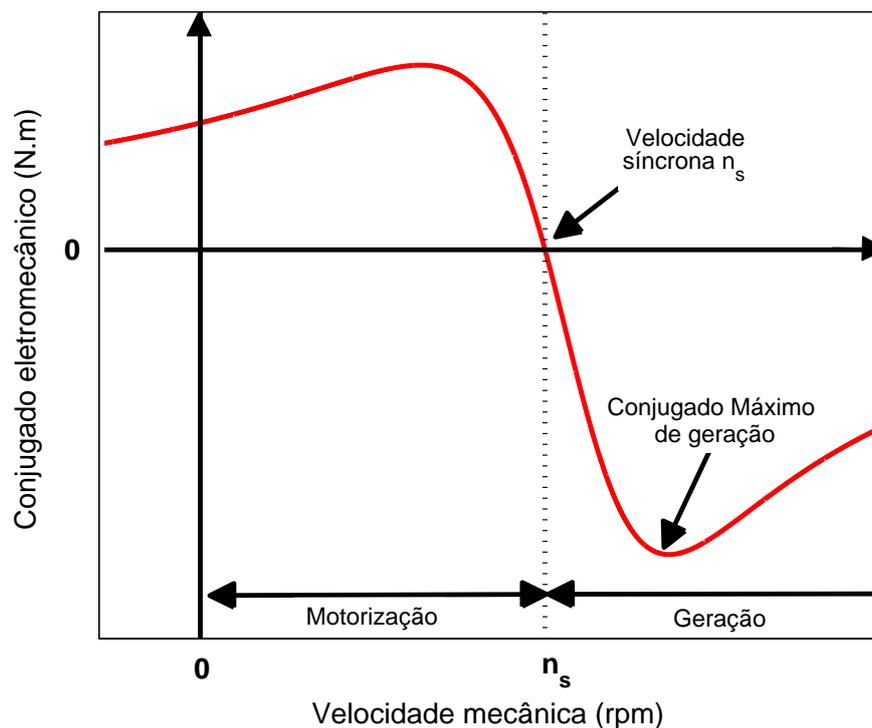


Figura 4: Conjugado eletromecânico de uma máquina de indução em função da velocidade mecânica.

Fonte: Autoria própria

Na figura 4 é possível visualizar que se uma máquina primária acionar a máquina de indução acima da velocidade síncrona n_s , será invertido o sentido do

torque eletromecânico da máquina de indução, a qual passa a operar como gerador. Acima da velocidade síncrona, conforme se aumenta o torque fornecido ao gerador, maior fluxo de potência ativa no sentido da rede até o ponto de máximo torque de geração, indicado na figura 4. A imposição de um conjugado maior ao máximo torque de geração provocará uma aceleração excessiva do gerador.

Dentre as vantagens do gerador tipo gaiola estão a sua simplicidade de operação e manutenção, o não uso de escovas, robusta construção, baixo custo comparada à outras máquinas de mesma potência, boa resposta dinâmica, baixa contribuição em faltas no sistema, autoproteção contra severas sobrecargas e curto-circuitos, e capacidade de geração sob velocidade variável. Além disso, o gerador de indução não requer excitação por fonte auxiliar CC ou equipamentos como reostato de campo, e, portanto requer menos manutenção (PALWALIA; SINGH, 2008; ORS, 2008).

Apesar das vantagens enunciadas, posto que a máquina de indução não possui um circuito de excitação dedicado, um gerador de indução não pode produzir energia reativa (CHAPMAN, 2005). Por isso, o gerador de indução exige que meios externos o forneçam potência reativa. Isto está ilustrado a partir da figura 5, que apresenta o fluxo de potência da máquina de indução operando como gerador, na qual se pode ver que a potência reativa provém do sistema conectado aos terminais elétricos da máquina.

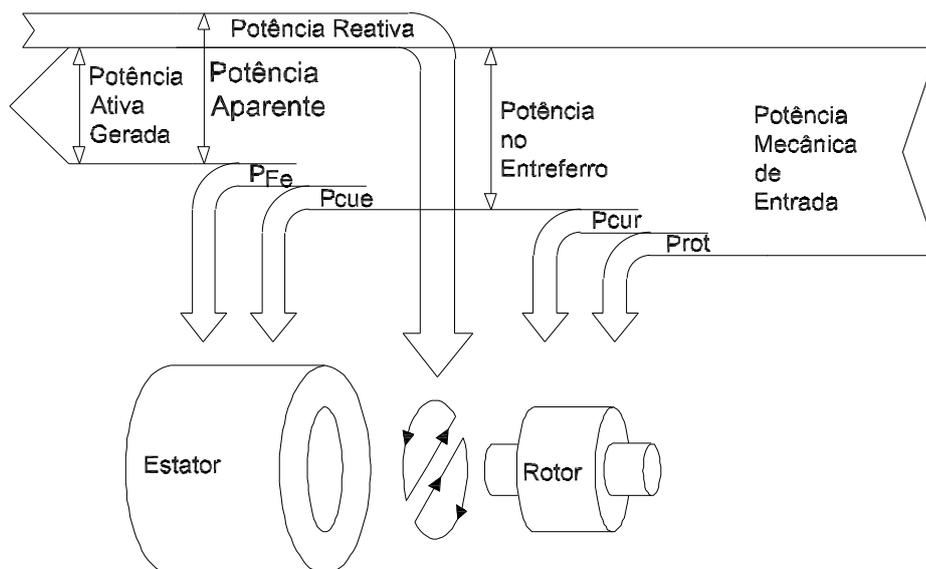


Figura 5: Fluxo de potência da máquina de indução na geração.
 Fonte: Adaptado de Braga (2002)

Em outras palavras, a potência reativa, fundamental para produzir campo magnético, não pode ser fornecida pela potência mecânica de entrada ou pelo rotor gaiola de esquilo. Desta forma, a única maneira da máquina de indução operar como gerador é se houver uma fonte externa de potência reativa.

De fato, quando conectado à rede da concessionária, a máquina demanda do sistema esta energia para manutenção de seu campo magnético.

Já quando em operação isolada do gerador de indução, a maneira mais simples de providenciar a energia reativa é pela conexão de um banco de capacitores aos terminais da máquina.

Além da desvantagem da necessidade de excitação externa, o gerador de indução operando de forma isolada apresenta insatisfatória regulação de tensão e frequência (BANSAL, 2005). Este comportamento é devido ao fato da tensão e frequência gerada dependerem dos fatores: velocidade de acionamento, parâmetros da máquina, capacitância de excitação externa e condições de carga (PALWALIA; SINGH, 2008; HAQUE, 2008). No entanto esta baixa regulação pode ser controlada e muitas são as soluções técnicas apresentadas em literatura (CHAUHAN *et al.*, 2010).

O circuito de impedâncias por fase Y completo que representa a operação em regime permanente da máquina de indução como gerador está apresentado na figura 6, que inclui o capacitor de excitação X_C e a carga (R_L e X_L) por fase conectada aos terminais da máquina¹. A impedância R_c da máquina é comumente desprezada nas análises de regime permanente na literatura devido as baixas perdas no núcleo.

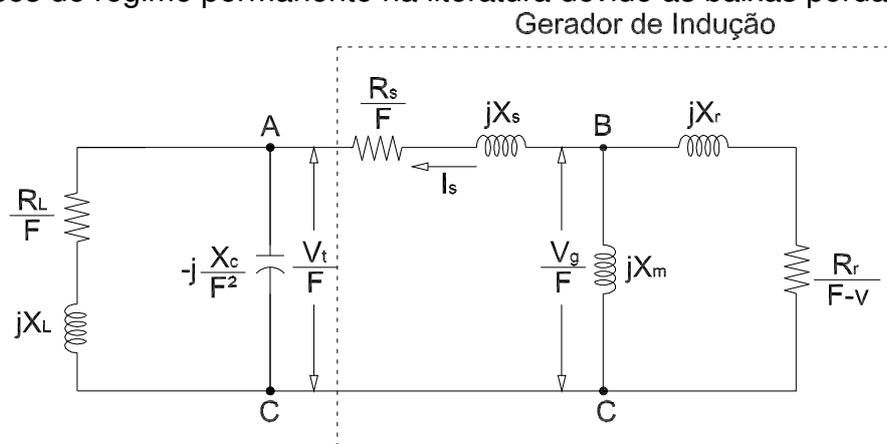


Figura 6: Circuito do SEIG em regime permanente.
Fonte: Adaptado de Haque (2008)

¹A dedução deste circuito pode ser encontrada na obra de Simões e Farret (2008).

A variável F inserida no modelo (figura 6) é denominada frequência por unidade, a variável v é denominada velocidade de acionamento por unidade, V_g é a tensão no entreferro e I_s é a corrente gerada pela máquina.

2.2.1 O problema da queda de tensão do SEIG

A figura 7 apresenta um sistema no qual uma carga isolada é alimentada por um gerador de indução excitado por um banco fixo de capacitores (C_{ca}). Nestas circunstâncias, a potência demandada pela carga CA (Corrente Alternada) influencia consideravelmente a amplitude e frequência da tensão do gerador, mesmo que a velocidade seja mantida constante pelo regulador de velocidade.

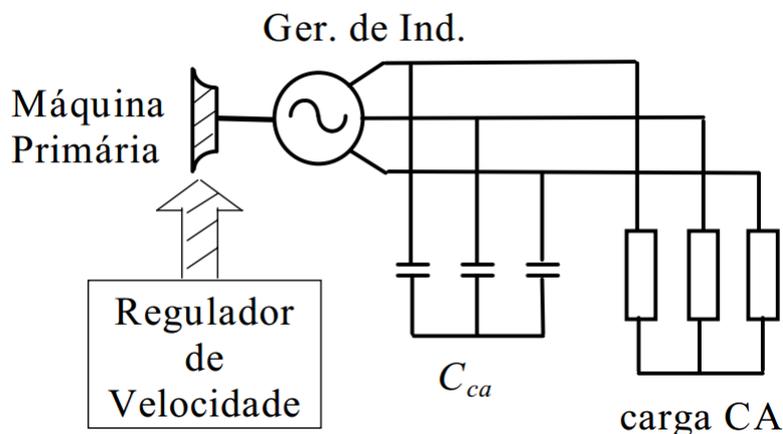


Figura 7: Gerador de indução isolado excitado por banco de capacitores.

Fonte: (MARRA; POMILIO, 2000)

O comportamento em regime permanente da amplitude da tensão do gerador com a elevação da potência da carga pode ser vista na figura 8 (o comportamento da frequência obedece o mesmo formato). Nesta figura pode-se visualizar não só a queda de tensão que ocorre com o aumento da carga mas também o limite de potência que o gerador é capaz de fornecer nestas circunstâncias de velocidade e excitação fixas.

Cargas que exigem uma potência maior que $P_{m\acute{a}x}$ promovem a perda da auto-excitação da máquina e a interrupção de fornecimento de energia. No entanto, a simples diminuição de uma impedância de carga Z_L além do ponto de máxima potência faz com que a máquina entre na região anormal de operação, $\partial P_L / \partial V_t > 0$.

Para explicar o fenômeno de queda de tensão do gerador em velocidade

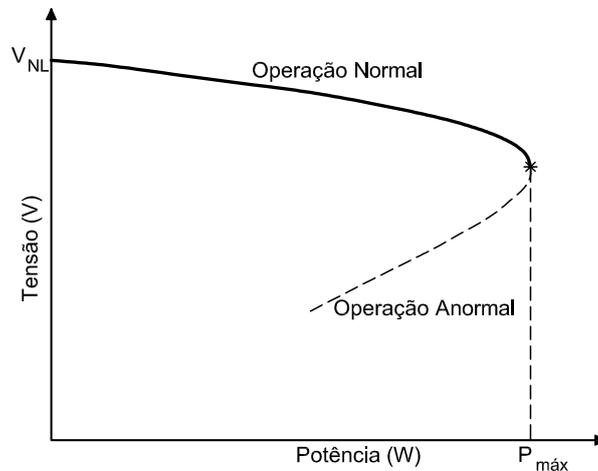


Figura 8: Característica da tensão gerada em função da potência da carga para velocidade v e excitação X_C fixas.

Fonte: Adaptado de Haque (2008).

constante mostrado na figura 8 considera-se inicialmente, por simplicidade, as perdas rotacionais (P_{rot}), perdas elétricas (P_{cur} , P_{cuc} e P_{Fe}) bem como perdas magnéticas desprezíveis. Com estas considerações a potência mecânica de entrada é integralmente convertida em potência ativa para a carga, de acordo com a figura 5.

A potência mecânica de entrada é dada pelo produto entre a velocidade angular do rotor e o conjugado no eixo do gerador. Se esta potência mecânica, conforme as simplificações, é a potência fornecida à carga, e a velocidade mecânica é mantida constante, o atendimento de um aumento da carga CA só é possível através da elevação do conjugado no eixo do gerador. A única maneira de elevar o conjugado no eixo do gerador nesta situação é com uma redução da frequência síncrona.

Este fato é ilustrado qualitativamente pela figura 9, onde um SEIG alimenta uma carga resistiva. O ponto 'A' é um ponto de operação estável, cujo produto do conjugado pela velocidade do rotor equivale à potência da carga CA, desconsiderando as perdas. Este ponto estável 'A' da figura 9 corresponde ao ponto 'A' da característica de magnetização do gerador de indução, na figura 10.

Um aumento da potência ativa na carga CA provoca queda na frequência síncrona de f_{s1} para f_{s2} , produzindo assim um aumento de conjugado desenvolvido pelo gerador. Desta forma, a potência elétrica gerada aumenta, satisfazendo a demanda da carga CA, conduzindo ao novo ponto estável 'B', lembrando que o regulador de velocidade mantém a operação em regime em velocidade constante.

A queda na frequência síncrona para o valor f_{s2} reduz a tensão de terminal

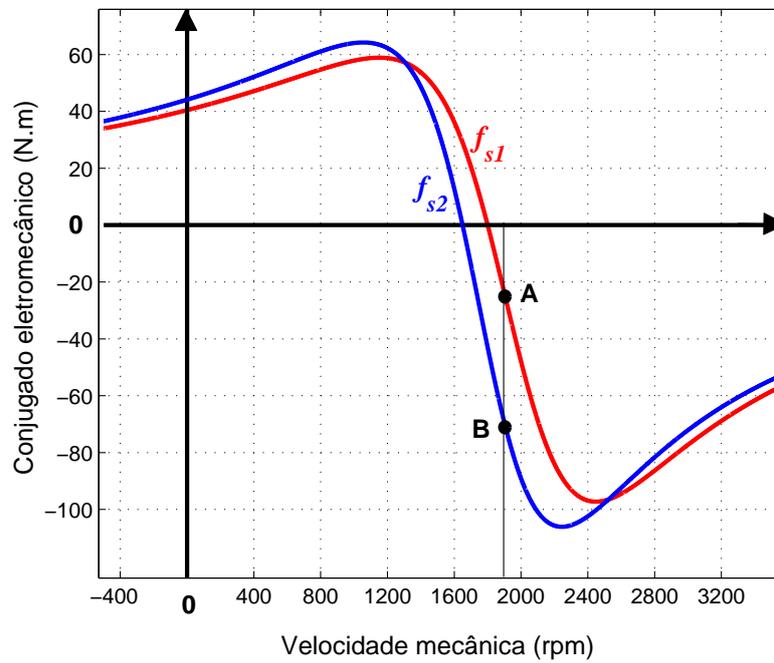


Figura 9: Curvas características do conjugado do gerador em função da velocidade do rotor.
 Fonte: Adaptado de Marra e Pomilio (2000).

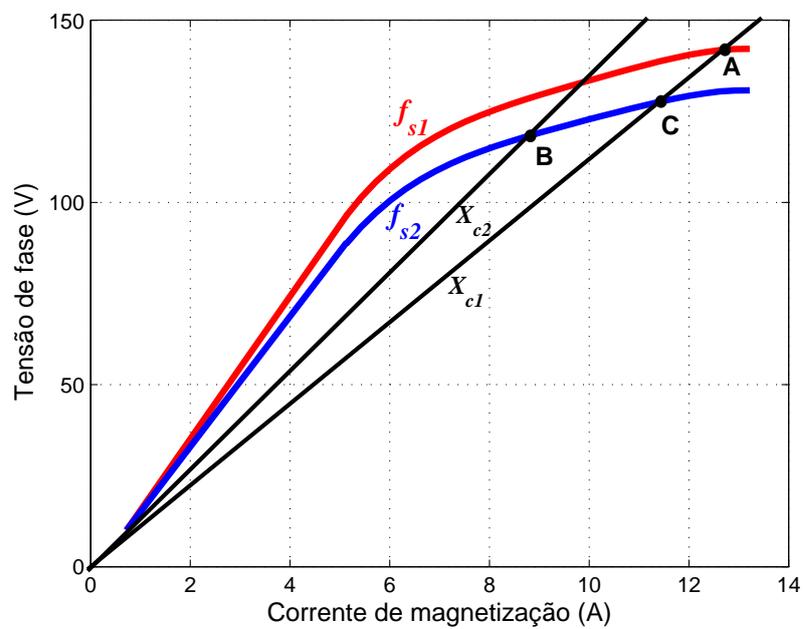


Figura 10: Curvas características de magnetização do gerador de indução e curvas de reatância capacitiva de excitação.
 Fonte: Adaptado de Marra e Pomilio (2000)

do gerador, do ponto 'A' na figura 10 para o ponto 'B'. Isso porque a redução da frequência síncrona altera não só a curva de magnetização da máquina, mas também a curva característica da reatância capacitiva de X_{C1} para a curva X_{C2} do banco de capacitores, que obedece a equação (1).

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot C_{ca}} \quad (1)$$

Se nesta circunstância de maior carga CA, for aumentado o valor de X_{C2} com intuito de recuperar o valor inicial X_{C1} , o novo ponto de operação será o ponto 'C' da figura 10, e não o ponto 'A' pois a máquina permanece operando com frequência f_{s2} (MARRA; POMILIO, 2000).

Em resumo, o principal fator para a queda de tensão terminal do gerador de indução é a diminuição da frequência síncrona por conta do aumento da potência da carga e conseqüentemente a alteração da curva de magnetização do gerador e da curva de reatância capacitiva do banco de capacitores.

É válido ressaltar que este fenômeno de queda de tensão é intensificado quando consideradas as quedas de tensão nas resistências e indutâncias de dispersão da máquina. Além disso, elevação de cargas CA indutivas e variação de velocidade de acionamento também deterioram da regulação de tensão do gerador. (MARRA; POMILIO, 2000)

3 MODELOS TEÓRICOS DE ANÁLISE DO SEIG

Nas seções seguintes serão apresentados os dois modelos que este trabalho utiliza e compara para análise do SEIG: modelo de Doxey e modelo de Impedâncias. O objetivo é apresentar a metodologia dos modelos e posteriormente comparar seus resultados preditos com o ensaio prático de duas máquinas assíncronas.

O interesse na comparação dos resultados para duas máquinas de diferentes potências está no fato de se verificar se existe influência da potência nominal da máquina na exatidão dos modelos.

O modelo de Doxey prevê a alteração do circuito da máquina de indução a fim de reduzir a complexidade matemática de seu estudo.

O método da impedância equivalente considera o circuito completo da figura 6 em sua análise e é bastante popular o seu emprego dentre as obras pesquisadas por deste trabalho.

3.1 MODELO DE DOXEY

A fim de reduzir a complexidade matemática da análise, o modelo de Doxey propõe o deslocamento do braço de magnetização junto ao terminal do estator, sob a justificativa de que esta aproximação não compromete a precisão dos resultados (SIMÕES; FARRET, 2008). A figura 11 apresenta o circuito aproximado de Doxey, no qual o braço de magnetização é deslocado aos terminais da máquina tal que a impedância do estator e rotor agora estão em série.

Além desta simplificação, a análise prossegue expressando em modelos paralelos. A impedância equivalente paralela do rotor e estator (R_p e X_p), bem como a impedância paralela da carga (R_{LP} e X_{LP}) podem ser vistas na figura 12. O índice ' p ' indica ser a representação paralela do elemento.

Do balanço de energia ativa e reativa do circuito da figura 6 obtêm-se expressões para o escorregamento s , equação (2), frequência por unidade F , equação

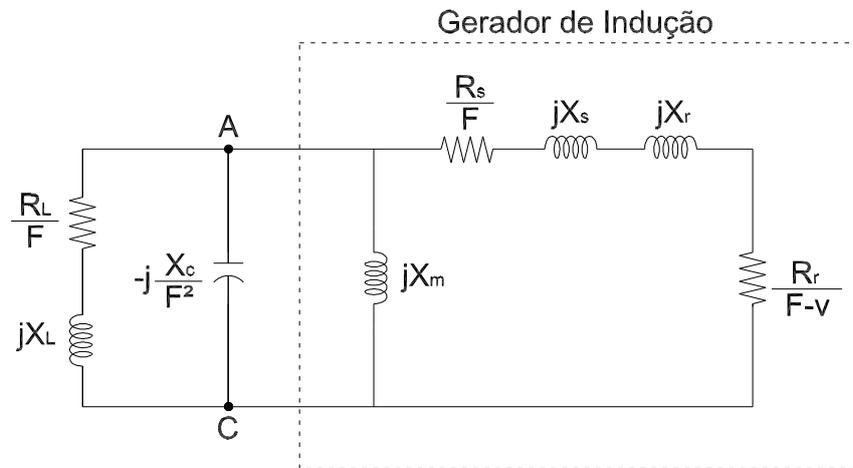


Figura 11: Circuito aproximado de Doxey do gerador de indução auto-excitado em regime permanente.

Fonte: Adaptado de Simões e Farret (2008)

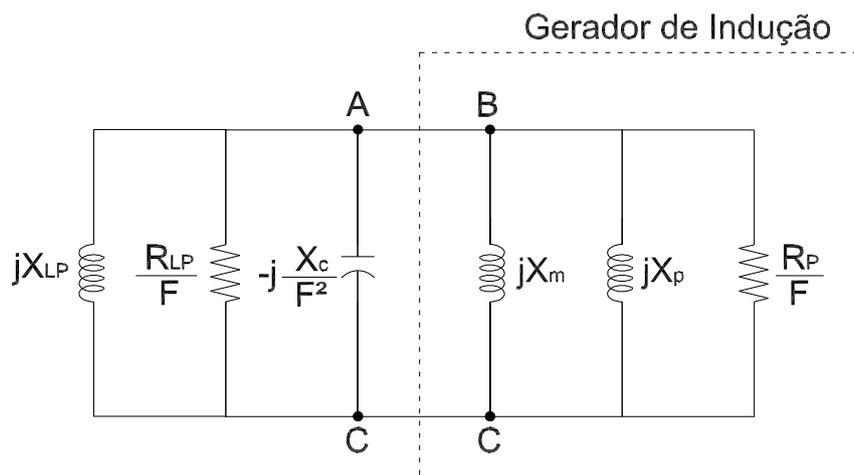


Figura 12: Circuito aproximado de impedâncias paralelas de Doxey.

Fonte: Adaptado de Simões e Farret (2008)

(3), e reatância de magnetização X_m , equação (4), para as dadas condições de parâmetros de máquina, carga Z_L e capacitância de excitação X_C . A análise que levam a tais expressões é detalhada em Simões e Farret (2008).

$$s = -\frac{R_r}{R_s + R_{LP}} \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{1 - s} \quad (3)$$

$$X_m = \frac{1}{\frac{F^2}{X_c} - \frac{1}{X_p} - \frac{1}{X_{LP}}} \quad (4)$$

Na equação (4), X_p é dado pela equação (5).

$$X_p = \frac{\left(\frac{R_s}{F} + \frac{R_r}{F_s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2}{X_s + X_r} \quad (5)$$

Com o valor de reatância de magnetização X_m obtido pela equação (4), é possível determinar diretamente a tensão de terminal V_t/F para o modelo de Doxey através da expressão (6), que é uma aproximação polinomial da curva de magnetização da máquina e a sua obtenção é detalhada no apêndiceA.

$$\frac{V_t}{F} = \frac{V_g}{F} = k_1 X_m^5 + k_2 X_m^4 + k_3 X_m^3 + k_4 X_m^2 + k_5 X_m + k_6 \quad (6)$$

A frequência gerada é obtida multiplicando-se a frequência por unidade F , obtida em (3), pela frequência de base, que neste trabalho é 60 Hz . Por fim, com os valores de amplitude e frequência da tensão gerada, é possível construir a curva de regulação de tensão e frequência em função da carga, que será comparada ao resultado do modelo das impedâncias nas secções seguintes.

3.2 MODELO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE

O modelo de impedância equivalente recebe este nome por expressar o circuito da figura 6 por meio de impedâncias série, como mostrado na figura 13. A partir da figura 6, \vec{Z}_1 , \vec{Z}_2 e \vec{Z}_3 são expressos pelas equações (7), (8) e (9), respectivamente. A impedância \vec{Z}_1 representa o estator. A impedância \vec{Z}_2 é a combinação paralela da impedância do rotor e do núcleo e a impedância \vec{Z}_3 é a combinação paralela da carga e o capacitor de excitação.

$$\vec{Z}_1 = \frac{R_s}{F} + jX_s \quad (7)$$

$$\vec{Z}_2 = \left(\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\frac{R_r}{F-v} + jX_r} \right)^{-1} \quad (8)$$

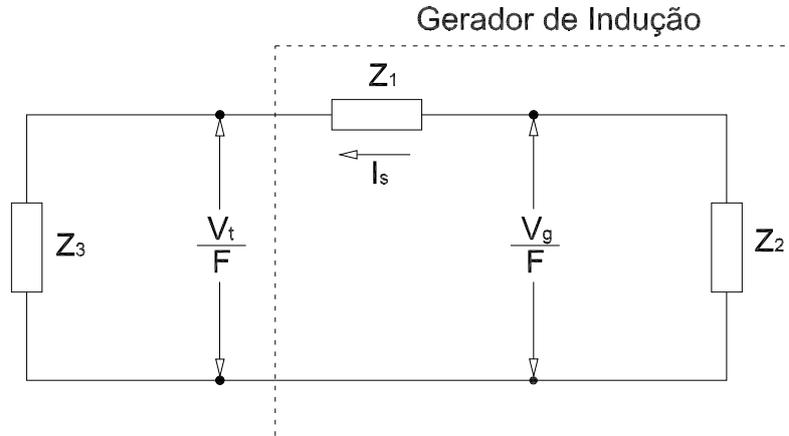


Figura 13: Circuito de impedâncias equivalentes do gerador de indução.

Fonte: Autoria própria.

$$\vec{Z}_3 = \left(\frac{1}{-\frac{jX_C}{F^2}} + \frac{1}{\frac{R_L}{F} + jX_L} \right)^{-1} \quad (9)$$

A análise prossegue aplicando a lei de Kirchoff das tensões sobre o circuito da figura 13, obtendo-se a equação (10).

$$\vec{I}_S (\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3) = 0 \quad (10)$$

Em condições normais de operação a corrente gerada I_s fornecida à carga é diferente de zero, e portanto solução da equação (10) se resume em resolver a equação (11).

$$\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3 = 0 \quad (11)$$

Se tratando de uma equação complexa, solucionar a equação (11) consiste em resolver separadamente suas partes real e imaginária. A solução deste sistema de equações escalares não lineares, $G(X_m, F)$, apresentada em (12), informa os valores de X_m e F para determinada condição de carga Z_L , velocidade v , capacitância de auto-excitação X_C e parâmetros da máquina.

$$G(X_m, F) = \begin{cases} \mathbf{Re}(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3) = 0 \\ \mathbf{Im}(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Assim que X_m e F são obtidos, a tensão de entreferro gerada V_g/F pode ser calculada a partir da expressão (13), que é uma representação polinomial derivada da curva de magnetização da máquina, onde as variáveis c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 e c_6 em cada máquina são constantes determinadas pela função 'polyfit' do software MATLAB. O procedimento de ensaio e cálculo para determinar a expressão (13) está disposta no apêndice B.

Assumindo a tensão de entreferro como referência, ($V_g \angle 0^\circ$), a tensão presente nos terminais é expressa por (14).

$$\frac{V_g}{F} = c_1 X_m^5 + c_2 X_m^4 + c_3 X_m^3 + c_4 X_m^2 + c_5 X_m + c_6 \quad (13)$$

$$\vec{V}_t = \vec{V}_g \frac{\vec{Z}_3}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_3} \quad (14)$$

Por consequência, a corrente da carga I_L e a potência ativa P_L consumida pela mesma são expressas, respectivamente, por (15) e (16).

$$\vec{I}_L = \frac{\vec{V}_t}{R_L + jFX_L} \quad (15)$$

$$P_L = 3|\vec{I}_L|R_L \quad (16)$$

Se para variadas condições de carga o sistema de equações (12) for solucionado, é possível então, a partir das equações (14) e (16) descrever graficamente o comportamento da tensão gerada por fase de terminal V_t em função da potência P_L fornecida à carga pelo gerador, possibilitando visualizar a regulação de tensão do SEIG com capacitância fixa de excitação. O mesmo pode ser repetido para a frequência gerada e então o comportamento da frequência em função da carga pode ser expresso graficamente.

4 MÁQUINAS DE TESTE

Utilizam-se duas máquinas assíncronas de pequeno porte para a etapa experimental deste trabalho. A Tabela 1 apresenta os dados de placa de ambas máquinas que serão comparadas em termos de exatidão dos modelos.

Tabela 1: Dados de placa das máquinas utilizadas.

Fabricante	WEG	WEG
Potência Nominal	5 cv	1,5 cv
Tensão Nominal	220 V	220 V
Corrente Nominal	14 A	4.78 A
Frequência Nominal	60 Hz	60 Hz
Número de Polos	4	4
Velocidade Nominal	1715 rpm	1700 rpm
Ligação dos enrolamentos	Δ	Δ
Rendimento	85.5 %	72.7 %
Fator de Potência	0.81	0.83
Categoria	N	N

O acionamento das máquinas geradoras é efetuado por máquinas também assíncronas, de maior porte que as correspondentes máquinas acionadas. Estas máquinas motrizes são alimentadas por um inversor de frequência a fim de controlar a velocidade de acionamento do gerador de indução, assim representando um sistema regulador de velocidade.

4.1 DADOS DA MÁQUINA

Os *inputs* dos algoritmos matemáticos dos modelos de Doxey e das impedâncias equivalentes são: parâmetros da máquina geradora (R_s , X_s , R_r e X_r); polinômio V_t/F do modelo de Doxey; polinômio V_g/F do modelo das impedâncias equivalentes; velocidade de acionamento v ; capacitância de excitação por fase X_c ; e carga Z_L .

Dos *inputs* citados, a velocidade v , a reatância capacitiva X_C e a carga

Z_L podem ser assumidos arbitrariamente, de acordo com o interesse na análise. Já os demais parâmetros da máquina e polinômios precisam ser levantados mediante ensaios, apresentados nas seções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3.

4.1.1 Parâmetros da máquina

Os parâmetros internos das máquinas, que compõem os dados de entrada para os métodos de análise, são apresentados na Tabela 2. Para obtenção de tais parâmetros é necessário a realização dos ensaios: de vazio, de rotor bloqueado e de medição direta de resistência. Os procedimentos dos ensaios e cálculo para determinação de tais parâmetros estão apresentados por Fitzgerald *et al.* (2006).

Tabela 2: Parâmetros por fase Y dos geradores.

	Máquina 5 cv	Máquina 1,5 cv
R_s	0.430 Ω	2.610 Ω
R_r	0.584 Ω	2.072 Ω
X_s	0.606 Ω	1.176 Ω
X_r	0.977 Ω	1.896 Ω
X_m	15.644 Ω	38.569 Ω

4.1.2 Polinômio do modelo de Doxey

Os polinômios, neste trabalho assumido de quinta ordem, que relaciona a tensão de terminal V_t gerada em função da reatância de magnetização da máquina X_m para o modelo de Doxey está apresentado nas figuras 14 e 15. O detalhamento de ensaio para obtenção desta curva está demonstrado no apêndice A.

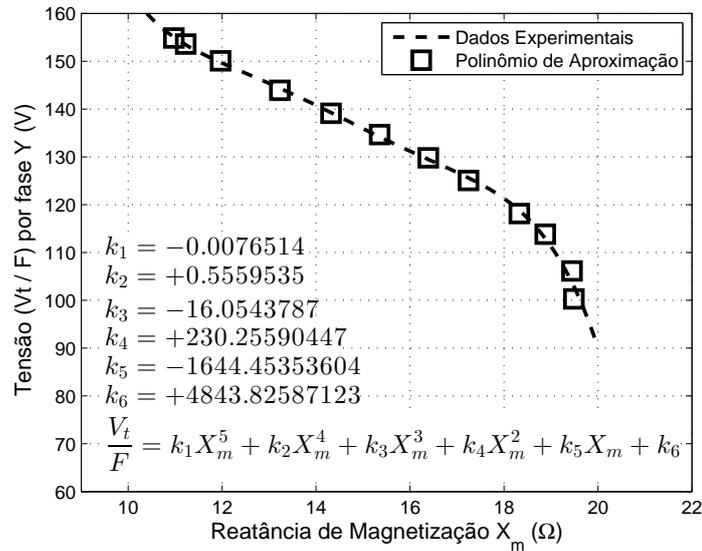


Figura 14: Polinômio de aproximação V_t/F em função de X_m para o modelo de Doxey da máquina de 5 cv.

Fonte: Autoria própria.

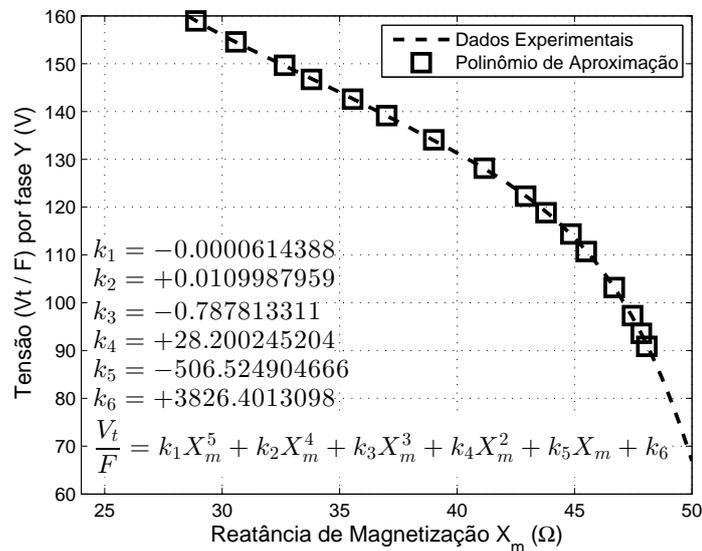


Figura 15: Polinômio de aproximação V_t/F em função de X_m para o modelo de Doxey da máquina de 1,5 cv.

Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Polinômio do modelo das impedâncias equivalentes

O polinômio, neste trabalho assumido de quarta ordem, que relaciona a tensão de entreferro V_g/F gerada em função da reatância de magnetização da máquina X_m empregada no modelo das impedâncias está apresentado na figura 16 e 17. O

detalhamento de ensaio para obtenção desta curva está demonstrado no apêndice B.

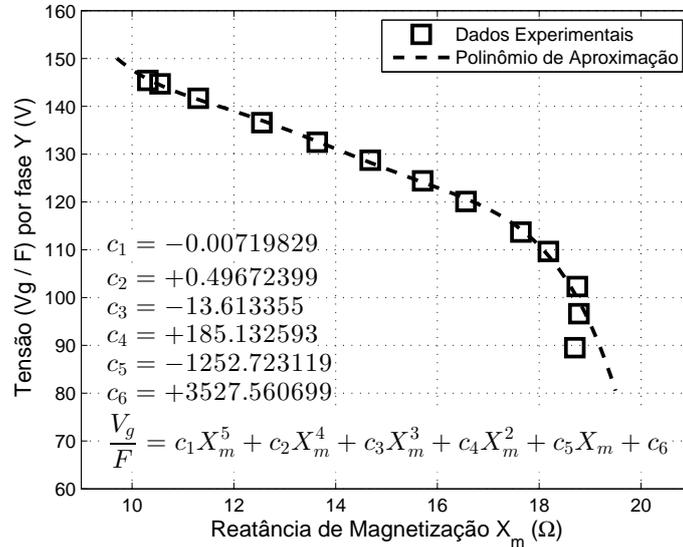


Figura 16: Polinômio de aproximação V_g/F em função de X_m para o modelo de impedâncias da máquina de 5 cv.

Fonte: Autoria própria.

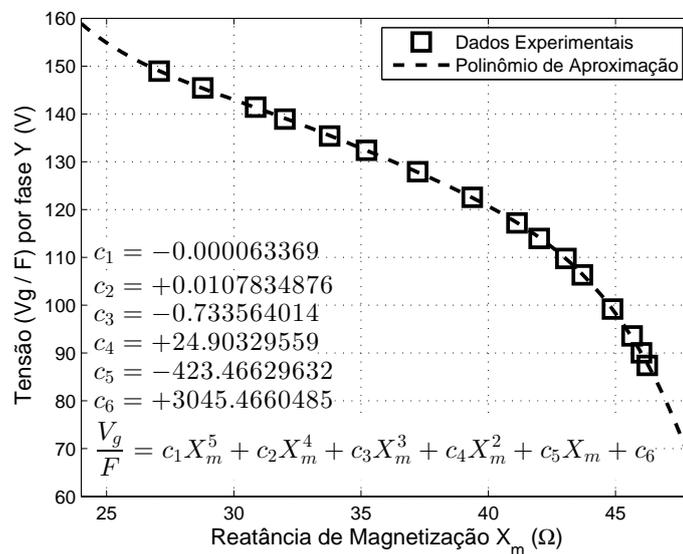


Figura 17: Polinômio de aproximação V_g/F em função de X_m para o modelo de impedâncias da máquina de 1,5 cv.

Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS COMPARADOS ENTRE MÉTODOS E EXPERIMENTAÇÃO

Obtidas as informações das máquinas, é preciso definir as condições que interessam à análise do gerador: velocidade de acionamento v , capacitância de excitação X_c e carga Z_L .

A velocidade de acionamento do gerador é, em todo este trabalho, considerada fixa na velocidade síncrona 1800 rpm , ou seja, v unitário. A consideração de velocidade de acionamento invariável não é otimista porque em muitos casos os geradores são acionados por sistemas motrizes com algum esquema de controle de velocidades. (HAQUE, 2008)

A reatância de excitação X_c , nesta primeira etapa experimental do trabalho, foi admitida $183 \mu F$ por fase Y para a máquina de 5 cv e $93 \mu F$ por fase Y para a máquina de $1,5 \text{ cv}$. Esses valores foram empiricamente encontrados capazes de estabelecer a autoexcitação da máquina à vazio e produzir tensões próximas à nominal.

Quanto à definição de carga, este trabalho se concentra em cargas resistivas, pela maior simplicidade de execução de ensaios laboratoriais.

Se para cada ponto de uma ampla faixa de valores de carga (R_L) forem executados os métodos de Doxey e das impedâncias, como resultado serão obtidos a amplitude V_t e a frequência da tensão gerada para uma potência da carga. O traçado da magnitude da tensão V_t em função da carga P_L representa graficamente a regulação de tensão enquanto que o traçado da frequência da tensão de linha gerada em função da potência fornecida P_L representa a regulação de frequência.

Nas figuras 18, 19, 20 e 21 além de apresentadas as predições dos modelos, estão postos os resultados laboratoriais de ensaio dos geradores de indução de 5 e $1,5 \text{ cv}$.

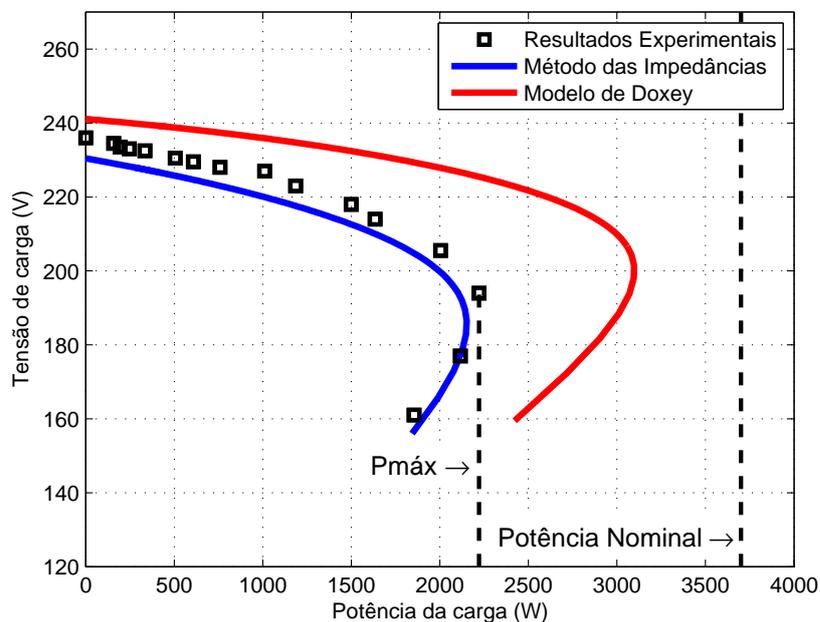


Figura 18: Regulação de tensão do gerador de indução autoexcitado de 5 cv

Fonte: Autoria própria.

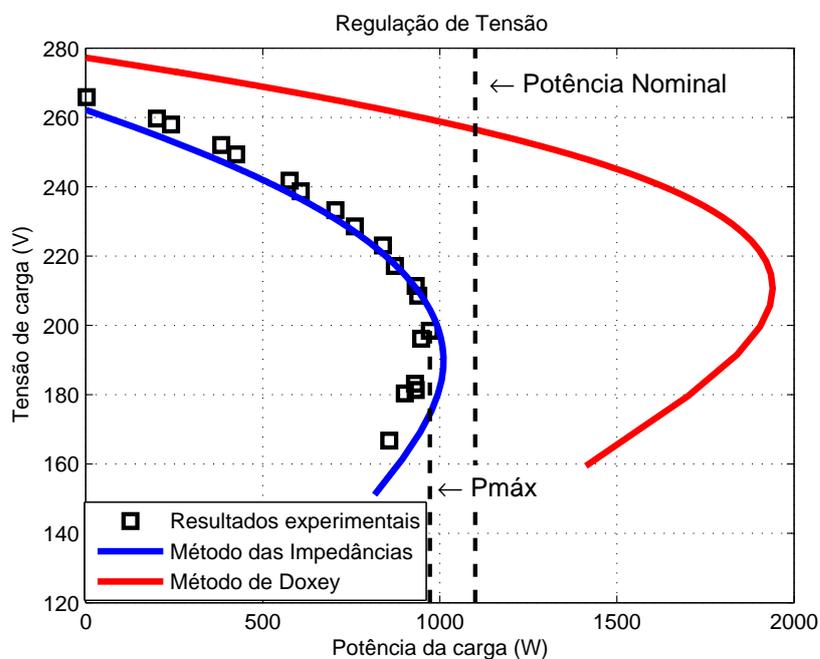


Figura 19: Regulação de tensão do gerador de indução autoexcitado de 1,5 cv

Fonte: Autoria própria.

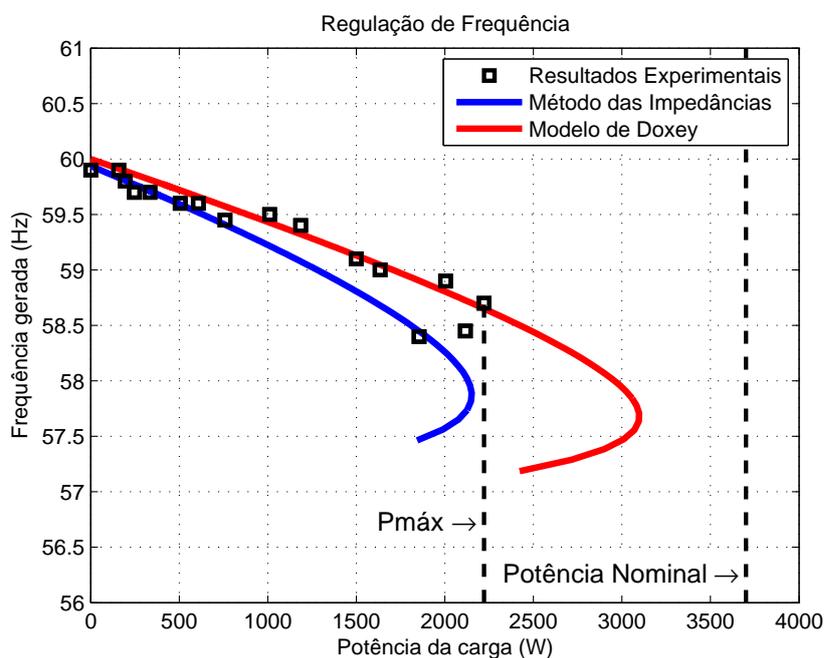


Figura 20: Regulação de frequência do gerador de indução autoexcitado de 5 cv

Fonte: Autoria própria.

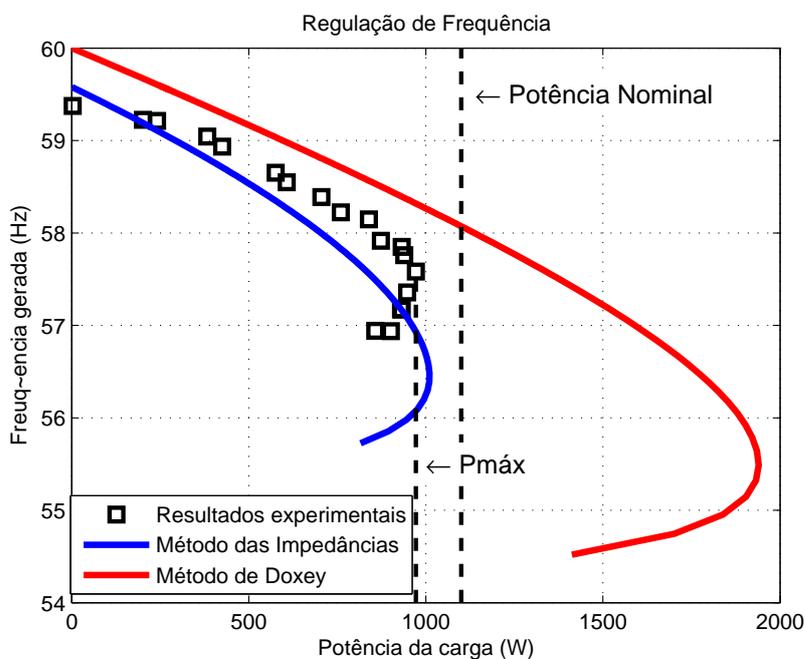


Figura 21: Regulação de frequência do gerador de indução autoexcitado de 1,5 cv

Fonte: Autoria própria.

Sobre os aspectos gerais dos resultados experimentais apresentados na figura 18 e 19, a primeira observação é a confirmação da elevada queda de tensão com o aumento da carga, caindo 42 V para a máquina de 5 cv entre condição de vazio e máxima carga ($P_{máx}=2221 W$); e 67.5 V para a máquina de 1,5 cv entre a condição de vazio e máxima carga ($P_{máx}=972 W$).

Em segundo lugar, nota-se a baixa variação de frequência gerada, reduzindo apenas 1,3 Hz (ou 2 %) da frequência nominal entre a condição de vazio e $P_{máx}$ para a máquina de 5 cv e caindo apenas 1,79 Hz (ou 3 %) para a máquina de 1,5 cv. Por esse motivo este trabalho não trata de seu controle, reiterado o fato de que cargas residenciais são pouco sensíveis à variação de frequência. (HAQUE, 2008)

Em terceiro lugar, vê-se que para a máquina de 5 cv a potência $P_{máx}$ é inferior à capacidade nominal da máquina, correspondendo à somente 60 % da potência nominal (3,7 KW). Entretanto a potência máxima fornecida à carga na condição de excitação fixa está intimamente relacionada com a intensidade da excitação, como pode ser visualizado na regulação de tensão da máquina de 1,5 cv (figura 19), onde a potência máxima alcançada está próxima à nominal pois é elevada a sua sobreexcitação (Tensão de vazio = 265.9 V).

Se neste sistema de excitação fixa uma carga demandar uma potência superior a $P_{máx}$, o gerador então cessará o fornecimento de potência pela razão de demasiado enfraquecimento do campo magnético da máquina e conseqüente não sustentação de sua excitação. Também observou-se experimentalmente a ocorrência da perda de seu magnetismo residual, o qual é fundamental para dar início ao processo de autoexcitação a vazio. O magnetismo residual da máquina pode ser recuperado a fazendo atuar como motor,

Conforme Haque (2008), os pontos que se encontram verticalmente abaixo de $P_{máx}$ estão na zona anormal de operação da máquina, pois $\partial P_L / \partial V_t > 0$. O funcionamento da máquina nesta zona não é considerada pela literatura.

Em conclusão sobre a experimentação dos geradores pode-se dizer que existe o baixo aproveitamento da potência da máquina (quando não sob elevada sobreexcitação) bem como uma baixa regulação de tensão. Estes fatos deixam claro que capacitância fixa conectada aos terminais da máquina não produz desempenho satisfatório do gerador de indução. Por conseqüência estes fatos reforçam o conceito da necessidade de ajuste do fornecimento de reativo para controle da tensão

do gerador.

Quanto às previsões teóricas exibidas no gráficos das figuras 18, 19, 20 e 21, é nítida a maior exatidão do modelo das impedâncias frente aos resultados do modelo de Doxey. O primeiro modelo representa de maneira muito satisfatória o comportamento real da máquina em termos de tensão, apresentando erro máximo na predição de tensão de aproximadamente 3% na máquina de 5 *cv* no ponto de potência fornecida de 2000 *W*, e de 6.5% na máquina de 1,5 *cv* (na região anormal de operação).

A comparação da exatidão dos resultados teóricos entre as duas máquinas não é capaz de informar a influência do porte da máquina na predição dos modelos uma vez que para ambos resultados os erros são baixos.

Já o modelo de Doxey apresenta um elevado grau de otimismo em suas predições. A diferença entre seus resultados e os do modelo das impedâncias evidencia o fato de que a simplificação nele empregadas afeta grandemente a qualidade de suas predições.

Para o modelo de Doxey a potência máxima fornecida pela máquina de 5 *cv* é cerca de 3100 *W*, o que pôde ser mostrado falso, experimentalmente, uma vez que a máquina entra em estado anormal de fornecimento de energia em 2221 *W*. Já para a máquina de 1,5 *cv* este método indica uma potência máxima de 1940 *W*, superando a potência nominal da máquina em 840 *W*.

Em adição, pode-se afirmar que a diminuição da complexidade matemática oferecida por Doxey atualmente não é justificável, vista facilidade computacional de implementar do modelo das impedâncias. Portanto, o deslocamento do ramo de excitação da máquina proposto por Doxey pode ter sido uma maneira conveniente de visualizar a regulação de tensão do gerador de indução em épocas de poucos recursos computacionais. Contudo, é um modelo de baixa exatidão e inviável nos dias de hoje.

Logo, sobre o estudo do gerador de indução autoexcitado, avalia-se o modelo das impedâncias como um modelo de melhor exatidão, no qual este trabalho fundamenta a análise seguinte de estudo de um regulador de tensão.

6 ESTRATÉGIAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

Os seguintes capítulos abordam o estudo e implementação de um sistema capaz de regular a tensão do gerador de indução. A máquina adotada para implementação é a máquina de 5 cv já vista nas secções anteriores e sua escolha dependeu de disponibilidades laboratoriais.

Como dito nas secções anteriores, somente potência mecânica aplicada ao eixo de uma máquina de indução não é condição suficiente para uma conversão eletromecânica de energia. A máquina de indução requer também potência reativa, ou corrente de excitação, para magnetização de seu núcleo. Esta corrente de excitação em geradores de indução conectados à rede convencional é fornecida pela própria rede. Para geradores de indução isolados (SEIG) a regulação de tensão é feita por sistemas de controle de potência reativa utilizando compensações série ou paralela. (CHAUHAN *et al.*, 2010)

Em uma análise perspectiva destes sistemas de regulação de tensão para geradores de indução autoexcitados, Chauhan *et al.* (2010) classifica estes sistemas conforme apresentado na figura 22 e, a partir dela, é possível vislumbrar a variedade de métodos possíveis para regulação de tensão.

Este trabalho propõe o emprego de um sistema de capacitores paralelos chaveados. A justificativa de sua escolha é devido sua popularidade em sistemas de geração abaixo de 15 KW, robustez e baixa complexidade quando comparado à técnicas sofisticadas como SVC e STATCOM (SIMÕES; FARRET, 2008).

O chaveamento de capacitores possui a desvantagem do controle em degraus da tensão gerada devido à inserção discreta de capacitância. Contudo, mesmo oferecendo um controle discreto, este banco de capacitores chaveados pode ser uma boa alternativa de implementação pois cargas de pequeno porte conectadas ao SEIG em áreas remotas comumente são residenciais, e estas não são muito sensíveis a variação de tensão e frequência. (HAQUE, 2008)

Nas secções seguintes serão apresentados os procedimentos de projeto do regulador à capacitores paralelos comutados.

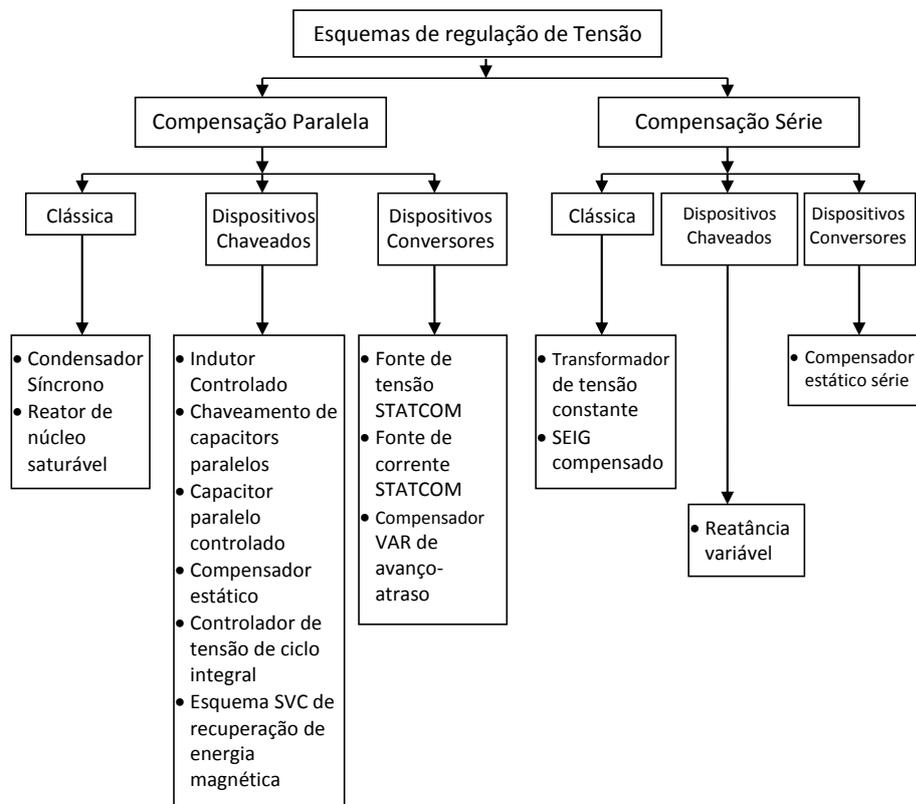


Figura 22: Técnicas apresentadas na literatura para controle da tensão do SEIG.

Fonte: Adaptado de Chauhan *et al.* (2010)

6.1 REGULADOR À CAPACITORES COMUTADOS

O princípio de funcionamento do regulador à capacitores *shunt* chaveados é um controle em degraus da tensão V_t nos terminais do SEIG através da inserção e remoção de capacitores dos terminais da máquina quando detectada sobretensão ou subtensão além de uma faixa estipulada aceitável de variação de tensão. Para ilustrar o desempenho da regulação de tensão resultante da aplicação deste regulador, a figura 23 mostra em linhas tracejadas a variação de V_t em função de P_L para três capacitâncias totais diferentes conectadas à máquina (C_0 , C_1 e C_2).

Em traço contínuo a figura 23 também revela como é o perfil em regime permanente da tensão esperado após aplicado o método de controle por chaveamento de capacitores e velocidade de acionamento v mantida constante. Inicialmente uma capacitância C_0 é estipulada para produzir $V_{máx}$ na condição sem carga. À medida que a potência da carga aumenta a tensão V_t diminui, cruzando o valor estipulado V_{min} em P_1 . Para manter o perfil de tensão dentro dos limites $V_{máx}$ e V_{min} admitidos, o valor da

capacitância equivalente de terminal é aumentada para C_1 , quando a potência exigida da carga supera P_1 , e para C_2 quando a potência exigida da carga supera P_2 .

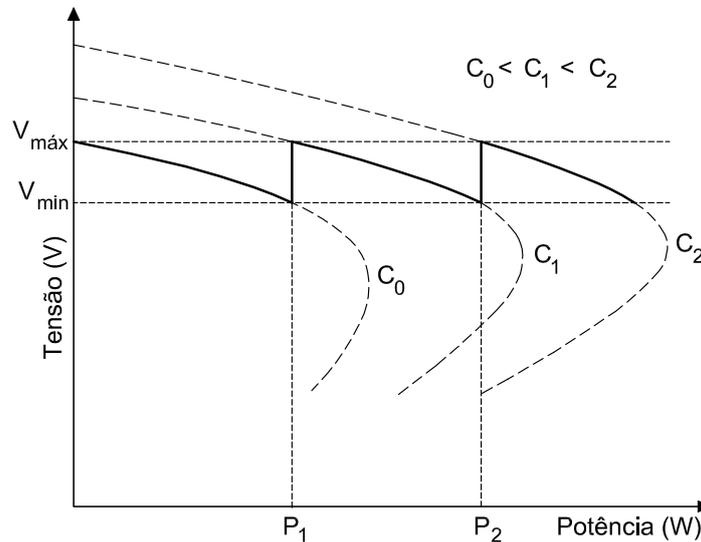


Figura 23: Comportamento da tensão de terminal para diferentes capacitâncias de excitação (curvas tracejadas); e formato da tensão regulada por chaveamento de capacitores (curvas contínuas).

Fonte: Adaptada de Haque (2008).

As capacitâncias C_1 e C_2 são selecionadas cuidadosamente previamente para que, quando inseridas, produzam a tensão do limite superior $V_{\text{máx}}$ no ponto de transição P_1 e P_2 , respectivamente. As curvas de C_0 , C_1 e C_2 são de capacitâncias equivalentes. O valor real de capacitância a ser chaveada, por exemplo, no ponto de transição P_1 é $C_1 - C_0$. Este mesmo processo acontece para todos os pontos de transição existentes entre a condição de vazio e plena carga. Quanto menor a faixa de variação de tensão admitida, ou seja, quanto mais próximos $V_{\text{máx}}$ e V_{min} , mais pontos de transição haverá, e com isso maior número de capacitores e elementos de comando e proteção, encarecendo o regulador.

No sentido oposto, ao admitir uma faixa grande de variação consegue-se um regulador mais barato. Este trabalho guia-se inicialmente pela máxima variação de tensão aceitável segundo os limites de tensão seguros de operação das máquinas de indução para obter um regulador de baixo custo.

Conforme a norma brasileira NBR 7094 (intitulada "Máquinas elétricas girantes - Motores de indução - Especificação"), a faixa segura para operação prolongada de operação de motores de indução situa-se na área interna A da figura 24. A

atuação da máquina além dos limites não é aconselhada pela NBR 7094 por provável aquecimento superior ao nominal.

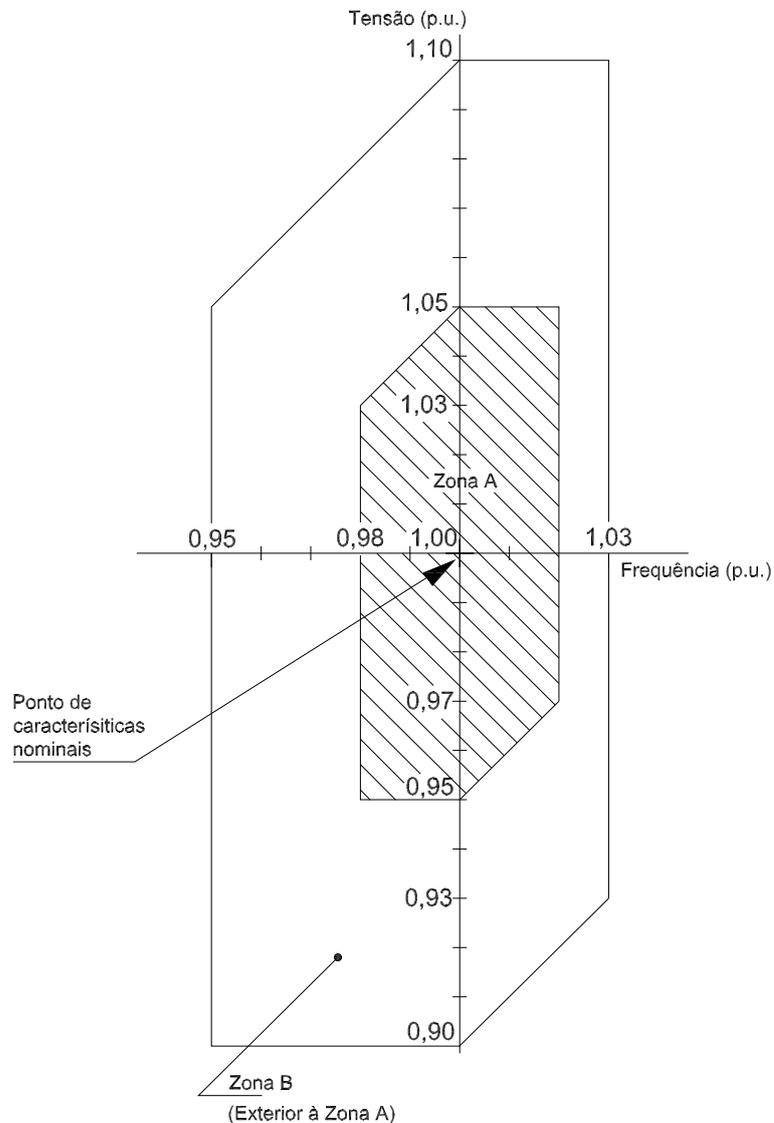


Figura 24: Limites de tensão e frequência para operação de máquinas de indução, estabelecidos pela norma brasileira NBR 7094. Fonte: (ABNT, 2003).

Nas seções seguintes são apresentados o dimensionamento dos capacitores e a estrutura do regulador de tensão.

6.1.1 Dimensionamento dos capacitores

No estudo da regulação de tensão impõe-se a reatância capacitiva de excitação X_C , além de outras variáveis, com o intuito conhecer a tensão de terminal V_t para cada condição de carga P_L , assim construindo a curva de regulação.

Já nesta etapa do estudo do regulador segue-se o caminho oposto: com um V_t desejado, tem-se o interesse em conhecer qual a exigência de capacitância por parte da máquina para manter V_t fixo em cada condição de carga P_L . Em outras palavras, quer-se construir uma curva que informe qual a capacitância de terminal que produz um dado V_t em função da carga P_L .

Para este estudo, parte-se do princípio de que a equação (14) deve ser reescrita como a equação (17). Esta equação possui, em \vec{Z}_1 e \vec{Z}_3 , as variáveis X_C , X_m e F , como pode ser visto nas equações (7), (8) e (9).

$$\left| \vec{V}_g \frac{\vec{Z}_3}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_3} \right| - |\vec{V}_t| = 0 \quad (17)$$

Mas, para conhecer os valores de X_m e F é necessário solucionar o sistema de equações (12), que, por outro lado, também depende da variável X_C .

Neste caso, estando as equações (12) e (17) dependentes entre si, a determinação das variáveis X_m , F e X_C vem da solução do sistema de 3 equações (18).

$$G(X_m, F, X_C) = \begin{cases} \text{Re}(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3) = 0 \\ \text{Im}(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3) = 0 \\ \left| \vec{V}_g \frac{\vec{Z}_3}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_3} \right| - |\vec{V}_t| = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Com o valor de X_C , obtido da solução de $G(X_m, F, X_C) = 0$ em uma condição de carga Z_L , pode-se obter a capacitância correspondente, pela equação (19).

$$C = \frac{1}{2\pi 60 X_C} \quad (19)$$

Solucionando-se $G(X_m, F, X_C) = 0$ para uma ampla faixa de valores de Z_L , é possível, então, construir uma curva de exigência de capacitância da máquina para manter V_t fixo em função da potência de carga P_L .

Aplicando esta metodologia na máquina alvo deste trabalho, com $V_t = V_{máx} = 231 V$ e posteriormente com $V_t = V_{min} = 209 V$, tem-se os resultados da figura 25. Este gráfico mostra que a capacitância requerida aumenta com a potência da carga, o que é evidente, porque um aumento de carga provoca queda de V_t na região normal de operação (figura 23) e então mais capacitores são necessários para ajustar V_t .

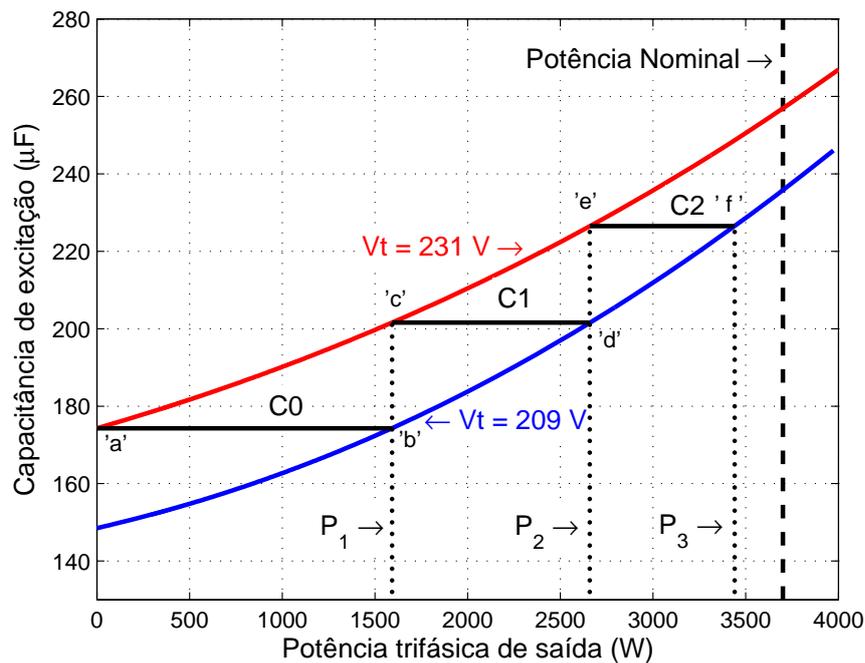


Figura 25: Capacitância para V_t constante em função da carga.
Fonte: Autoria própria.

A verdadeira utilidade da figura 25 é a indicação da quantidade e valores de capacitâncias que serão usados no regulador. Considerando que a tensão de vazio será $231 V$, o capacitor inicial correspondente C_0 corresponde ao ponto 'a', $174,3 \mu F$ fase Y. Este capacitor manterá a tensão dentro dos limites estabelecidos até que a potência demandada da carga seja $P_1 = 1592,2 W$, ponto 'b'. Neste momento, para não infringir o limite inferior de tensão $V_{min} = 209 W$, é inserido no sistema uma nova capacitância para elevar a tensão até $V_{máx} = 231 V$, ponto 'c'. A capacitância total no terminal da máquina nesta etapa é $C_1 = 201,6 \mu F$. Por sua vez, este valor de capacitância manterá a tensão de terminal dentro da faixa aceitável até que a potência seja $P_2 = 2659 W$, ponto 'd'. Por conseguinte, uma nova capacitância é conectada, totalizando $C_2 = 226,5 \mu F$, que manterá a tensão dentro da faixa até uma potência $P_3 = 3440 W$.

Pelo fato desta potência P_3 ser muito próxima da nominal de 3700 W , não será considerada a inserção de um banco de capacitâncias adicional, com seus respectivos comandos e proteções, para atender os 260 W restantes.

O resultado teórico de predição de V_t em função de P_L , pelo modelo de impedâncias, utilizando os capacitores C_0 , C_1 e C_2 está apresentado na figura 26.

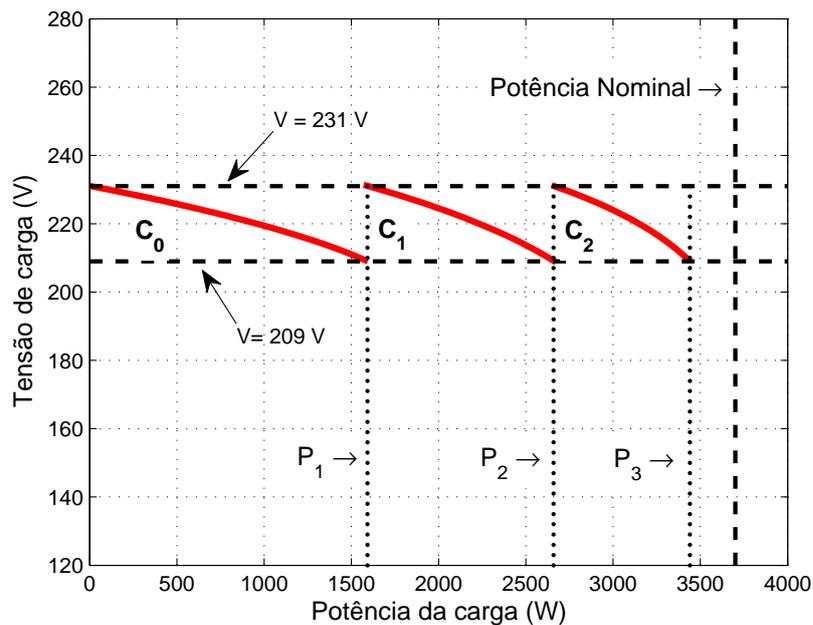


Figura 26: Regulação de tensão com chaveamento de capacitores.

Fonte: Autoria própria.

Ainda que não seja de interesse deste trabalho atuar na regulação de frequência, o controle da tensão por meio de capacitores chaveados também produz uma pequena melhora no comportamento da frequência gerada em função da carga, conforme figura 27, demonstrando que a frequência é pouco sensível à capacitância de excitação.

Sobre o comportamento final da tensão e frequência geradas, é preciso investigar se a implementação deste regulador consegue manter a operação da máquina dentro das faixas adequadas de variação de tensão e frequência estabelecidas pela NBR 7094, ou seja, na zona A da figura 24.

Para esta análise, basta, para cada ponto de potência de carga, nas figuras 26 e 27, extrair e colocar em gráfico os pares de coordenadas: V_t e frequência gerada. A figura 28 mostra o resultado desta investigação.

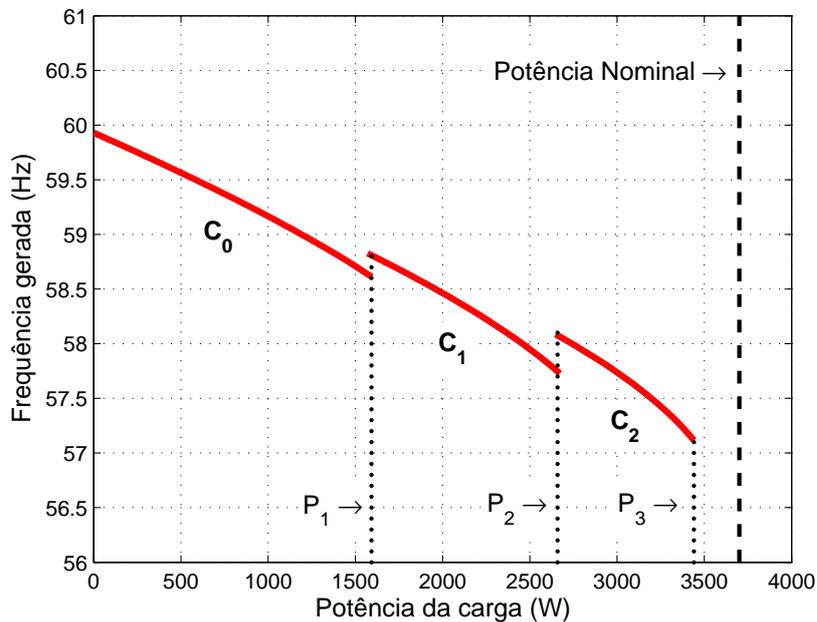


Figura 27: Regulação de frequência com chaveamento de capacitores.

Fonte: Autoria própria.

A figura 28 indica que o comportamento da máquina, previsto com o regulador, mantém a mesma operando dentro dos limites de tensão da Zona A, porém a maior faixa de operação (curvas C_1 e C_2) está na Zona B em função da violação do limite inferior de frequência da Zona A. É válido ressaltar que a análise do gráfico da figura 28 representa não só uma preocupação para com a máquina geradora, mas também com relação às cargas alimentadas, que estarão submetidas à tensão e frequência de algum ponto das curvas C_0 , C_1 e C_2 . Mesmo não representando uma operação insegura ou danosa, uma alternativa para minimizar o funcionamento na Zona B é elevar a rotação de acionamento v . Isto faz com que a frequência a vazio esteja acima da nominal, e então as curvas C_0 , C_1 e C_2 são deslocadas à direita, passando a excursionar maior parcela no interior da Zona A. Evidentemente, uma mudança de v provoca a alteração do valor dos componentes C_0 , C_1 e C_2 . Estando este trabalho limitado à regulação de tensão, não será aprofundado estudo nos meios de regulação de frequência, mesmo porque, como dito anteriormente, cargas residenciais não são muito sensíveis à variação de frequência.

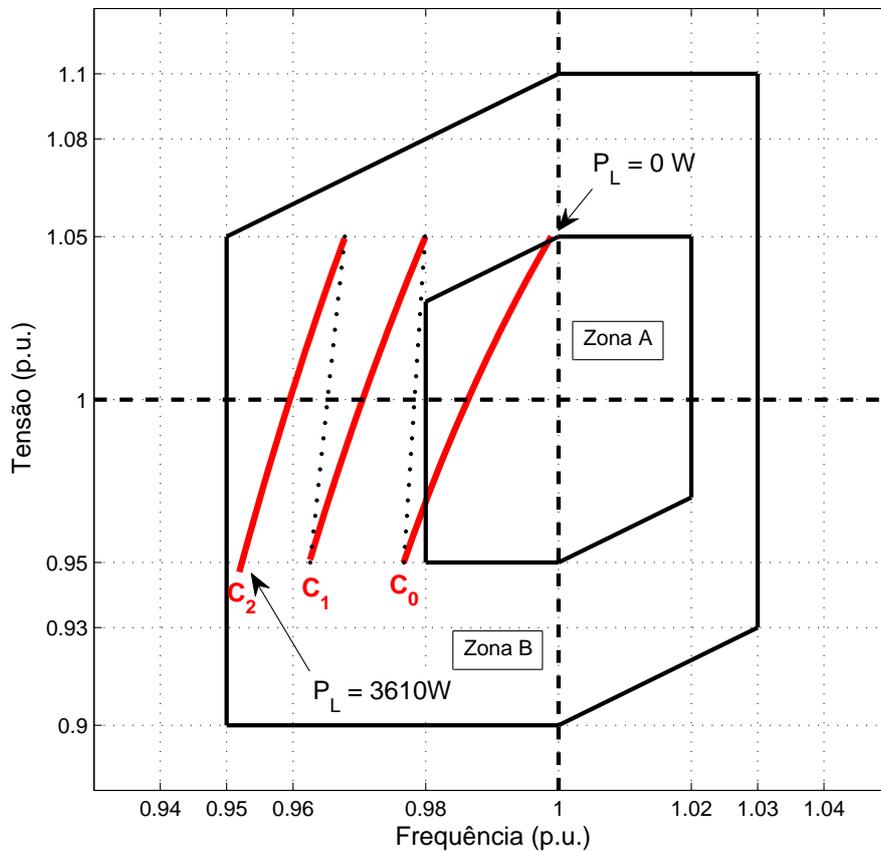


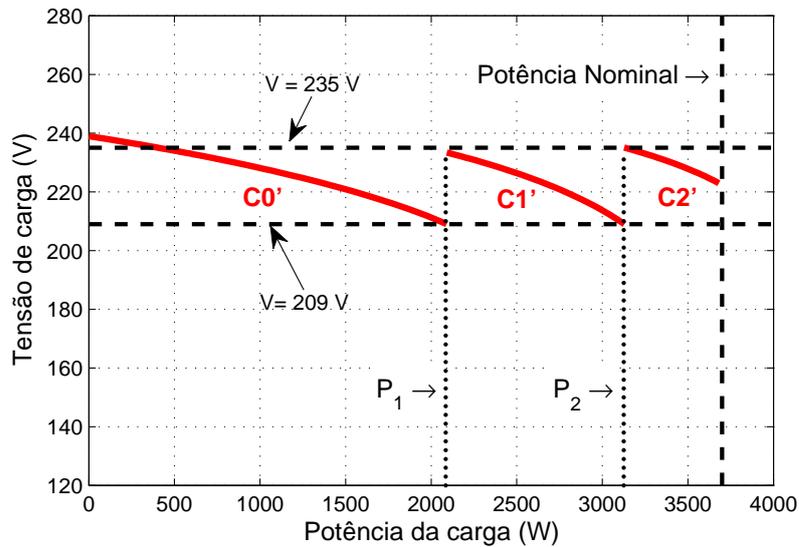
Figura 28: Relacionamento do desempenho do gerador com regulador e os limites de operação estabelecidos pela NBR 7094.
Fonte: Autoria própria.

6.1.2 Construção do regulador

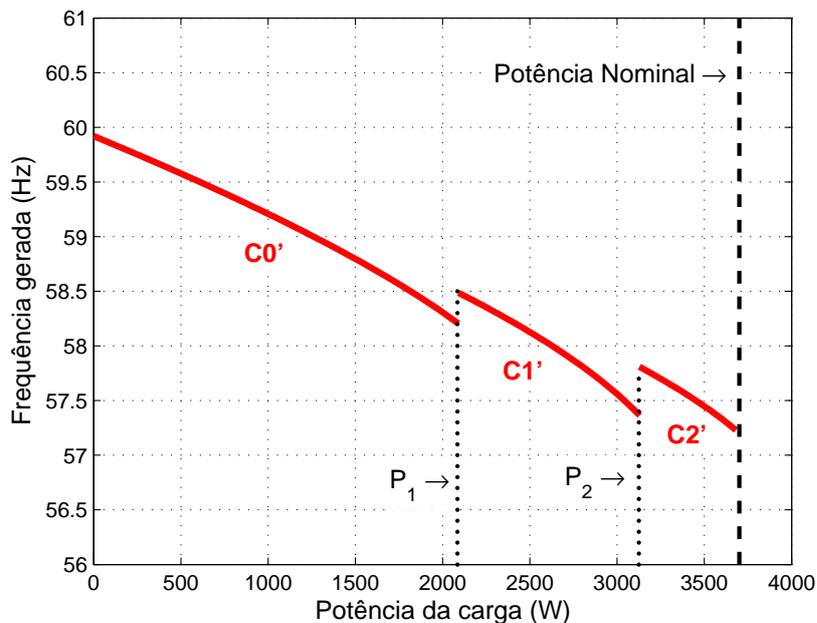
Sobre a implementação do regulador, inicialmente é preciso esclarecer que os resultados teóricos das figuras 26, 27 e 28 servem de guia e seriam esperados se fossem utilizados exatamente os valores de capacitâncias totais: $C_0 = 174.3 \mu F$, $C_1 = 201.6 \mu F$ e $C_2 = 226.5 \mu F$. A partir destes valores, o incremento de capacitância que um chaveamento deve inserir para alterar a capacitância total de C_0 para C_1 é $C_1 - C_0 = 27.3 \mu F$ por fase Y. O incremento de capacitância de C_1 para C_2 é $C_2 - C_1 = 24.9 \mu F$ por fase Y.

Entretanto, por uma questão de disponibilidade comercial e laboratorial de valores de capacitância, a implementação do regulador se fará com os valores: $C'_0 = 186 \mu F$, $C'_1 = 216 \mu F$ e $C'_2 = 246 \mu F$. Logo o incremento de capacitância em cada comutação será $C'_1 - C'_0 = 30 \mu F$ por fase Y e $C'_2 - C'_1 = 30 \mu F$ por fase Y.

Com estes novos valores de capacitâncias, as curvas de previsão de desempenho da máquina das figuras 26, 27 e 28 se tornam as figuras 29, 30 e 31. As potências P_1 e P_2 , onde ocorre a transgressão do limite inferior de tensão (209 V) e comutação dos capacitores são, respectivamente, 2085 W e 3125 W.



**Figura 29: Previsão de regulação de tensão para os capacitores $C'_0 = 186 \mu F$, $C'_1 = 216 \mu F$ e $C'_2 = 246 \mu F$.
Fonte: Autoria própria.**



**Figura 30: Previsão de regulação de frequência para os capacitores disponíveis.
Fonte: Autoria própria.**

Como mencionado nas secções anteriores, o controle baseia-se no monitoramento da amplitude da tensão gerada e, quando detectada subtensão ou sobretensão, efetuar o chaveamento dos capacitores. Portanto, sua concepção deve ser capaz de realizar os processos: medição da tensão V_t , tomada de decisão sobre a transgressão da faixa admitida e comutação de capacitores.

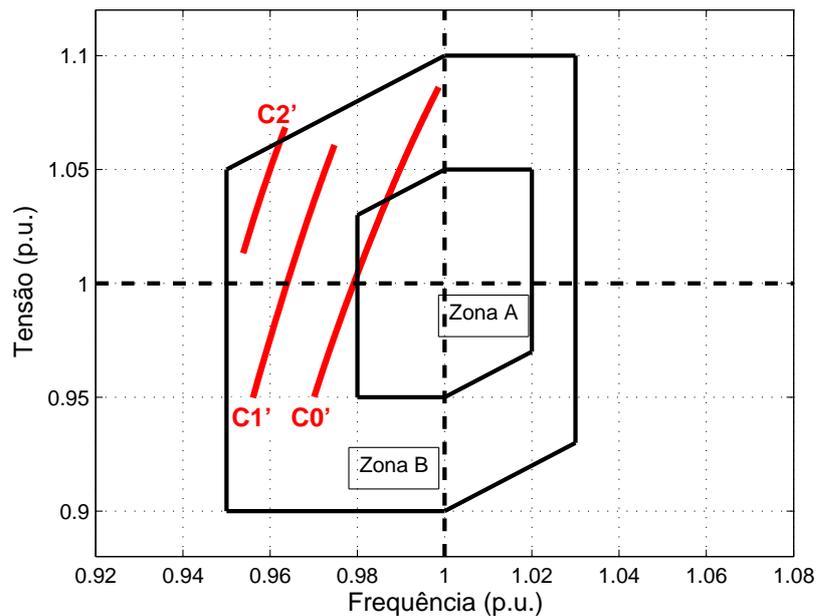


Figura 31: Previsão de desempenho teórico da tensão e frequência normalizados comparados aos limites da norma NBR 7094.

Fonte: Autoria própria.

Determinado o número e os valores dos capacitores que irão compor o banco, é preciso elaborar a estratégia de acionamento dos capacitores. O regulador implementado neste trabalho possui a estrutura como apresentada na figura 32.

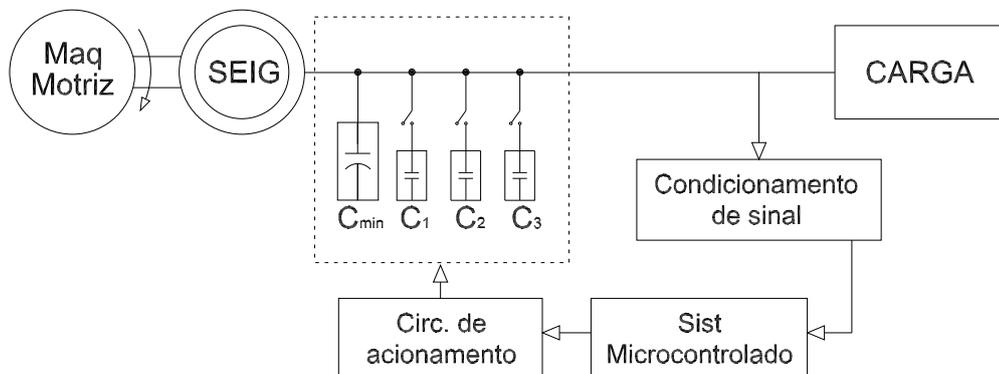


Figura 32: Estrutura geral do sistema regulador de tensão implementado.

Fonte: Autoria própria.

Nesse circuito, a etapa de condicionamento de sinal é responsável por informar ao sistema microcontrolado o nível de tensão gerado pelo SEIG. O sistema microcontrolado é a etapa responsável por verificar se a tensão gerada se encontra dentro dos limites adotados (209 V à 231 V). Caso a tensão esteja fora da faixa considerada, então o sistema microcontrolado deve fornecer ao sistema de acionamento o comando para inserir ou remover do sistema os capacitores do banco.

Na seção seguinte está apresentado o detalhamento das etapas de condicionamento de sinal, sistema microcontrolados e acionamento dos capacitores.

6.1.3 Etapa de condicionamento de sinal

Na estrutura do regulador apresentada na figura 32, a etapa de condicionamento de sinal corresponde à um sensor de tensão. Esse sensor recebe em sua entrada a onda de tensão de linha gerada pelo SEIG ($V_t \text{ rms}$) e fornece à etapa do sistema microcontrolado um valor de tensão contínua (V_s) proporcional à tensão gerada. A tensão contínua V_s está contida entre 0 e 3.3 V.

A figura 33 apresenta o circuito do sensor de tensão construído. Esse circuito é composto de um retificador ponte completa à diodos ($D1$ e $D2$), um divisor de tensão resistivo (potenciômetro $R1$), um filtro passivo passa-baixa de primeira ordem ($R2$ e $C1$) e uma etapa de proteção contra sobretensão ($R3$ e $D3$).

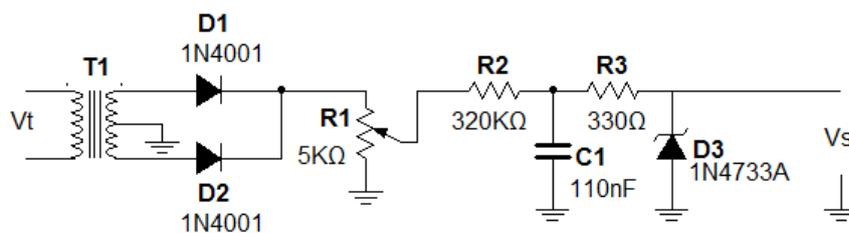


Figura 33: Circuito de condicionamento de sinal: sensor de tensão.
Fonte: Autoria própria.

6.1.4 Etapa de sistemas microcontrolados

O sistema microcontrolado é implementado utilizando o microcontrolador que faz a leitura da tensão fornecida pelo sensor de tensão à cada 100 ms e fornece sinais de comando ao circuito de acionamento para comutação dos capacitores. O modelo escolhido do microcontrolador é o MSP430G2553 da fabricante *Texas Instru-*

ments, em função da disponibilidade laboratorial.

O valor de tensão V_s recebido pelo microcontrolador é reconvertido em V_t *rms* para ser disponibilizado em um *display* LCD para acompanhamento da medição.

A lógica de controle implementada no microcontrolador está apresentada na forma de máquina de estados da figura 34.

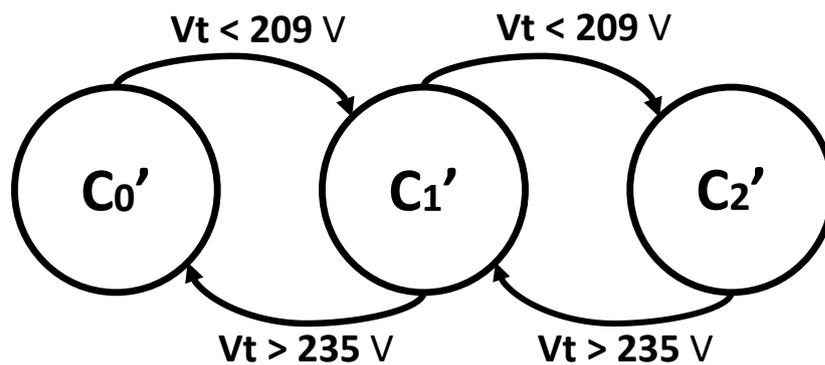


Figura 34: Máquina de Estados implementada no microcontrolador.
Fonte: Autoria própria.

Na figura 34, o estado C'_0 corresponde à situação quando o gerador está operando com capacitância de autoexcitação C'_0 conectada. A violação do limite inferior de tensão ($V_t < 209 V$) devido o acréscimo de carga a partir da condição de vazio é detectada pelo sistema microcontrolado e então a comutação de capacitor deve ocorrer de C'_0 para C'_1 . Nesse momento o gerador passa ao estado de funcionamento C'_1 da figura 34, no qual a capacitância de autoexcitação é C'_1 . Se um novo aumento de carga provocar uma nova violação do limite inferior de tensão, o sistema microcontrolado então enviará um comando para o circuito de acionamento no sentido de inserir um novo capacitor no sistema, para que a capacitância equivalente de autoexcitação seja C'_2 . No sentido inverso, se uma retirada de carga promover a violação do limite superior de tensão ($V_t > 235 V$), o sistema microcontrolado deve fornecer um comando ao circuito de acionamento para remoção de capacitores.

Sobre o microcontrolador foram utilizados os seguintes recursos: um temporizador para amostragem da tensão do sensor; um conversor analógico-digital para realizar a amostragem da tensão do sensor; 12 portas para alimentação e comando do *display* LCD, amostragem e comando do circuito de acionamento.

6.1.5 Etapa de circuito de acionamento

O circuito de acionamento é responsável por inserir e remover grupos de capacitores dos terminais do gerador. Esse circuito de acionamento é composto basicamente por contadores os quais são comutados através do circuito da figura 35. O contator é o elemento interruptor que insere e remove os capacitores dos terminais da máquina. O circuito da figura 35 tem a função de acionar a bobina de comando do contator para controlar a abertura e fechamento dos terminais de potência do contator.

O restante do circuito, composto basicamente por um TRIAC TIC226D e um optoacoplador MOC3020 é responsável por ligar ou desligar a bobina de comando do contator.

Para ligar a bobina de comando do contator o microcontrolador deve colocar o nível lógico da porta I/O em alto, assim acionando o TRIAC e alimentando a bobina do contator.

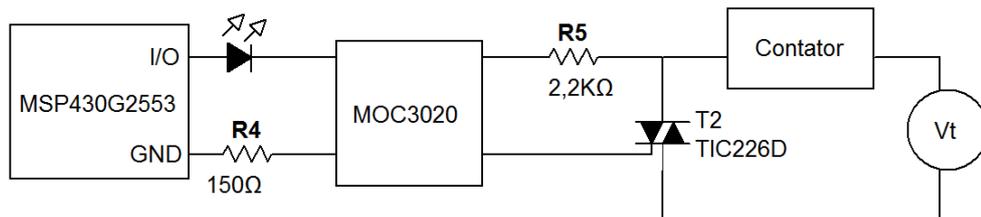


Figura 35: Circuito de acionamento dos capacitores.
Fonte: Autoria própria.

A figura 36 mostra a bancada implementada do regulador, contendo os capacitores, fusíveis de proteção, circuito de acionamento, disjuntores para proteção, circuito de condicionamento de sinal do microcontrolador, microcontrolador e display LCD.

Nas seguintes secções apresenta-se os resultados experimentais para a bancada implementada e posterior discussão dos resultados.

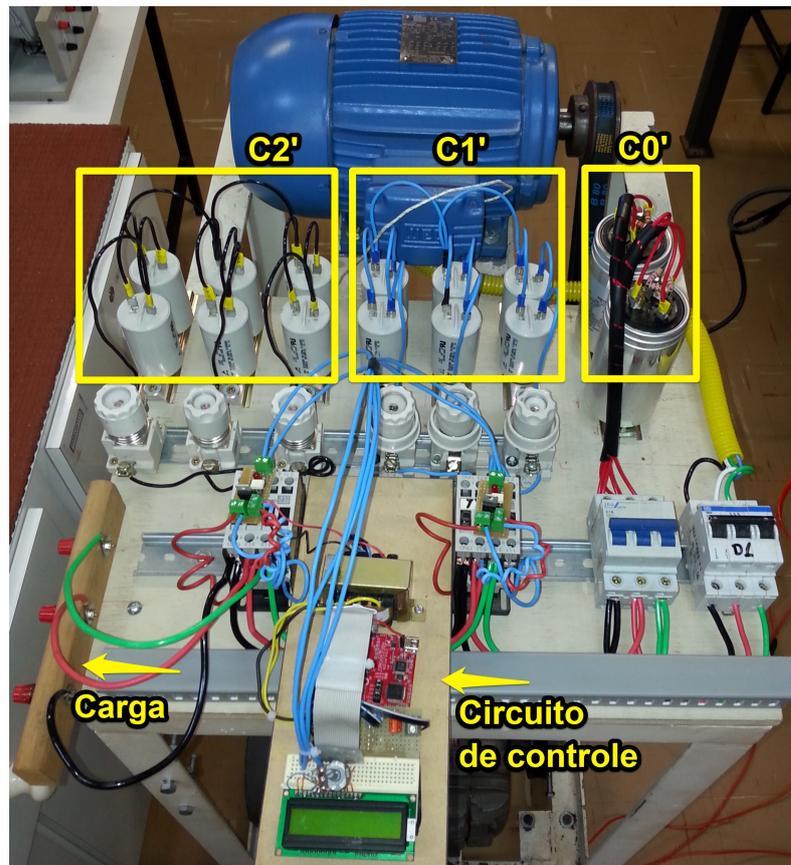


Figura 36: Banco de Capacitores Controlados (Regulador de tensão do gerador de indução).
Fonte: Autoria própria.

6.1.6 Desempenho experimental do regulador

O sistema completo ensaiado para validação dos resultados teóricos está apresentada na figura 37. Nela visualiza-se os bancos de cargas resistivas, a máquina geradora, o banco de capacitores (regulador), a máquina de acionamento, o inversor de frequência e o equipamento analisador de energia (FLUKE, modelo 435) utilizado para coleta dos dados.

Os resultados da regulação de tensão e regulação de frequência obtidos no ensaio do sistema da figura 37 estão apresentados nas figuras 38 e 39.

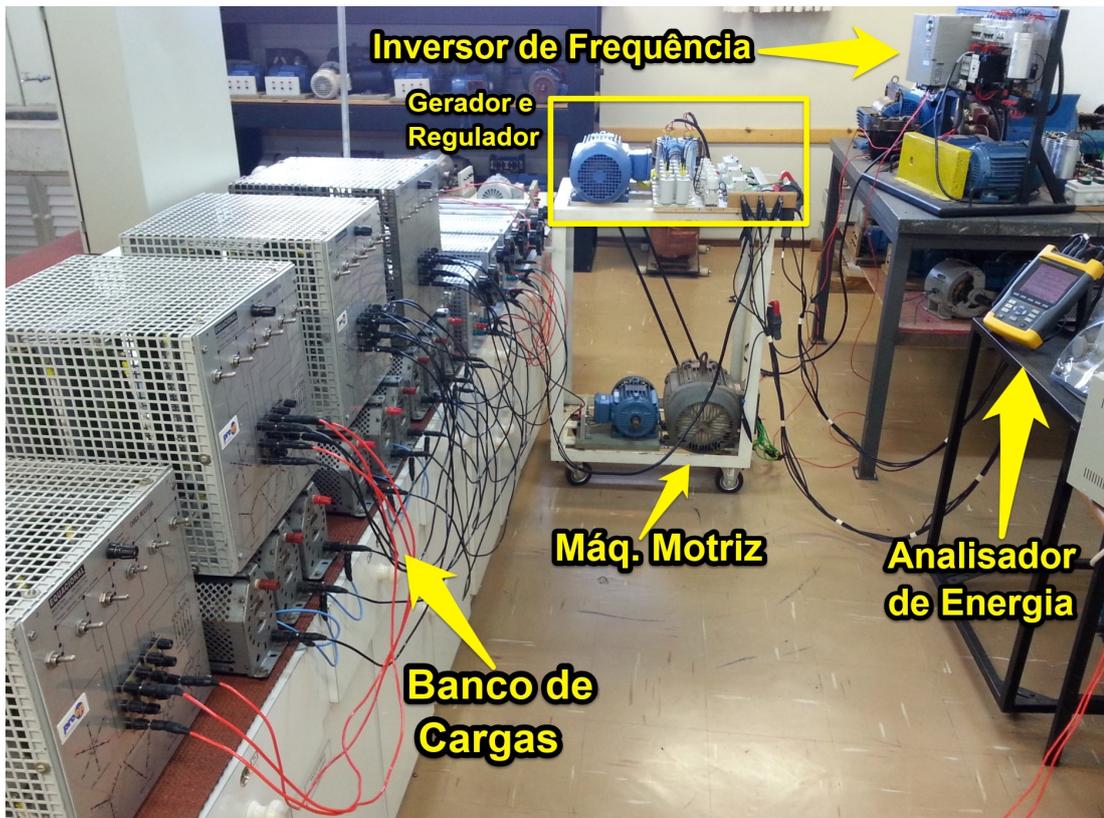


Figura 37: Bancada de Ensaio do Gerador de Indução Autoexcitado com regulador de tensão.

Fonte: Autoria própria.

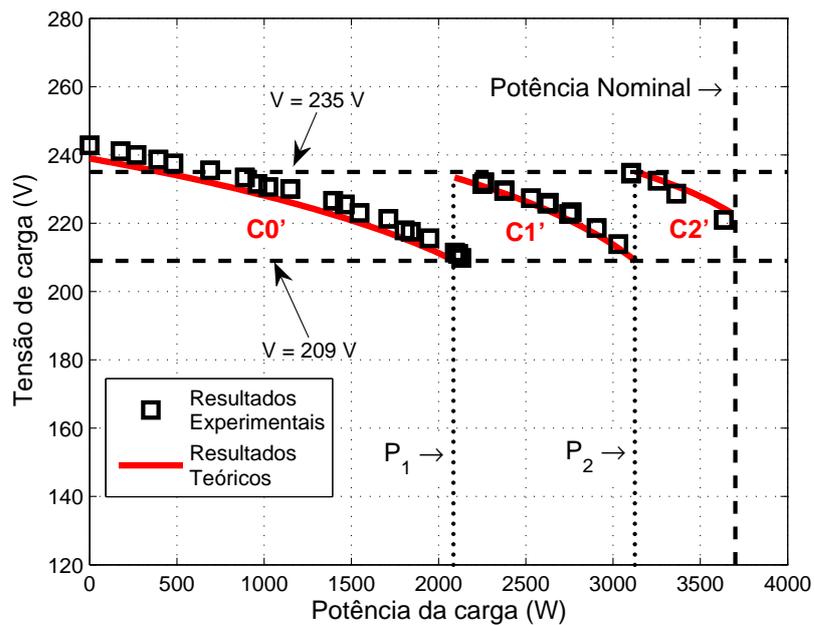


Figura 38: Resultados teóricos e experimentais de regulação de tensão para o gerador de indução com regulador.

Fonte: Autoria própria.

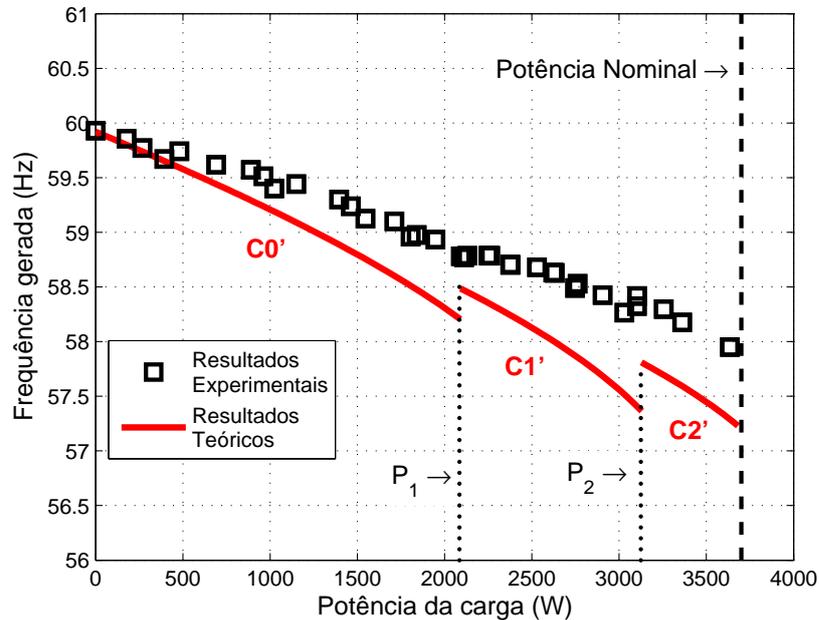


Figura 39: Resultados teóricos e experimentais de regulação de frequência para o gerador de indução com regulador.

Fonte: Autoria própria.

Através da figura 38 fica evidenciado que o método das impedâncias, bem como a estratégia de projeto do regulador, permitiu representar o comportamento da amplitude da tensão gerada satisfatoriamente.

Já na regulação de frequência na figura 39, existe uma divergência que chega a 1 Hz nas potências próximas da nominal.

A figura 40 apresenta a comparação entre a previsão teórica e os resultados práticos de amplitude e frequência da tensão gerada no gráfico de limites de operação da NBR 7094 .

No gráfico da figura 40, a previsão de comportamento está distante dos resultados experimentais devido ao fato da baixa qualidade com a qual o modelo das impedâncias prevê a frequência gerada.

Por outro lado, os resultados experimentais se encontram mais próximos do centro do gráfico (Zona A), e isto é favorável à operação da máquina com menor desvio das condições nominais.

A magnitude da tensão gerada pelo gerador de indução autoexcitado é afetada pelas condições de: capacitância de excitação, corrente de carga, fator de potência da carga, parâmetros de máquina e velocidade de acionamento (BANSAL, 2005)(SIMÕES; FARRET, 2008) (HAQUE, 2008).

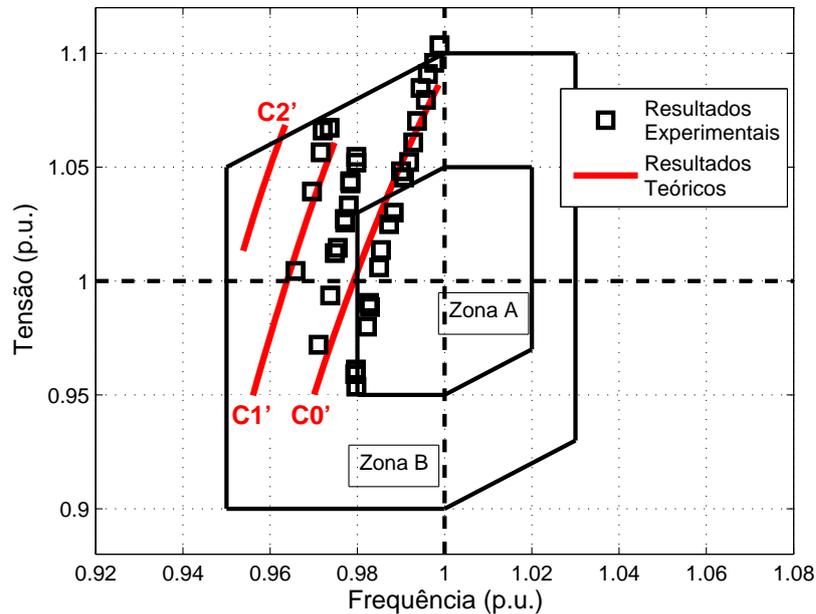


Figura 40: Resultados teóricos e experimentais de tensão e frequência normalizados comparados aos limites da norma NBR 7094.

Fonte: Autoria própria.

Desses parâmetros: a velocidade é admitida constante, pela presença de um regulador de velocidade no sistema; a capacitância de excitação é manipulada pelo regulador de tensão; e os parâmetros da máquina são considerados constantes para uma máquina real admitida (exceto X_m).

Com respeito à carga, este trabalho até agora assumiu de fator de potência unitário para projetar e testar o regulador à capacitores *shunt* chaveados.

Uma vez que as cargas conectadas ao gerador podem ter diferentes necessidades de reativo, é interessante explorar o desempenho do regulador quando em outras condições de fator de potência das cargas alimentadas pela máquina.

Uma vez observada na figura 38 que os resultados teóricos e experimentais do regulador de tensão apresentam um afastamento máximo de $5 V$, a investigação do desempenho do regulador para cargas de diferentes fatores de potência é conduzida apenas teoricamente.

A figura 41 apresenta as regulações teóricas de tensão do gerador controlado pelo regulador implementado neste trabalho na situação de alimentação de cargas de diferentes fatores de potência.

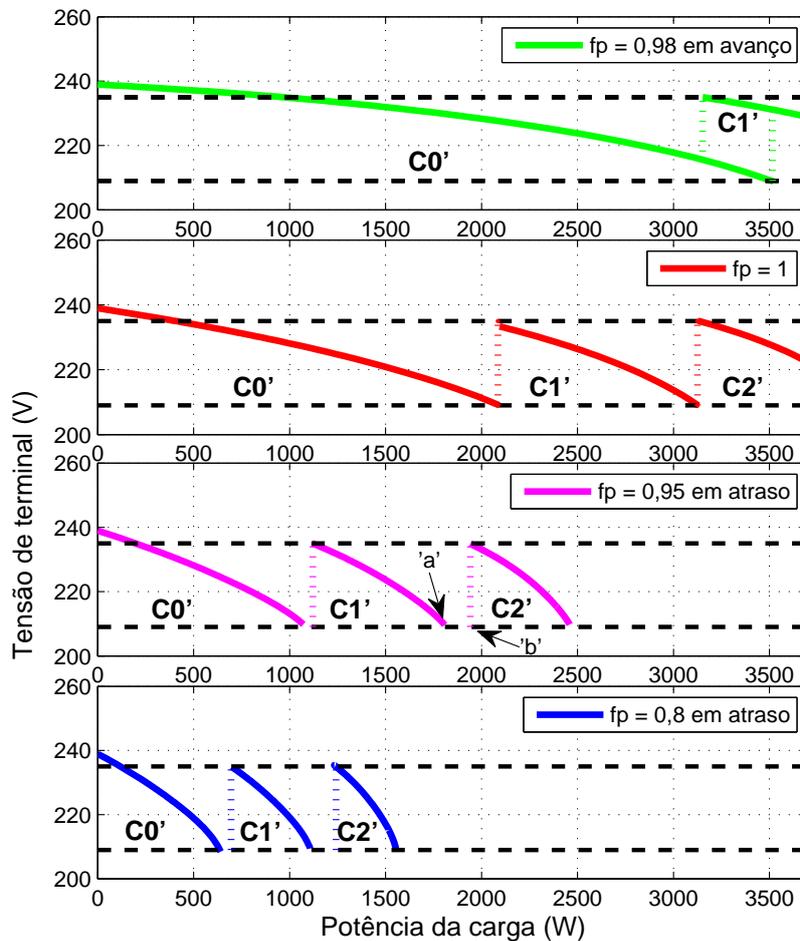


Figura 41: Mudança no perfil de tensão em regime permanente em função do fator de potência da carga para o regulador à capacitores chaveados.

Fonte: Autoria própria.

A partir dos gráficos da figura 41, observa-se que a potência máxima possível de ser fornecida pelo SEIG diminui conforme o fator de potência da carga se torna mais indutivo (em atraso). Isso pode ser explicado pelo fato de que cargas indutivas consomem parte da energia reativa fornecida ao sistema pelo banco de capacitores. Em outras palavras, o aumento da carga indutiva faz a máquina enxergar uma capacitância de excitação equivalente menor, e com esse menor fornecimento de reativo ocorre a redução da excitação da máquina e conseqüente queda na tensão mais acentuada quando num aumento de carga.

Além desse fator, o método de controle, que somente monitora somente a tensão para tomada de decisões, está submetido ao mau funcionamento em algumas faixas de potência não atendidas pelas curvas de capacitâncias C'_0 , C'_1 ou C'_2 quando em cargas de fator de potência em atraso. Em outras palavras, a faixa de potência

entre o ponto 'a' (encontro da curva C_1' com o limite 209 V) e o ponto 'b' (encontro da curva C_2' com o limite superior de 235 V) da regulação de tensão para carga ' $f_p = 0.95$ em atraso' não possui uma tensão possível de operação dentro da faixa de variação de tensão projetado (209 a 235 V).

Para o caso de cargas com fator de potência em avanço, o intervalo de potência atendido por C_0' é superior ao intervalo de potência atendido pela mesma capacitância em carga resistiva. Isso porque a capacitância da carga faz aumentar a capacitância equivalente vista pelo gerador, ou seja, aumenta a potência reativa fornecida à máquina, favorecendo a excitação do gerador. Nota-se também a não ocorrência de descontinuidade na faixa de potência compreendida entre a condição a vazio e nominal. Pelo contrário, existe uma sobreposição das curvas C_0' e C_1' nas potências próximas de 3500 W que não compromete a operação do regulador. Nesta região, caso o SEIG esteja operando na curva C_0' , somente vai ocorrer o chaveamento para C_1' se for infringido o limite inferior de tensão. Da mesma forma, caso o SEIG esteja operando na curva C_1' , somente vai ocorrer o chaveamento para C_0' se for infringido o limite superior de tensão.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma comparação entre dois modelos teóricos da máquina assíncrona atuando como gerador isolado com experimentação laboratorial.

Em conclusão sobre a comparação dos modelos teóricos, o modelo das impedâncias se mostra como o mais adequado a ser utilizado para estudos do regime permanente do SEIG. Esse modelo apresenta previsões de tensão um pouco abaixo, mas muito próximos, dos resultados experimentais. Por esse motivo ele foi empregado no projeto do regulador de tensão.

Com relação à predição de frequência gerada, o modelo de impedâncias não é preciso como seus resultados na predição de tensão. O modelo se mostra otimista enquanto que a frequência medida experimentalmente é inferior à prevista, mais acentuadamente em potências mais próximas à nominal. A origem desta divergência na predição da frequência não é discutida neste trabalho.

Já o modelo de Doxey apresentou resultados de elevado grau de otimismo, informando tensões e frequências distantes dos resultados experimentais. Considerando também a atual facilidade com a qual os recursos computacionais e de software resolvem as equações não lineares do modelo de impedâncias, conclui-se que o benefício da redução da complexidade no modelo de Doxey não é justificável visto o grande impacto do prejuízo na qualidade dos resultados.

Sob a ótica dos resultados experimentais, não se pôde concluir sobre a influência do porte da máquina nas regulações de tensão e frequência. Isso porque as duas máquinas deste trabalho não foram ensaiadas sob equivalentes níveis de excitação, ou seja, não apresentaram as mesmas tensões geradas à vazio. Para impor uma tensão de vazio é necessário aplicar o modelo teórico mais exato e encontrar a capacitância de excitação necessitada por cada máquina para estabelecer tensão de vazio iguais. Neste trabalho, através dos ensaios realizados com ambas as máquinas, só foi possível obter-se a validação da satisfatória exatidão do modelo das impedâncias e confirmação da baixa qualidade com a qual o modelo de Doxey prediz o comportamento da máquina.

Este trabalho apresentou também uma sequência de projeto e implementação de um método simples de regulador de tensão à capacitores *shunt* chaveados. Foi possível a produção de um protótipo de regulador funcional em laboratório, que atua automaticamente quando detectada sobretensão ou subtensão no sentido de inserir ou remover capacitâncias do terminal do gerador de indução.

O perfil de tensão de saída em função da carga alcançado experimentalmente pelo regulador está satisfatoriamente muito próximo da previsão teórica utilizando o modelo de impedâncias.

Dessa maneira, analisa-se que o aprimoramento do protótipo implementado pode ser estabelecido atuando sobre o estreitamento da faixa de variação de tensão permitida (neste trabalho experimentalmente conseguido de 209 à 235 V); e escolha e associação de capacitores mais próximos aos projetados para melhor seguir o perfil de regulação de tensão esperado em projeto.

É bem difundido na literatura que a amplitude da tensão gerada pelo SEIG é afetada pelos parâmetros: capacitância de excitação, corrente de carga, fator de potência da carga, parâmetros da máquina e velocidade de acionamento.

É preciso frisar que o comportamento do regulador não será o mesmo em uma aplicação real. Pelo fato de tomar suas decisões a partir do monitoramento da tensão, o regulador estará sujeito à dinâmica da tensão. Como a tensão é influenciada pelos fatores já citados, logo, num sistema real a dinâmica da tensão é a consequência da dinâmica da carga e velocidade. De forma indireta, então, o regulador de tensão à capacitores *shunt* chaveados será sensibilizado por possíveis afundamentos ou elevações de tensão transitórias que a dinâmica de carga e velocidade possam causar.

Sobre as lacunas de potência não atendidas que surgem nas curvas de regulação de tensão para cargas de fator de potência em atraso, pode-se levantar a hipótese de projetar a quantidade e valor dos capacitores do banco de capacitor considerando cargas em atraso como ponto de partida, ou seja, construir o gráfico da figura 25 para cargas com fator de potência em atraso. Dessa maneira, espera-se que o perfil de regulação de tensão para cargas com fator de potência menos indutivo e resistivo se comportem como o perfil de carga capacitiva da figura 41.

Por fim, este trabalho implementou e comprovou o funcionamento de um sistema de regulação de tensão para o gerador de indução com velocidade controlada,

que monitora e controla a tensão gerada do SEIG em degraus e de forma automática, capaz de alimentar cargas resistivas de até 3700 *W*. O aprimoramento deste regulador implementado neste trabalho pode levar sua aplicação à maior variedade de cargas.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7094 - Máquinas elétricas girantes - Motores de indução - Especificação**. Rio de Janeiro, 2003.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482**. 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>.

BANSAL, R.C. Three-phase self-excited induction generators: an overview. **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 292–299, June 2005. ISSN 0885-8969.

BRAGA, Alexandre Viana. **Modelagem, ajuste e implementação de um sistema de controle de tensão para o gerador de indução**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2002.

CHAPALLAZ, J.M.; GHALI, J.D.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. **Manual on Induction Motors Used as Generators**. [S.l.]: Vieweg Friedr. & Sohn Ver, 1990. 213 p. (MHPG series).

CHAPMAN, S.J. **Máquinas Elétricas**. [S.l.]: McGraw-Hill Interamericana, 2005. ISBN 9701049470.

CHAUHAN, Y.K.; JAIN, S.K.; SINGH, B. Performance of a three-phase self-excited induction generator with static synchronous series compensator. In: **Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.

EIA, Energy Information Administration. **Annual Energy Review - AER**. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/aer.pdf>>.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Demanda de energia elétrica - 10 anos**. Rio de Janeiro, Janeiro 2012.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p. ISBN 9788560031047.

HAQUE, M. H. Voltage regulation of a stand-alone induction generator using thyristor-switched capacitors. In: **Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 34–39.

IEA, International Energy Agency. **World Energy Outlook 2008**. [S.l.], 2008. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2008-1994-/WEO2008.pdf>>.

KOSOW, Irving. **Máquinas elétricas e transformadores**. São Paulo: Globo, 2005. 667 p. ISBN 8525002305.

MARRA, E.G.; POMILIO, J.A. Sistemas de geração baseados em gerador de indução operando com tensão regulada e frequência constante. **SBA Controle & Automação**, v. 11, n. 1, p. 29–36, Janeiro 2000.

ORS, M. Voltage control of a self-excited induction generator. In: **Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008. IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2008. v. 3, p. 281–286.

PALWALIA, D. K.; SINGH, S.P. Design and implementation of induction generator controller for single phase self excited induction generator. In: **Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 400–404.

SIMÕES, G.; FARRET, F.A. **Alternative Energy Systems: Design and Analysis With Induction Generators**. [S.l.]: CRC Press, 2008. (Power Electronics and Applications Series). ISBN 9781420055320.

SIMONE, G.A. **Máquinas de indução trifásicas**. [S.l.]: Ed. Érica, 2000. ISBN 9788571947085.

SINGH, B.; MURTHY, S.S.; GUPTA, S. Analysis and design of statcom-based voltage regulator for self-excited induction generators. **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 4, p. 783–790, Dec 2004. ISSN 0885-8969.

APÊNDICE A - POLINÔMIOS $V_T/F \times X_M$

O modelo de Doxey transporta a impedância de magnetização em direção aos terminais da máquina. O motivo é a redução da complexidade de cálculos da regulação de tensão e frequência.

Nas proximidades da velocidade síncrona, onde o escorregamento é próximo de zero, a parcela da impedância do rotor R_r/s , no circuito da operação como motor, pode ser admitida infinita. Consequentemente o circuito do rotor pode ser interpretado como um circuito aberto.

Com isso, ao deslocar a impedância de magnetização aos terminais da máquina, a tensão de entreferro e a tensão de terminal tornam-se iguais. Portanto, em um ensaio de magnetização onde relaciona-se a tensão de terminal V_t em função da corrente (assumida aproximadamente de magnetização I_m), a relação entre $V_g/F \times X_m$ torna-se igual à $V_t/F \times X_m$.

APÊNDICE B - POLINÔMIOS $V_G/F \times X_M$

As equações polinomiais de quinta ordem das figuras 16 e 17, que relacionam a tensão de entreferro com a reatância de magnetização, foram obtidas conforme metodologia apresentada em Singh *et al.* (2004), com adaptação ao fato de que neste trabalho despreza-se as perdas associadas à resistência do núcleo R_c da máquina de indução.

Nessa metodologia, as equações são levantadas a partir do ensaio de magnetização da máquina: fazendo a máquina atuar como motor a vazio, aplica-se diferentes tensões, à frequência nominal ($F = 1$) nos terminais da máquina até alcançar a saturação da mesma. Para cada tensão aplicada são mensuradas: potência ativa absorvida (P), tensão por fase Y (V) e corrente de linha (I).

Nas proximidades da velocidade síncrona, onde o escorregamento é próximo de zero, a impedância do rotor pode ser admitida infinita. Conseqüentemente o circuito do rotor pode ser interpretado como um circuito aberto. Com isso, baseando-se no circuito do gerador de indução da figura 6 segue-se as equações (20), (21) e (22) para obtenção de V_g/F em função de X_m .

$$P = \sqrt{3}.V.I.\cos(\theta) \quad (20)$$

$$V_g = V - I(\cos(\theta) - i.\sen(\theta))(R_s + i.X_s) \quad (21)$$

$$X_m = V_g/I \quad (22)$$

Com os valores da tensão de entreferro na frequência nominal V_g e a reatância de magnetização X_m obtidos para todos os pontos da curva de magnetização da máquina, é então possível construir a relação gráfica desses pontos (V_g em função de X_m).

Com a função do software MATLAB chamada '*polyfit*' é possível aproximar o comportamento dos pontos $V_g \times X_m$ por uma expressão polinomial. Essa expressão somente é válida quando $F = 1$, como é o caso do ensaio de magnetização. Para torná-la adequada ao gerador de indução, que sofre de variação de frequência síncrona, faz-se a alteração de V_g para V_g/F para que o polinômio represente a tensão de entreferro em função da reatância de magnetização em qualquer condição de frequência por unidade F na qual a máquina esteja a operar. Tal expressão, admitida de quinta ordem, foi apresentada nas figuras 16 e 17 para as duas máquinas ensaiadas.