

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Caison Rodrigues Ramos**

**REGULAÇÃO DE TENSÃO POR BANCOS DE  
CAPACITORES APLICADOS EM UM SISTEMA DE  
MICROGERAÇÃO QUE UTILIZA GERADOR DE INDUÇÃO  
AUTOEXCITADO**

**Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2019**

Caison Rodrigues Ramos

**REGULAÇÃO DE TENSÃO POR BANCOS DE CAPACITORES  
APLICADOS EM UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO QUE UTILIZA  
GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

**Orientador: Prof. Dr. Celso Becker Tischer**

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2019

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ramos, Caison Rodrigues

Regulação de tensão por bancos de capacitores aplicados em um sistema de microgeração que utiliza gerador de indução autoexcitado / Caison Rodrigues Ramos - 2019

67 p.; 30 cm

Orientador: Celso Becker Tischer

TCC (graduado) – Universidade Federal de Santa Maria - Campus Cachoeira do Sul, Curso de Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Engenharia Elétrica 2. Gerador de indução 3. Chave semicondutora 4. Regulação de tensão 5. Algoritmo de comutação I. Tischer, Celso Becker. II. Implementação de chave semicondutora em circuito de regulação de tensão de um gerador de indução auto-excitado.

---

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Caison Rodrigues Ramos. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Antoninha Fialho, Nº 263, Apto. 301, Bairro Santo Antônio, Cachoeira do Sul, RS, Brasil, CEP: 96506-270

Fone: (55) 999714076

Endereço Eletrônico: caisonrr@hotmail.com

---

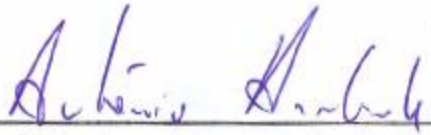
Caison Rodrigues Ramos

**REGULAÇÃO DE TENSÃO POR BANCOS DE CAPACITORES  
APLICADOS EM UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO QUE UTILIZA  
GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 10 de Dezembro de 2019:

  
\_\_\_\_\_  
Celso Becker Tischer, Dr. (UFSM)  
(Presidente/ Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Antônio Manuel Santos Spencer Andrade, Dr. (UFSM)

  
\_\_\_\_\_  
Gustavo Marchezan, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família pelo suporte e incentivos durante o período da graduação. A meu pai Ari por ser a exemplificação de honestidade, hombridade e determinação. A minha mãe, Lair, pela sua doçura e atenciosidade. A minha irmã Andara pelo apoio incondicional, racionalidade e por ser exemplo de dedicação profissional. Ao Leonardo por ser um brilho de alegria e motivação nesses últimos dois anos.

A Universidade Federal de Santa Maria e o curso de Engenharia Elétrica do Campus Cachoeira do Sul, pela oportunidade de crescimento intelectual e pessoal.

Ao meu orientador Celso Becker Tischer pelo apoio e dedicação demonstrado na elaboração desse trabalho e pelo conhecimento proporcionado ao longo da graduação, contribuindo para meu desenvolvimento acadêmico e tornando-se, para mim, um exemplo de profissional a ser seguido.

A todos os colegas, especialmente ao Bruno, Lucas e Stephanie pela valiosa ajuda, sincera amizade e momentos de descontração.

Aos meus amigos que compreenderam minha ausência em diversos momentos nos últimos anos.

E finalmente a todas outras pessoas que não foram citadas mas contribuíram de forma direta ou indireta para essa conquista.

Obrigado!

“Sucesso significa realizar seus  
próprios sonhos, cantar sua  
própria canção, dançar sua  
própria dança, criar do seu  
coração e apreciar a jornada,  
confiando que não importa o que  
aconteça, tudo ficará bem.  
Criar sua própria aventura!  
**Elana Lindquist**”

## RESUMO

# REGULAÇÃO DE TENSÃO POR BANCOS DE CAPACITORES APLICADOS EM UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO QUE UTILIZA GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO

AUTOR: CAISON RODRIGUES RAMOS  
ORIENTADOR: CELSO BECKER TISCHER

O crescimento na demanda de energia elétrica ocasionou a necessidade do uso racional de energia e do aumento da planta energética brasileira. Conseqüentemente, os pequenos aproveitamentos elétricos ganham destaque por serem empreendimentos de menor porte, e de reduzido impacto ambiental. Nestes aproveitamentos estudos demonstram vantagens do gerador de indução autoexcitados (GIAE) comparado ao síncrono, devido a sua autoproteção, menor custo e robustez. No entanto, em plantas em que os GIAEs atuam isolados é necessário que haja regulação de tensão para fornecer energia elétrica com níveis aceitáveis. Assim o objetivo desse trabalho é apresentar um estudo de topologias existentes na literatura em sistemas que utilizam GIAEs para regular a tensão gerada. A regulação ocorre através do controle da potência reativa da planta e entre as diversas topologias, a baseada em comutação por contadoras de banco de capacitores conectadas em paralelo ao sistema apresenta baixas perdas de comutação e não injeta componentes de alta frequência na linha, contudo não fornece uma regulação precisa.

**Palavras-chave:** Gerador de indução, Banco de capacitores, Regulação de tensão.

**ABSTRACT**

**IMPLEMENTATION OF SEMICONDUCTOR  
SWITCH IN VOLTAGE REGULATION CIRCUIT  
OF A SELF-EXCITED INDUCTION  
GENERATOR**

AUTHOR: CAISON RODRIGUES RAMOS  
ADVISOR: CELSO BECKER TISCHER

The growth in the demand for electric energy caused the need for the rational use of energy and the increase of the Brazilian energy plant. Consequently, the small electrical uses are highlighted because they are smaller enterprises, and of reduced environmental impact. In these studies studies demonstrate advantages of the self excited induction generator (SEIG) compared to the synchronous one, due to its self protection, lower cost and robustness. However, in plants where SEIGs act in isolation, there is a need for voltage regulation to provide electric energy with acceptable levels. Thus, the objective of this project is to present a study of existing topologies in the literature in systems that use SEIGs to regulate the generated voltage. The regulation occurs through the control of the reactive power of the plant and among the several topologies, the one based on switchable capacitors bank connected in parallel to the system presents low switching losses and does not inject high frequency components in the line, however does not provide a regulation need.

**Keywords:** Induction generator, Capacitor Bank, Voltage regulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	–	Projeção de demanda de eletricidade (TWh) de 2016 a 2026.....	14
Figura 2.1	–	Diagrama de trabalho das principais máquinas rotativas.....	18
Figura 2.2	–	Aspectos construtivos de um gerador síncrono .....	19
Figura 2.3	–	Gerador de indução de pequeno porte .....	20
Figura 2.4	–	Gerador de indução conectado a rede com conversor back to back ..	21
Figura 2.5	–	Regulação de tensão baseada em reator de núcleo saturável.....	22
Figura 2.6	–	Regulação de tensão baseada em bancos de capacitores em paralelo	23
Figura 2.7	–	STATCOM conectado à rede .....	23
Figura 2.8	–	Elementos de um conversor chaveado.....	24
Figura 2.9	–	Diodo equivalente a um esquemático de chave.....	25
Figura 2.10	–	Retificador controlado de silício: estrutura PNP e símbolo .....	25
Figura 2.11	–	Estrutura NPN e símbolo de um TJB .....	26
Figura 2.12	–	Símbolo de um MOSFET .....	27
Figura 2.13	–	Estrutura e símbolo de um GTO .....	27
Figura 2.14	–	Símbolo e esquemático de um IGBT.....	28
Figura 2.15	–	Comparação de chaves condutoras controladas.....	29
Figura 2.16	–	Operação do controle ON-OFF.....	30
Figura 3.1	–	Fornecimento de energia reativa ao gerador de indução por capacitores	31
Figura 3.2	–	Autoexcitação de um gerador de indução .....	32
Figura 3.3	–	Curva de magnetização de uma máquina assíncrona.....	32
Figura 3.4	–	Algoritmo de comutação por chaves discretas dos bancos de capaci- tores em paralelo.....	34
Figura 3.5	–	Algoritmo de comutação por chaves semicondutoras dos bancos de capacitores em paralelo.....	36
Figura 3.6	–	Progressão do sinal de razão cíclica para acoplamento de banco de capacitores.....	37
Figura 4.1	–	Planta de referência.....	38
Figura 4.2	–	Projeto de capacitor pela corrente de magnetização .....	39
Figura 4.3	–	Tensão e corrente de saída do gerador ao ser acionado pela máquina primária .....	40
Figura 4.4	–	Amplitude da tensão de saída do GIAE com variações de cargas resistivas, capacitivas e indutivas.....	41
Figura 5.1	–	Planta simulada sem regulação de tensão .....	43
Figura 5.2	–	Tensão de saída e potência reativa do sistema sem regulação de tensão	43
Figura 5.3	–	Planta simulada com chaves discretas .....	44
Figura 5.4	–	Tensão de saída, potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves discretas .....	45
Figura 5.5	–	Planta simulada com chaves semicondutoras .....	46
Figura 5.6	–	Bloco de chaveamento .....	47
Figura 5.7	–	Tensão de saída, potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves IGBTs.....	47
Figura 5.8	–	Comparação entre as tensões .....	48
Figura 6.1	–	Componentes da bancada de simulação de um sistema de microgera- ção.....	49
Figura 6.2	–	Inversor de Frequência e conjunto máquina primária/gerador de in- dução .....	50
Figura 6.3	–	Programação para o DSP .....	50
Figura 6.4	–	Bancada de cargas resistivas .....	51
Figura 6.5	–	Bancada de cargas capacitivas.....	51

Figura 6.6 – Bancada de cargas indutivas .....	52
Figura 6.7 – Comportamento de partida do gerador e forma de onda das tensões de linha e corrente do gerador .....	53
Figura 6.8 – Resposta da tensão de saída a cargas resistivas de 300 W, 600 W e 1800 W .....	53
Figura 6.9 – Potência reativa no com cargas resistivas de 300W, 600 W e 1800 W .....	54
Figura 6.10 – Resposta da tensão de saída a sobreposição de cargas resistivas de duas cargas de 300 W e uma de 600 W .....	54
Figura 6.11 – Potência reativa do sistema com cargas sobrepostas resistivas de 300W e 600 W .....	55
Figura 6.12 – Resposta da tensão e corrente de saída a cargas capacitivas de $6\mu\text{F}$ , $12\mu\text{F}$ e $25\mu\text{F}$ .....	55
Figura 6.13 – Potência reativa do sistema com cargas capacitivas de $6\mu\text{F}$ , $12\mu\text{F}$ e $25\mu\text{F}$ .....	56
Figura 6.14 – Resposta da tensão e corrente de saída a cargas capacitivas sobrepostas de $6\mu\text{F}$ e $12\mu\text{F}$ .....	56
Figura 6.15 – Potência reativa do sistema com cargas capacitivas sobrepostas de $6\mu\text{F}$ e $12\mu\text{F}$ .....	57
Figura 6.16 – Forma de onda e valor RMS da tensão de saída, com uma carga de $18\mu\text{F}$ .....	57
Figura 6.17 – Forma de onda e valor RMS da tensão de saída, com uma carga de $6\mu\text{F}$ .....	58
Figura 6.18 – Resposta da tensão de saída a cargas indutiva .....	58
Figura 6.19 – Resposta da tensão de saída a sobreposição de duas cargas resistivas de 600 W .....	59
Figura 6.20 – Potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves discretas com duas cargas resistivas sobrepostas de 600 W .....	60
Figura 6.21 – Resposta da tensão e corrente de saída a sobreposição de cargas resistivas de 600 W e 1800 W .....	61
Figura 6.22 – Potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves discretas com cargas sobrepostas de 600 W e 1800 W ...	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual a 220 V em regime permanente .....	16
Tabela 3.1 – Combinações possíveis dos bancos de capacitores .....	33
Tabela 4.1 – Dados do gerador de indução .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>SEIG</i>	<i>Self Excited Induction Generator</i>
GIAE	Gerador de Indução Autoexcitado
GI	Gerador de Indução
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SCR	Retificadores controlados de silício
TRIAC	Tiristores triodo
TJB	Transistores de Junção Bipolar
MOSFET	Transistores de efeito de campo metal-óxido-semicondutor
GTO	Tiristores de desligamento por porta
IGBT	Transistor bipolar de porta isolada
CC	Corrente Contínua
$Q_{SIS}$	Potência reativa do sistema
$Q_{SIS}$	Potência reativa de referência
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ZOH	Zero-Order Hold
Q	Carga
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FP	Fator de potência

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS GERAIS	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	18
2.1 MÁQUINAS ROTATIVAS	18
2.1.1 Gerador síncrono	19
2.1.2 Gerador assíncrono	20
2.1.3 Aplicação dos geradores assíncronos em fontes energéticas	21
2.2 TOPOLOGIAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO	22
2.2.1 Conversores a capacitor chaveado	23
2.3 CHAVES SEMICONDUTORAS	24
2.3.1 TBJs	26
2.3.2 MOSFETs	26
2.3.3 GTO	27
2.3.4 IGBTs	27
2.3.5 Comparação entre chaves controladas	28
2.3.6 Estratégias de modulação aplicadas em chaves semicondutoras	29
<b>3 METODOLOGIA DE PROJETO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO</b>	31
3.1 GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO POR BANCO DE CAPACITORES	31
3.2 TOPOLOGIA DE REGULAÇÃO: CAPACITORES EM PARALELO	33
3.3 ALGORITMO DE COMUTAÇÃO PARA AS CHAVES DISCRETAS	33
3.4 CHAVES SEMICONDUTORA	35
3.5 ALGORITMO DE COMUTAÇÃO PARA CHAVES SEMICONDUTORAS	36
<b>4 DESCRIÇÃO DA PLANTA DE MICROGERAÇÃO</b>	38
4.1 GERADOR DE INDUÇÃO	38
4.2 CAPACITOR DE EXCITAÇÃO	39
4.3 COMPORTAMENTO DE TENSÃO DO SISTEMA DE MICROGERAÇÃO PARA CARGAS LINEARES	40
<b>5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO</b>	42
5.1 PLANTA SEM REGULAÇÃO DE TENSÃO	42
5.2 PLANTA COM REGULAÇÃO DE TENSÃO COM CHAVES DISCRETAS	44
5.3 PLANTA COM REGULAÇÃO DE TENSÃO COM CHAVES SEMICONDUTORAS	45
5.3.1 Estratégia de chaveamento	46

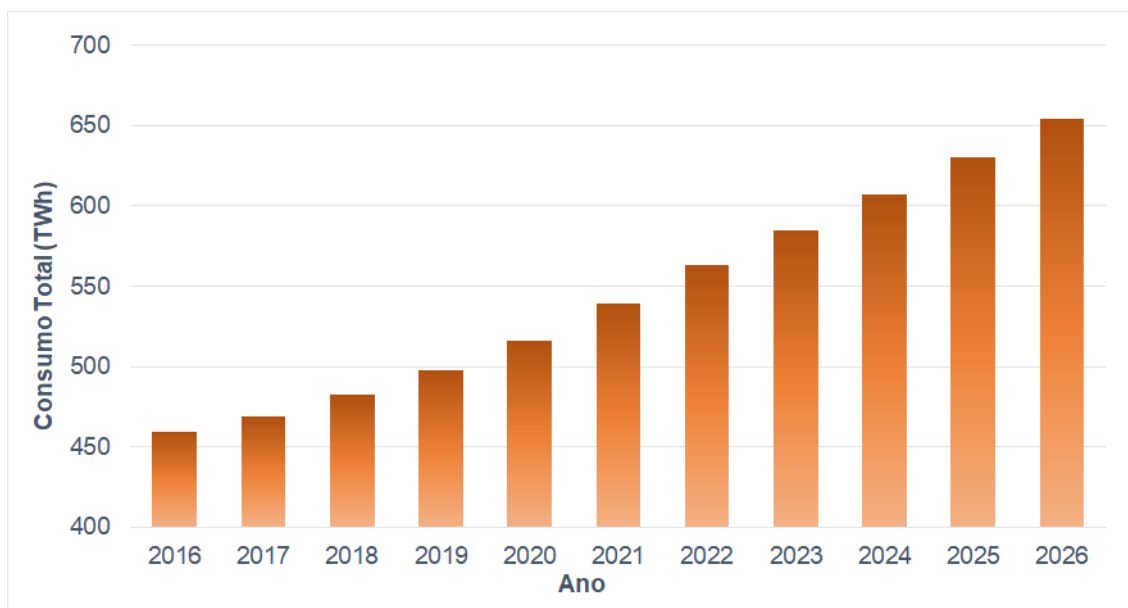
5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	48
<b>6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>49</b>
6.1 BANCADAS EXPERIMENTAL .....	49
6.2 PLANTA SEM TOPOLOGIA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO .....	52
6.3 PLANTA COM TOPOLOGIA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO COM CHAVE DISCRETA .....	59
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	62
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Levando em consideração a conjuntura econômica atual, o crescimento populacional e a utilização progressiva de sistemas que necessitam de grandes quantidades de energia, os estudos de projeção elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) preveem aumentos significativos na demanda de energia elétrica.

Na Figura 1.1 é apresentada a projeção de consumo de energia elétrica no Brasil. Foi considerado para a elaboração desse gráfico, o consumo total como a soma entre o consumo do Sistema Interligado Nacional e o consumo dos sistemas isolados (EPE, 2017). É possível verificar, que pela projeção, ocorrerá um aumento de aproximadamente 194,42 TWh no período de dez anos, o que corresponde o acréscimo de 42,3 % do consumo de eletricidade entre 2016 a 2026.

Figura 1.1 – Projeção de demanda de eletricidade (TWh) de 2016 a 2026



Fonte: (EPE, 2017).

No relatório parcial do cenário de demanda do ano de 2050 (ENERGIA, 2018), afirma-se que será necessário para prover em totalidade energia elétrica para a população, o uso eficiente da mesma pela expansão da oferta de energia elétrica, promovidas pela geração centralizada e pela autoprodução de eletricidade com base na geração distribuída, necessitando assim, o aumento da planta energética brasileira (LOSEKANN; HALLACK, 2018). Esse acréscimo pode ocorrer a partir da maior utilização dos diversos tipos de aproveitamentos energéticos e da implementação de centrais de transformação que utilizem fontes renováveis.

A energia renovável é o termo utilizado para descrever a gama de fontes de energia, nas quais, suas matérias primas tem taxa de renovação maior que de consumo. Esse efeito,

por exemplo, ocorre nos potenciais eólicos, hídricos e maremotriz (GOLDEMBERG; LUCON, 2006). É de suma importância que tais fontes estejam inseridas nas políticas energéticas dos países, pois geram sustentabilidade ao sistema elétrico, diminuindo a necessidade de combustíveis fósseis. (COSTA; PRATES, 2005). O potencial a ser explorado da energia disponível em pequenas hidrelétricas e em fontes eólicas tornam-se bastante promissor para atender a futura demanda de energia, principalmente em áreas remotas e isoladas (SINGH; AZAD; KUMAR, 2016).

A geração de energia elétrica pode ser classificada a partir da potência convertida da fonte de energia, sendo que a nomenclatura vigente define como pequenos aproveitamentos, as centrais de conversão de fontes de energia em eletricidade capazes de gerar 5 MW até 30 MW. Os mini aproveitamentos são centrais que possuem potência entre 75 kW a 5 MW, enquanto os micro aproveitamentos possuem limite de conversão de no máximo 75 kW (ANEEL, 2018). Para mini, pequenos e grandes aproveitamentos abastecerem diversos consumidores, é necessária uma preocupação com a qualidade da energia oferecida, sendo estas normatizadas por diversas características, dentre as quais destacam-se faixas de tensão e frequência geradas.

Os diferentes tipos de centrais geradoras de eletricidade, presentes nos aproveitamentos acima citados, podem estar em redes isoladas ou ligadas a rede interligada nacional (LOPES et al., 2008). Os micro aproveitamentos são praticamente livres de normas legais, porém possuem forte dependência em relação as cargas à elas ligadas. Todavia, por possuírem uma pequena geração, as instalações dessas centrais permitem ter um investimento gradativo (FARRET, 2010). Na maioria dos casos esse tipo de geração é utilizado em lugares isolados ou para diminuição de despesas de energia, contudo é raro que tal aproveitamento seja utilizado de forma coletiva ou comercial (FARRET, 2010).

Como nos demais aproveitamentos, no micro aproveitamento a energia é encontrada na natureza em seu formato bruto, devendo ser captada e convertida para permitir a sua utilização como energia elétrica, para esse fim ,são utilizados os sistemas de conversão. Geralmente nesses conjuntos são utilizadas máquinas elétricas, os geradores, sendo possíveis os mesmos serem máquinas síncronas ou assíncronas. Essas, devem ser adaptadas conforme a carga que se destinam (FARRET, 2010).

Em aproveitamentos de energia de pequena potência, principalmente em micro centrais hidroelétricas, estudos de comparação entre geradores de energia elétrica demonstram vantagens do gerador de indução frente ao síncrono, devido a sua robustez, ao menor investimento inicial e sua autoproteção (TISCHER, 2013) (VANCO et al., 2018). Todavia em sistemas com gerador autoexcitados atuando isoladamente é necessário que haja regulação de tensão, para que o gerador possa gerar energia com níveis de tensão e frequência aceitáveis, pois o gerador de indução necessita aporte de energia reativa proveniente da rede (MUSA; ZAHAWI; GADOUE, 2013).

O Módulo oito do PRODIST que trata de qualidade de energia define os limites



de tensões adequadas à utilização. A Tabela 1.1 informa os valores de tensão adequada, precária e crítica de uma rede de 220 V em regime permanente.

Tabela 1.1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual a 220 V em regime permanente

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(191 \leq TL \leq 202 \text{ ou } 231 \leq TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: (ANEEL, 2017).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Para os problemas de aumento na demanda de eletricidade é necessário, entre outros aspectos, o uso racional e eficiente na produção de energia elétrica. Para tal, é importante observar as diversas fontes renováveis e o seu melhor aproveitamento, sendo que uma das maneiras de suprir a demanda de energia elétrica prevista é através da geração distribuída em pequena escala.

A utilização de um sistema de microgeração que trabalha com gerador assíncrono associado a uma topologia de regulação de tensão baseada em bancos de capacitores é eficiente e de baixo custo, porém possui a problemática quanto a regulação efetiva das tensões geradas devido a comutação dos bancos de capacitores ser discreta, pois realiza o chaveamento através de contadoras ligadas em paralelo com o sistema.

Sendo assim, a substituição das contadoras por chaves semicondutoras pode ser uma alternativa viável para o sistema de geração proposto, possibilitando assim, a utilização mais eficiente do mesmo.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo de topologias para regulação de tensão aplicadas a sistemas de microgeração de energia elétrica que empregam geradores de indução autoexcitado.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O projeto possui os seguintes objetivos específicos:

- Estudo referente ao cenário de geração de energia elétrica e aproveitamento de fontes

renováveis de energia;

- Estudo do gerador de indução autoexcitados;
- Estudos de topologias aplicados em geradores de indução autoexcitado (GIAE) para regulação da tensão gerada;
- Estudo de técnicas de modulação aplicadas em chaves semicondutoras para comutação de capacitores em circuitos trifásicos;
- Desenvolvimento de algoritmo de comutação das chaves em sistemas de geração com GIAE;

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A partir desta seção, o trabalho está dividido em dois capítulos. No capítulo 2 é apresentado o referencial teórico que descreve os conhecimentos prévios para a realização deste projeto. O capítulo 3 apresenta a metodologia de projeto para regulação de tensão. O capítulo 4 apresenta a descrição da planta e de seus componentes. O capítulo 5 mostra os resultados propiciados por simulação e a comparação dos mesmos. No capítulo 6 ocorre a demonstração de resultados da bancada experimental. O relatório se encerra no capítulo 7, onde são realizadas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

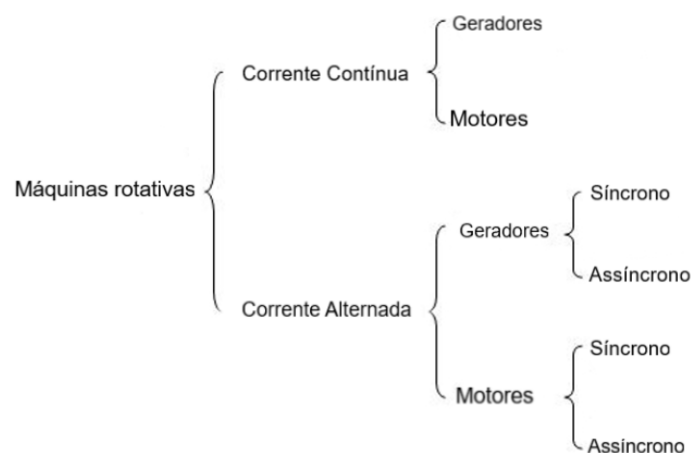
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MÁQUINAS ROTATIVAS

A conversão eletromagnética de energia é o processo no qual a variação de movimento mecânico resulta em fluxo magnético e vice-versa. As máquinas rotativas são os principais dispositivos capazes de realizar estas conversões, propiciando assim, energia elétrica ou torque ao sistema. Nas máquinas rotativas as tensões podem ser geradas em enrolamentos ou grupos de bobinas através de três formas básicas: a rotação mecânica dos enrolamentos em campo magnético, o campo magnético girante atravessando um enrolamento ou pela variação de relutância do circuito magnético conforme rotação por parte do circuito (MARTIGNONI, 1995).

Conforme ilustrado na Figura 2.1 , há diversos tipos de máquinas elétricas rotativas capazes de atuar na conversão da energia presente nas fontes energéticas, entre elas destacam-se as máquinas assíncronas e síncronas.

Figura 2.1 – Diagrama de trabalho das principais máquinas rotativas



Fonte: (BETTONI, 2014).

Nas máquinas síncronas a corrente de campo magnético é fornecida por uma fonte de corrente contínua externa, esses circuitos de excitação pode ser por anéis deslizantes a partir de uma máquina CC conhecida como excitatriz, por excitatrizes CA ou por retificadores de estado sólido (pontes simples a diodos ou com retificadores de chaves controladas) (FITZGERALD; KINGSLEY; D, 2003). Tais máquinas são bastante flexíveis pois podem absorver potência ativa quando operando como motor ou prover potência ativa quando trabalha como gerador e fornecendo potência reativa ao sistema (TISCHER, 2011).

Nas máquinas assíncronas a corrente é fornecida por indução magnética em seus enrolamentos de campo (CHAPMAN, 2013). Desde sua invenção por Tesla, no século XIX, esta máquina é largamente utilizada devido a sua robustez, custo reduzido, construção simples, pouca manutenção e alta densidade de corrente (KREUTZFELD, 2001).

Nas subseções seguintes serão abordadas as aplicações, funcionamento e aspectos construtivos de geradores síncronos e assíncronos. Também será discutido a utilização de um gerador de indução como gerador autoexcitado e o cálculo da capacitância fixa utilizada para tal aplicação.

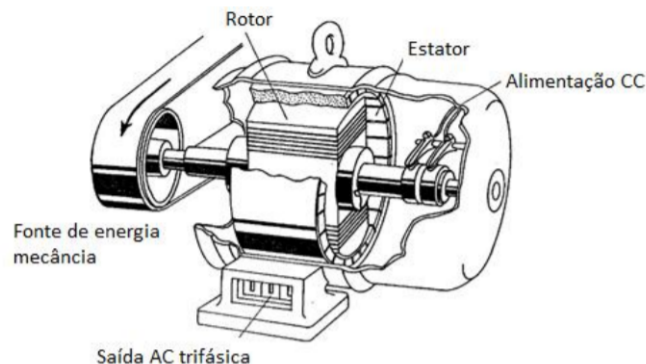
### 2.1.1 Gerador síncrono

Os geradores síncronos possuem essa nomenclatura pois a velocidade de rotação está sincronizada com a frequência elétrica produzida, logo, a frequência da energia elétrica de saída ( $f_{SE}$ ), demonstrada na Equação 2.1, depende da velocidade de rotação mecânica de entrada ( $n_m$ ) e do número de polos do gerador ( $P$ ).

$$f_{SE} = \frac{n_m P}{120} \quad (2.1)$$

A Figura 2.2 representa, de maneira simplificada, o formato construtivo de um gerador síncrono. A partir da representação de corte é possível identificar o rotor, o estator e a alimentação CC da máquina.

Figura 2.2 – Aspectos construtivos de um gerador síncrono



Fonte: (HOMRICH, 2013).

O enrolamento de campo de uma máquina síncrona localiza-se no rotor e o enrolamento de armadura no estator. Os enrolamentos de campo produzem o campo magnético principal da máquina enquanto os enrolamentos de armadura são os quais é induzida a tensão principal (TORO, 1990). O enrolamento de campo, desta máquina, é excitado a partir de uma corrente contínua externa, conduzidas ao rotor, por meio de escovas e anéis coletores, em alguns casos é possível que o enrolamento de campo possa ser alimen-

tado a partir de um sistema de excitação rotativo, denominado de excitação sem escovas (CHAPMAN, 2013). Com a rotação do rotor por meio de uma força mecânica, se produz um campo magnético rotacional no gerador, este campo, induz tensões nos enrolamentos do estator.

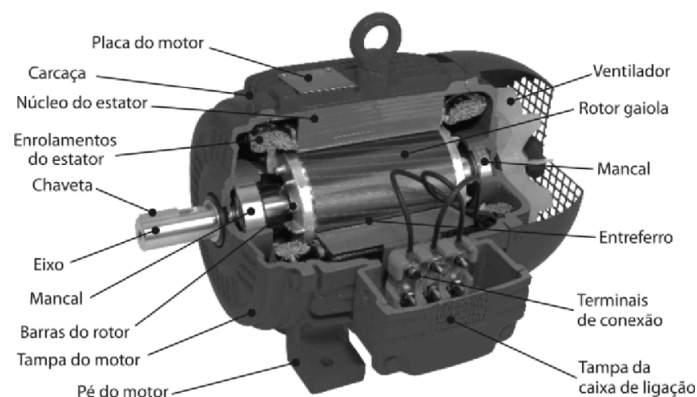
De forma geral o uso de geradores síncronos tem melhor desempenho em vista de perfil de tensão em regime permanente, estabilidade de tensão e transitória do que as demais máquinas (FREITAS et al., 2006).

Em usinas hidrelétricas e termoelétricas de grande porte são utilizados geradores síncronos. Contudo, o seu alto custo relativo desse gerador inviabiliza sua utilização em centrais geradoras de pequena potência (SCHERER, 2012).

### 2.1.2 Gerador assíncrono

As máquinas de indução, ou máquinas assíncronas, há muito despertam o interesse da comunidade científica e da indústria, por apresentar baixo índice de manutenção e apresentam ampla disponibilidade comercial (TRAPP, 2008). Os geradores de indução são utilizados em diversas plantas de pequena geração, sendo que as principais razões para seu emprego são a simplicidade de sua construção e o baixo custo (JENKINS, 1995). Em sua maioria, são empregados em parques eólicos, todavia tais máquinas têm sido utilizadas em usinas hidrelétricas e termoelétricas de pequeno a médio porte. A Figura 2.3 ilustra a parte construtiva de um gerador assíncrono e identifica suas principais partes mecânicas.

Figura 2.3 – Gerador de indução de pequeno porte



Fonte: (SANTOS et al., 2007).

Nas máquinas assíncronas as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da variação das correntes no estator e do movimento do rotor em relação ao estator, ocasionando o escorregamento da máquina (FITZGERALD; KINGSLEY; D, 2003). O escorregamento da máquina pode ser definido como a diferença entre a velocidade síncrona

e a velocidade do rotor. Logo, conforme visto na Equação (2.2), a frequência de giro do rotor ( $f_{RE}$ ) é proporcional a frequência do estator ( $f_{SE}$ ) multiplicado pelo escorregamento ( $s$ ). Em um gerador a velocidade rotacional do rotor será uma velocidade superior a velocidade síncrona.

$$f_{RE} = sf_{SE} \quad (2.2)$$

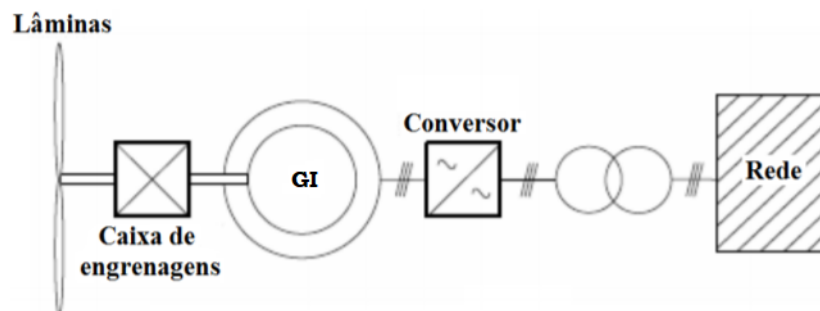
O GI pode ser conectado à rede elétrica ou operar de forma isolada. Quando conectado à rede consegue gerar tensões trifásica com frequência constante, mesmo se acionado com velocidade variável (TRAPP, 2008). Todavia, em sistemas isolados o GI possui uma regulação de tensão e frequência insatisfatórias. Contudo, a energia reativa para criar o campo magnético do gerador de indução pode ser fornecida por topologias de regulação (RECH et al., 2008).

### 2.1.3 Aplicação dos geradores assíncronos em fontes energéticas

Para a conversão da energia cinética dos ventos são utilizados nos aerogeradores os geradores de indução trifásica gaiola de esquilo, com rotor bobinado, de relutância variável e síncronos.

Em conjunto com os geradores de indução são utilizados conversores eletrônicos de potência, permitindo assim que o gerador opere com controle de velocidade variável. Nos sistemas que empregam geradores síncronos é comum utilizar retificadores não controlados conectados ao estator que compartilha o mesmo elo de corrente que um inversor trifásico conectado a rede ou ainda, é inserido um conversor abaixador/elevador de tensão. Os geradores de indução podem ser conectados diretamente a alimentação, para o controle de potências, como demonstrado na Figura 2.4 são utilizados conversores CA-CA conhecidos como back to back.

Figura 2.4 – Gerador de indução conectado a rede com conversor back to back



Fonte: (NASCIMENTO, 2014).

A tecnologia mais comum em aplicações de alta potência é o gerador de indução

de dupla alimentação. Os geradores de indução de gaiola de esquilos de velocidade fixa são os mais utilizados em pequenos parques eólicos. (FILHO; CARDOSO, 2014).

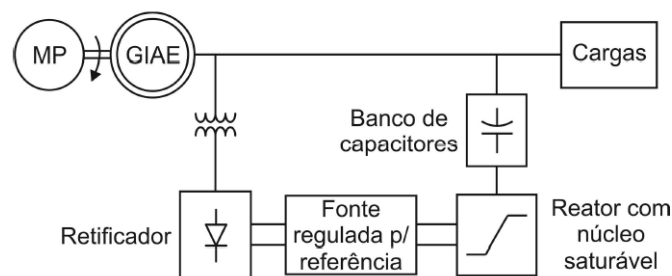
Pequenas centrais hidrelétricas (PCH), minicentrais e microcentrais podem empregar geradores de indução pelo seu menor investimento inicial, pela robustez que tal máquina agrega e baixo custos com manutenção.

## 2.2 TOPOLOGIAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

A regulação de tensão de um gerador de indução autoexcitado ocorre através do controle da potência reativa da planta e para isso, são utilizados compensadores em série ou paralelo com a máquina. Nos esquemáticos de compensação em paralelo, existem as topologias clássicas de compensação no controle de potência reativa da planta, sendo vantajosos devido sua simplicidade e por não possuir problemas com harmônicos.

As topologias clássicas em paralelo podem ocorrer de duas formas: uma baseada em condensador síncrono rotativo e outra em um reator de núcleo saturável (CHAUHAN; JAIN; SINGH, 2010). Na Figura 2.5 é representada uma topologia baseada na utilização de reator de núcleo saturável. Nesta topologia os capacitores são projetados para atenderem a plena carga indutiva do GIAE, enquanto o reator absorve corrente capacitiva quando o sistema não se encontra em plena carga indutiva (TISCHER, 2013).

Figura 2.5 – Regulação de tensão baseada em reator de núcleo saturável



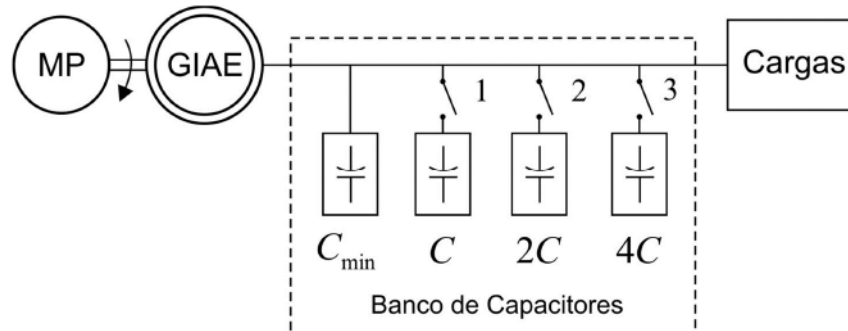
Fonte: (CHAUHAN; JAIN; SINGH, 2010).

As topologias baseadas em dispositivos chaveados acontecem através do chaveamento de componentes eletrônicos de estado sólido. Entre essas, tem destaque as topologias que realizam a comutação de cargas indutivas e/ou capacitivas ao sistema de geração.

Na Figura 2.6 é apresentada a regulação de tensão baseada na comutação de capacitores em paralelo que consiste na alternância de capacitância da planta a medida que as chaves sejam comutadas, variando assim a potência reativa do circuito. A corrente da carga é utilizada como *feedback*, o funcionamento dessa estratégia não injeta componentes de alta frequência e apresenta baixas perdas, porém provoca transientes nas formas de

onda (CHAUHAN; JAIN; SINGH, 2010).

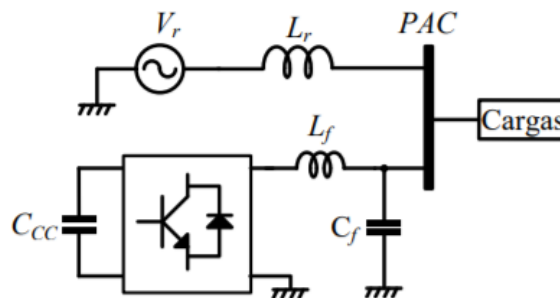
Figura 2.6 – Regulação de tensão baseada em bancos de capacitores em paralelo



Fonte: (CHAUHAN; JAIN; SINGH, 2010).

Além dessas topologias, a regulação de tensão pode ocorrer com *Static Synchronous Compensator* (STATCOM), topologias baseadas em ciclo integral, em recuperação de energia magnética, em compensadores lead-lag de estado sólido (CHAUHAN; JAIN; SINGH, 2010). A topologia baseada em STATCOM utilizam semicondutores controlados, que preferencialmente, operam com modulação por largura de pulso em alta frequência. Essa topologia é conectada em paralelo com o sistema, como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 – STATCOM conectado à rede



Fonte: (ENDERLE, 2012).

### 2.2.1 Conversores a capacitor chaveado

Inicialmente os conversores a capacitores chaveados (*Switched - Capacitor Converters - SCC*) foram empregados em aplicações em circuitos integrados, como reguladores de tensão, pois permitem a integração em chips e também a possibilidade de atingir elevados ganhos estáticos (CORTEZ, 2015).

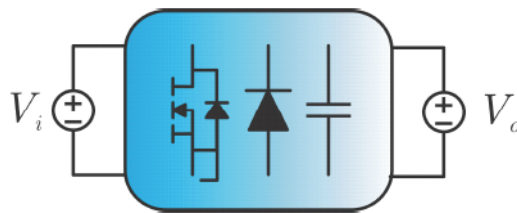
Capacitores chaveados são principalmente utilizados em conversores CC-CC com a



finalidade de multiplicar ou dividir a tensão de saída de um barramento, nessas topologias contribuem com um alto valor de fator de potência (MARTINS, 2013). Este conceito recentemente vem sendo aplicado em conversores CA-CA. (MACCARINI, 2013)

Esses conversores são constituídos por chaves controladas, diodos e capacitores. Os elementos básicos utilizados na arquitetura destes conversores são representados na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Elementos de um conversor chaveado



Fonte: (MARTINS, 2013).

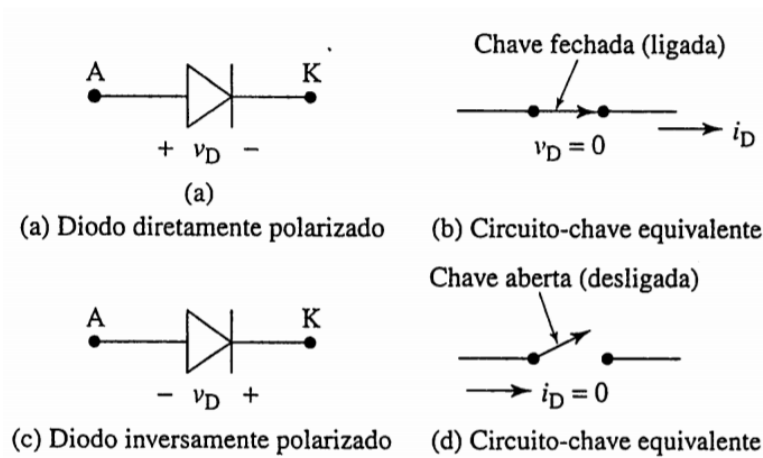
O princípio básico deste conversor se dá pela carga e descarga dos capacitores, realizando assim, indiretamente, a transferência de energia entre a fonte de entrada e a saída do conversor.

### 2.3 CHAVES SEMICONDUTORAS

Um importante enfoque de pesquisa de componentes usados em circuitos de eletrônica de potência consiste na busca de dispositivos que sejam capazes de conduzir altas correntes e elevados valores de tensão (BRAGA; BARBI, 2000). O aumento da capacidade de níveis de potência, o fácil controle e reduzidos custos dos dispositivos semicondutores, comparado ao passado, possibilitou o aumento das aplicações de chaves semicondutoras e a criação de novas topologias em eletrônicas de potência.

As chaves semicondutoras são divididas em dispositivos não controlados, semicontrolados e controlados. Em chaves não controladas se destacam o diodo de potência, nestes dispositivos o estado de bloqueio ou passagem de corrente dependem do circuito de potência. (AHMED, 2000). A Figura 2.9 relaciona a polarização do diodo com a sua atuação como chave. Quando diretamente polarizado pelo circuito, o dispositivo semicondutor atua como chave fechada, todavia quando inversamente polarizado possui características de chave aberta.

Figura 2.9 – Diodo equivalente a um esquemático de chave

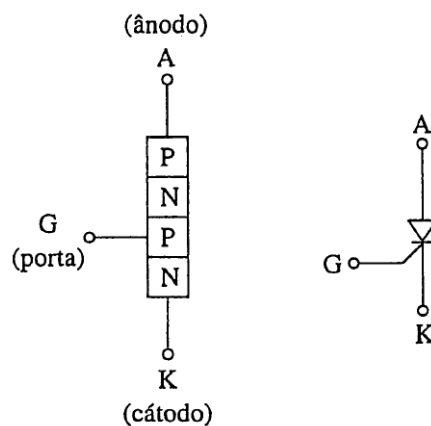


Fonte: (AHMED, 2000).

Em chaves semicontroladas a passagem de corrente ocorre a partir de acionamento por sinal externo, enquanto o bloqueio de corrente depende do circuito de potência. São utilizadas como chaves semicontroladas os retificadores controlados de silício (SCR) e os tiristores triodo (TRIAC).

Na Figura 2.10 é representado a estrutura e símbolo do SCR, esse dispositivo possui três terminais porta (G), ânodo (A) e cátodo (K). Quando está diretamente polarizado, uma tensão na porta, permite que o SCR conduza corrente, doravante, não é pela porta que ocorre o bloqueio de corrente, tal bloqueio acontece apenas quando se interrompe a corrente (AHMED, 2000).

Figura 2.10 – Retificador controlado de silício: estrutura PNP e símbolo



Fonte: (AHMED, 2000).

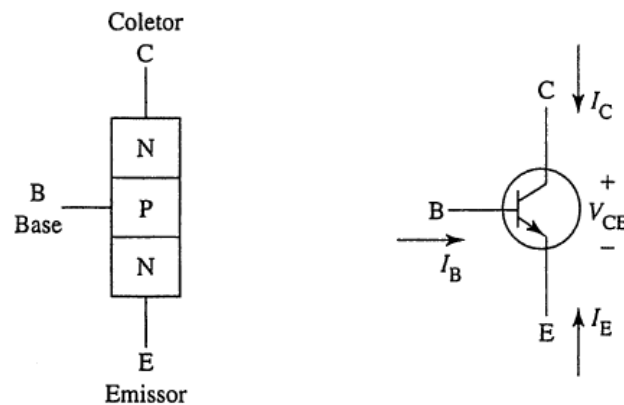
Especialmente a categoria de chaves controladas permitem o controle tanto de condução quanto de bloqueio de corrente. Esta categoria incluem diversos tipos de transistores de junção bipolar (TJBs), transistores de efeito de campo metal-óxido-semicondutor

(MOSFETs), tiristores de desligamento por porta (GTO) e transistor bipolar de porta isolada (IGBTs).

### 2.3.1 TBJs

A Figura 2.11 representa o símbolo e a estrutura de um transistor de junção bipolar. O TJB é um dispositivo com três terminais utilizado para a amplificação e chaveamento: a base, o emissor e o coletor. Ao receber sinais de corrente na base esse dispositivo permite ou bloqueia a condução de corrente entre os terminais de coletor e emissor.

Figura 2.11 – Estrutura NPN e símbolo de um TJB



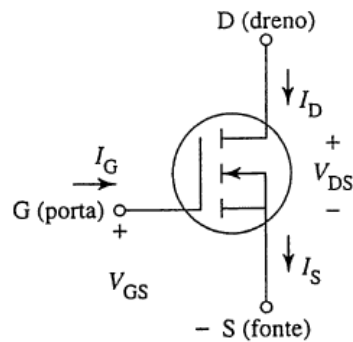
Fonte: (AHMED, 2000).

Quando atua como chave os terminais de coletor e emissor são ligados em série com o circuito principal. Já os terminais de base e emissor são ligados ao circuito acionador (RASHID, 1999). O TJB nessa condição atua nas regiões de corte e saturação, na região de corte a condução de corrente base-emissor é interrompida, enquanto na região de saturação ocorre a máxima condução de corrente entre esses terminais.

### 2.3.2 MOSFETs

O MOSFET, do inglês *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, é um transistor de chaveamento rápido que possui como características uma alta impedância de entrada apropriado para altas frequências. Assim como o TJB esse dispositivo possui três terminais: o dreno, a porta e a fonte. A Figura 2.12 representa o símbolo deste dispositivo. Quando uma tensão é aplicada a porta cria-se um canal condutor entre o dreno e a fonte, resultando em uma corrente que varia de acordo com a amplitude de tensão aplicada (POSSAGNO, 2005).

Figura 2.12 – Símbolo de um MOSFET

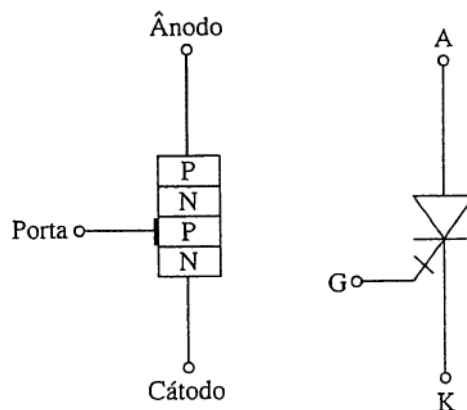


Fonte: (AHMED, 2000).

### 2.3.3 GTO

Do inglês *Gate Turn-Off Thyristor*, O GTO é um tiristor de desligamento por porta, possui uma estrutura de 4 camadas e 3 terminais: o ânodo, o cátodo e a porta. Na Figura 2.13 é representado a estrutura e símbolo de um GTO. A estrutura é semelhante ao SCR, a principal diferença é no seu funcionamento. A condução de corrente ocorre por meio de um sinal positivo na porta. O bloqueio de corrente acontece por meio de um sinal negativo na mesma.

Figura 2.13 – Estrutura e símbolo de um GTO



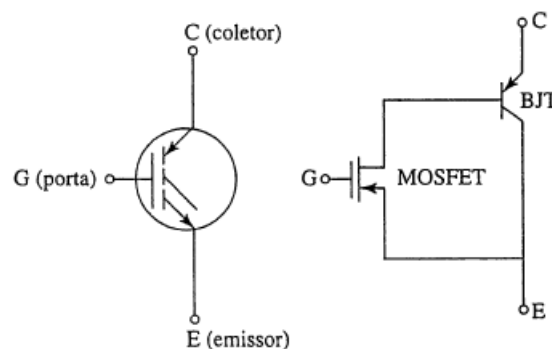
Fonte: (AHMED, 2000).

### 2.3.4 IGBTs

Do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*, o IGBT é um dispositivo controlado por tensão. Esta chave possui três terminais: a porta, o coletor e o emissor. Ocorre a

condução de corrente quando é aplicada tensão na porta. O bloqueio de corrente entre o emissor e o coletor ocorre quando a tensão de porta vai a zero (ZAMBRA, 2010). A Figura 2.14 mostra o símbolo de um IGBT e um circuito equivalente composto por um MOSFET e um TJB. O IGBT é um dispositivo que mescla a baixa queda de tensão quando em condução de um TJB com as características de chaveamento de um MOSFET (AHMED, 2000).

Figura 2.14 – Símbolo e esquemático de um IGBT



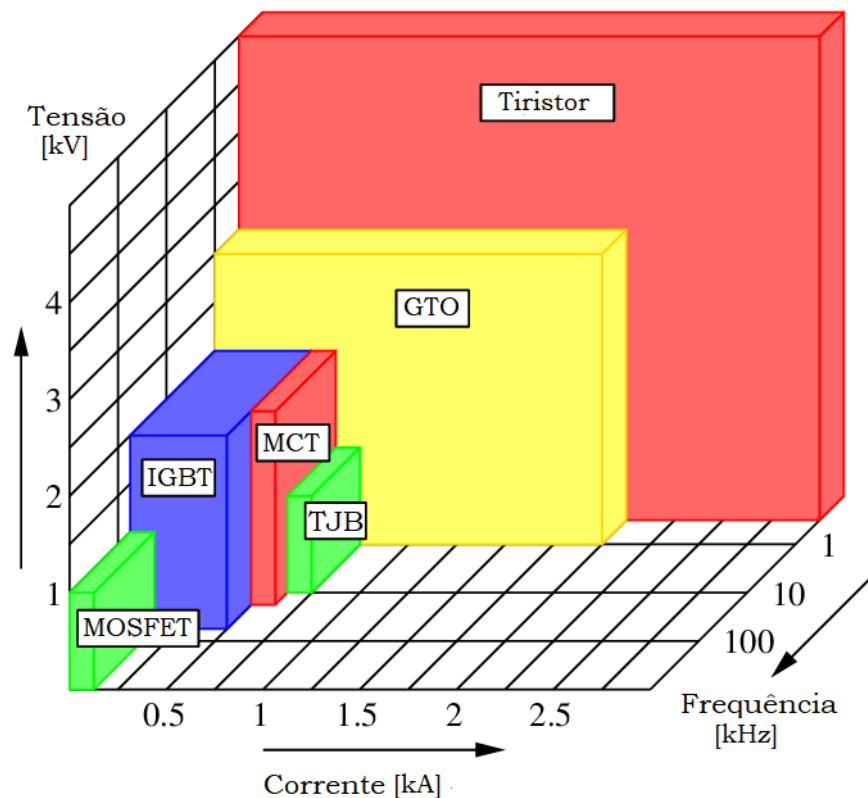
Fonte: (AHMED, 2000).

### 2.3.5 Comparação entre chaves controladas

Para a comutação de capacitores em paralelo, no circuito de regulação de tensão, é necessária a escolha do dispositivo de chaveamento, no qual deve suportar a potência nela aplicada e as frequências de disparos, além de possuir menor quantidade de perdas.

Na Figura 2.15 é representada uma comparação entre as áreas de atuação das chaves controladas, sendo que as áreas são delimitadas pela corrente de condução, a tensão reversa e as frequências de chaveamento admissíveis.

Figura 2.15 – Comparação de chaves condutoras controladas



Fonte: (SUTO; NAGY, 2007).

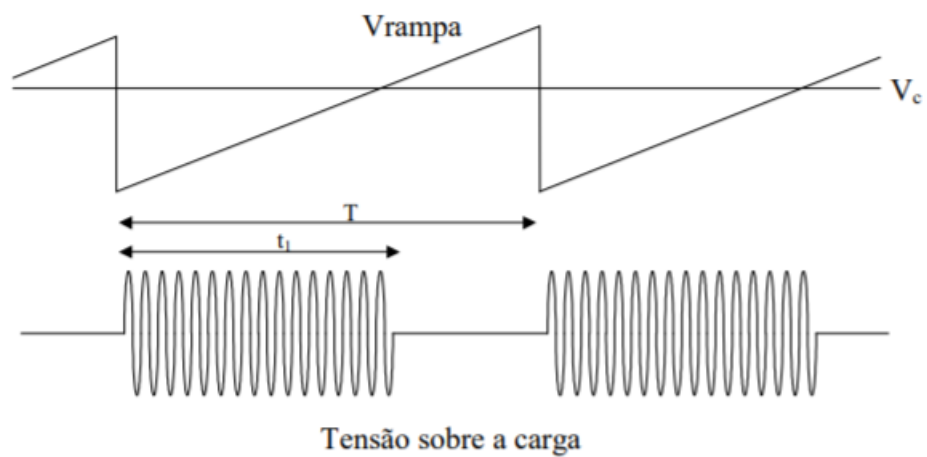
### 2.3.6 Estratégias de modulação aplicadas em chaves semicondutoras

A melhor e mais simples maneira de manobrar valores elevados de potência é com chaves semicondutoras, porém são necessárias diferentes estratégias de chaveamento dependendo da aplicação desejada. Na maioria dessas aplicações as frequências de chaveamento são muito maiores que a constante de tempo das cargas.

Na estratégia de controle ON-OFF, as chaves são acionadas sem se importar com o instante exato de comutação. Portanto, as comutações não guardam informação de zero da tensão da rede. Tal processo pode causar interferências eletromagnéticas devido as altas variações de corrente e tensão nos dispositivos semicondutores. Para combater esse efeito, é utilizado o método de chaveamento síncrono.

Uma maneira de realizar o controle ON-OFF é a partir da geração de uma onda dente de serra, com frequência fixa, que ao ser comparado com um sinal CC de controle (*duty*) gera um novo sinal que varia entre 0 e 1 dependendo da amplitude do sinal de controle, conforme ilustra a Figura 2.16. Quando esse sinal for 0, a chave bloqueia o fluxo de corrente na chave e quando for 1, a chave permite a passagem da mesma.

Figura 2.16 – Operação do controle ON-OFF



Fonte: (BAU, 2018).

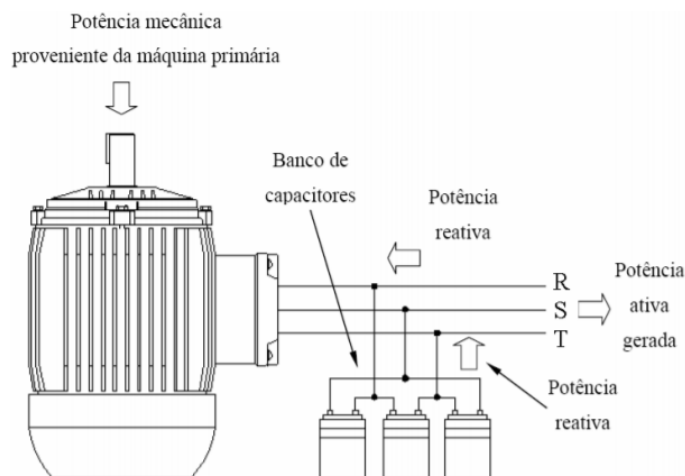
### 3 METODOLOGIA DE PROJETO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO

#### 3.1 GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO POR BANCO DE CAPACITORES

O gerador assíncrono quando acionado por uma máquina primária possui níveis pequenos de tensão por não possuir circuito de campo, necessitando assim que a potência reativa seja fornecida para sua magnetização. Esta tensão possui frequência proporcional à velocidade de acionamento e a amplitude de quão magnetizado está o núcleo (TISCHER, 2017).

Para o uso do gerador de indução de forma autoexcitada, é necessária então uma fonte de potência reativa para que ocorra assim a magnetização do gerador. Como ilustrado na Figura 3.1 essa fonte pode ser banco de capacitores fixo em paralelo com a máquina.

Figura 3.1 – Fornecimento de energia reativa ao gerador de indução por capacitores

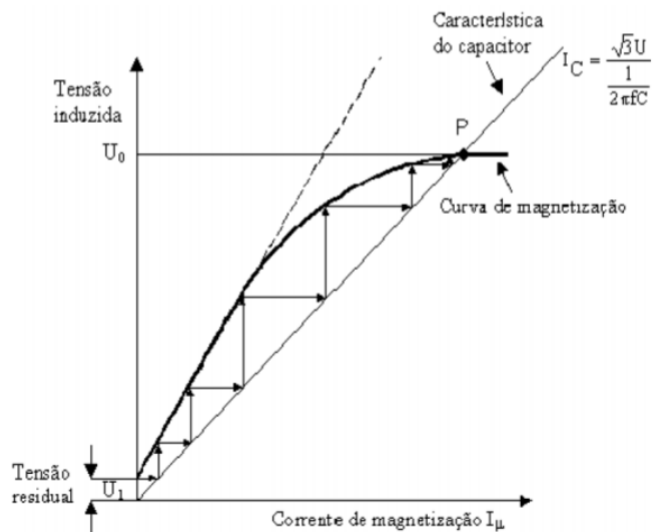


Fonte: (NASCIMENTO, 2010).

O GI possui uma característica de magnetização não linear, com a saturação magnética de seu núcleo, sua característica indutiva é representada em regime permanente pela reatância de magnetização ( $X_M$ ). Com o magnetismo residual presente em seu rotor, devido a rotação, ocorre a indução de uma força eletromotriz no estator, que provoca a circulação de corrente no banco de capacitores de excitação, produzindo energia reativa que provoca o acréscimo da força eletromotriz inicial (VANCO et al., 2016). Assim, inicia o processo de auto excitação apresentados na Figura 3.2.



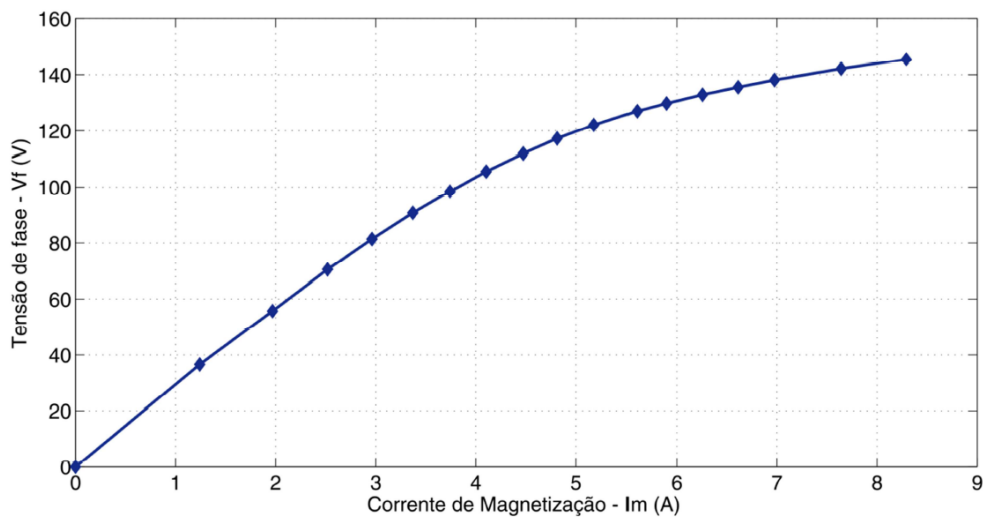
Figura 3.2 – Autoexcitação de um gerador de indução



Fonte: (RECH et al., 2008).

A curva de saturação de uma máquina assíncrona, conforme ilustra a Figura 3.3, relaciona a tensão terminal ( $V_f$ ) com a corrente de magnetização ( $I_M$ ) quando conectado o motor a vazio por meio de uma fonte externa de tensão variável.

Figura 3.3 – Curva de magnetização de uma máquina assíncrona



Fonte: (TISCHER, 2013).

Com o auxílio das curvas de saturação e das equações (3.1), (3.2) e (3.3) é possível calcular a capacitância fixa capaz de compensar a energia reativa da magnetização da máquina.

$$X_M = V_1/I_M \quad (3.1)$$

$$X_M = X_{CA} \quad (3.2)$$

$$C_{CA} = \frac{1}{2\pi f X_{CA}} \quad (3.3)$$

### 3.2 TOPOLOGIA DE REGULAÇÃO: CAPACITORES EM PARALELO

A topologia de regulação de tensão consiste em bancos de capacitores em paralelo com carga. Esses bancos são comutados por um algoritmo de comutação que gera sinais para acionamento das chaves que conectam cada banco de capacitores ao GIAE.

É imprescindível a determinação do número de bancos utilizados no sistema pois determinam a quantidade de combinações possíveis pela associação paralela dos bancos. Neste sistema de microgeração, foram utilizados três bancos de capacitores, denominados 1C, 2C e 4C, como exemplificado na Figura 2.6. A capacitância dos bancos segue uma progressão geométrica, e assim sendo, mantem um padrão gradual de compensação da energia reativa (TISCHER, 2017).

Na Tabela 3.1, é apresentada as combinações possíveis de comutação ( $N_K$ ) e suas respectivas combinações em paralelo de bancos de capacitores. Nesse sistema de microgeração a capacitância C considerada de referência foi 6  $\mu$ F.

Tabela 3.1 – Combinações possíveis dos bancos de capacitores

$N_K$	1	2	3	4	5	6	7
$u_{CM}$	1C	2C	2C+1C	4C	4C+1C	4C+2C	4C+2C+1C

Fonte: (TISCHER, 2017).

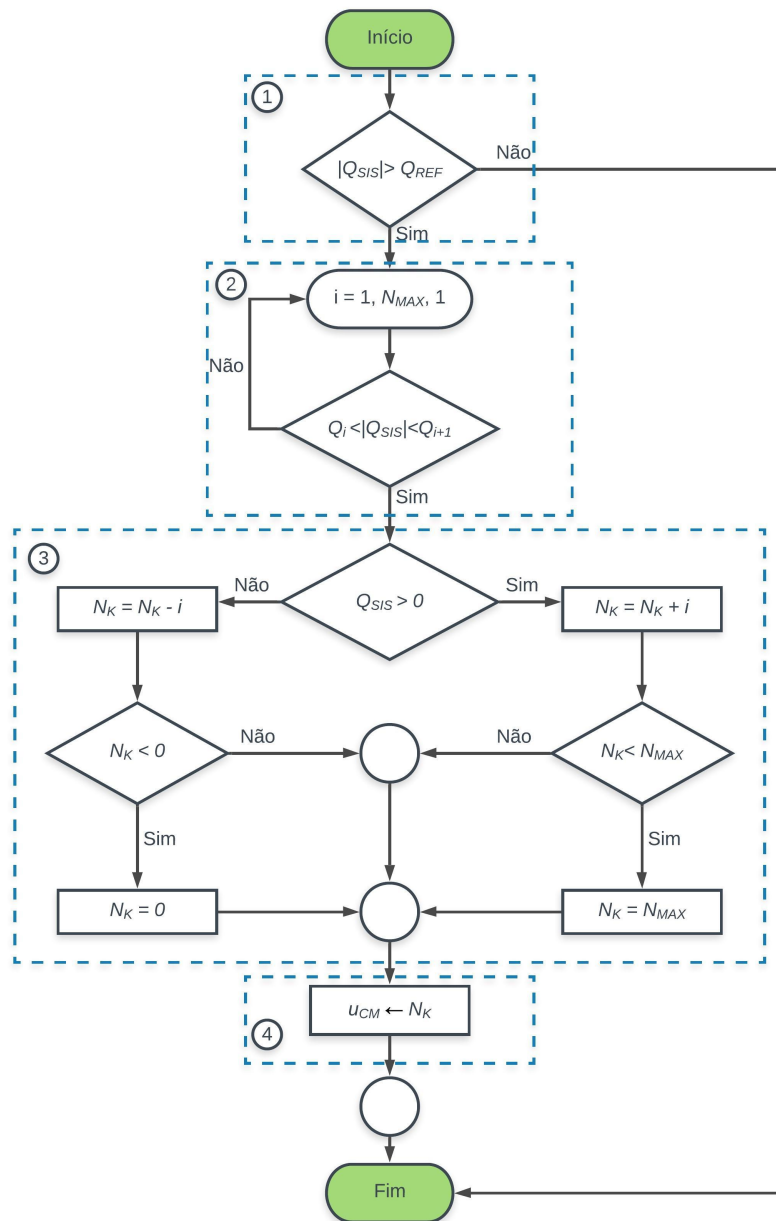
### 3.3 ALGORITMO DE COMUTAÇÃO PARA AS CHAVES DISCRETAS

Com o fluxograma da Figura 3.4 é possível explicitar os passos lógicos do algoritmo de comutação para chaves discretas e suas etapas de operação.

Na primeira etapa é realizada a comparação entre a energia reativa do sistema ( $Q_{SIS}$ ) e a potência reativa de referência ( $Q_{REF}$ ).  $Q_{REF}$  é definido pela potência reativa real que o banco de capacitores de capacitância C compensa no sistema de geração e ( $Q_{SIS}$ ) é calculada pela tensão e corrente presentes entre o gerador e o banco de capacitores de excitação. Se o módulo de  $Q_{SIS}$  for maior que  $Q_{REF}$  o algoritmo se dirige para a segunda etapa de instruções. Contudo se essa afirmação for falsa, nenhuma instrução é executada.

Na segunda etapa ocorre um laço de repetição que tem como intuito verificar o

Figura 3.4 – Algoritmo de comutação por chaves discretas dos bancos de capacitores em paralelo



Fonte: Autor.

intervalo de compensação em que o módulo de  $Q_{SIS}$  está alocado. Com isso, um vetor de potência reativa  $Q$  foi criado, possuindo o número de elementos igual ao número máximo de combinações. Esses componentes são valores múltiplos de  $Q_{REF}$ . Este comportamento pode ser verificado na Equação 3.4. O vetor  $Q$  possui todos os valores graduais que a topologia de regulação pode compensar.

$$Q = [1Q_{REF}, 2Q_{REF}, \dots, N_{MAX}Q_{REF}] \quad (3.4)$$

Um contador denominado  $i$  percorre o vetor  $Q$  comparando a energia reativa do sistema com o elemento na posição  $i$  do vetor ( $Q_i$ ) e o elemento na posição  $i+1$  ( $Q_{i+1}$ ). Se  $Q_{SIS}$  for maior que  $Q_i$  e menor que  $Q_{i+1}$ , o laço de repetição é interrompido e ocorre o prosseguimento das instruções do algoritmo. Caso esse comportamento não ocorra, a variável  $i$  é incrementada, ocorrendo assim o prosseguimento do laço de repetição até que a afirmação seja verdadeira.

O terceiro bloco de instruções tem como finalidade determinar a sequência adequada de combinações para a regulação da energia reativa. Nesse bloco é avaliado se  $Q_{SIS}$  é uma potência reativa positiva ou negativa. Se positiva demonstra que o sistema está com cargas que possuem, a princípio, fator de potência indutivo, necessitando assim, o aumento do número da sequência de combinações ( $N_K$ ) anterior já produzido pelo funcionamento do algoritmo. Caso seja negativo, o sistema adquiriu cargas com características capacitivas, sendo assim, é necessária a diminuição da sequência de combinação anterior.

O incremento ou redução de sequência de combinação ocorre a partir da variável  $i$ , adquirida na segunda etapa de instruções.

Nessa etapa também ocorre a verificação dos limites da sequência de combinação, para que não ocorra extrapolações das faixas de operação dos bancos capacitivos. Se ocorrer o acréscimo de sequência de combinação esse não deve ultrapassar o número máximo de sequencias possíveis. Todavia quando há decréscimo, a variável de combinações não pode ser menor que zero.

A quarta etapa de operações é um bloco de conversão. Nesse conjunto de instruções o ( $N_K$ ) é convertido de uma base decimal para binária. O número de bits gerados por esse bloco é igual ao de bancos de capacitores. Portanto, cada bit dessa conversão é responsável pelo controle de comutação de cada banco. Se o bit estiver em estado lógico alto, os bancos serão ou estão interligados ao sistema. Se o bit estiver em estado lógico baixo, os bancos serão ou estão desconectados do sistema.

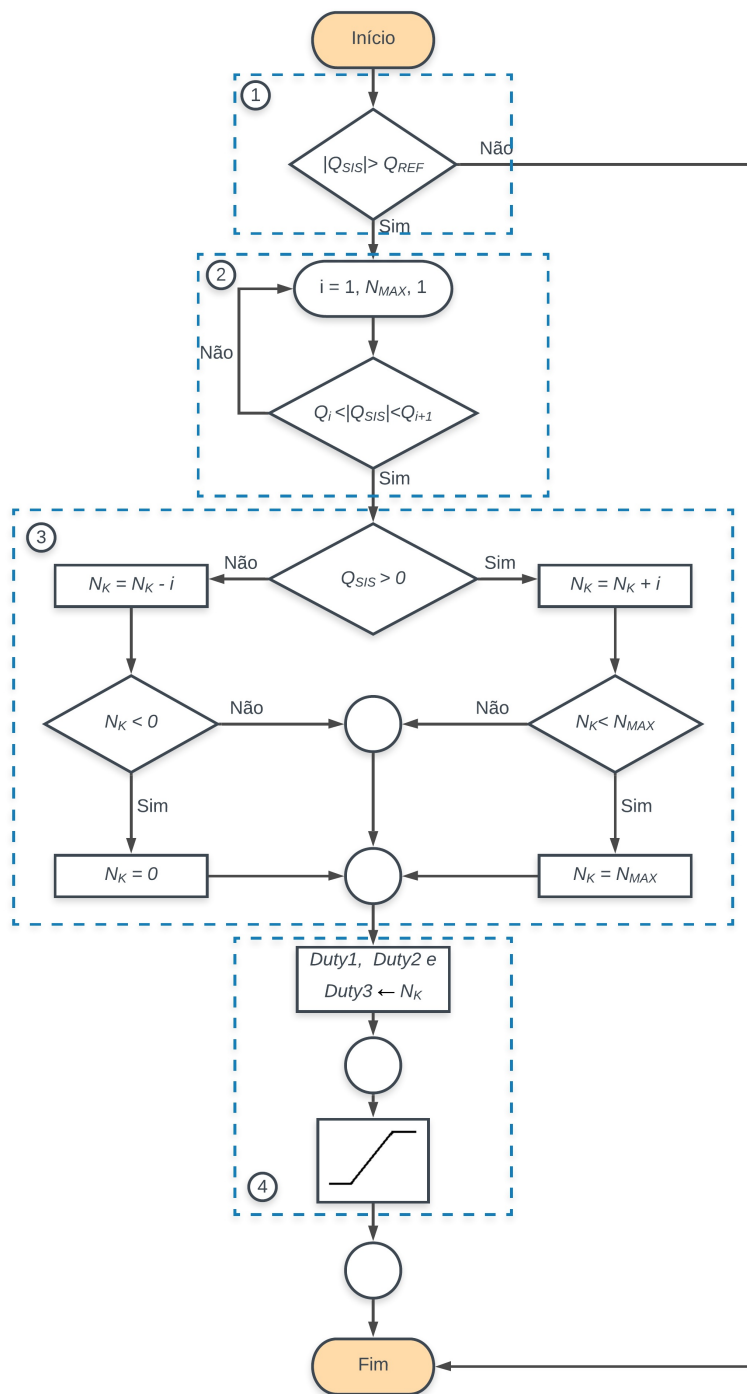
### 3.4 CHAVES SEMICONDUTORA

A comutação dos capacitores comumente é realizado a partir de contatoras, sendo que essas chaves que atuam de forma discreta possuem grande desgaste mecânico conforme sua utilização. Para diminuição dos picos de corrente ocasionados no acoplamento dos capacitores de regulação de tensão no barramento de corrente alternada foram escolhidas chaves semicondutoras para realizar a comutação. Essa escolha ocorreu por esses dispositivos se adequarem ao sistema de geração proposto e por apresentarem baixas perdas de comutação.

## 3.5 ALGORITMO DE COMUTAÇÃO PARA CHAVES SEMICONDUTORAS

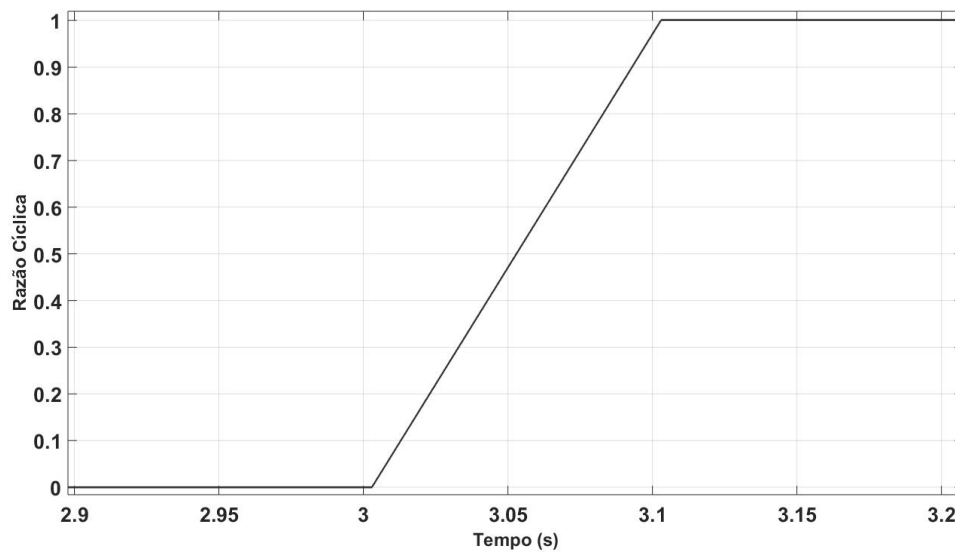
O algoritmo de comutação por dispositivos semicondutores dos bancos de capacitores é representado pelo fluxograma da Figura 3.5.

Figura 3.5 – Algoritmo de comutação por chaves semicondutoras dos bancos de capacitores em paralelo



Os três primeiros conjuntos de instruções são semelhantes ao algoritmo de programação por chave discreta, representados na Figura 3.4. Todavia, o quarto passo se distingue. Nesse chaveamento a saídas do algoritmo são sinais de razão cíclica que serão necessários na modulação para o acoplamento dos capacitores no sistema. Escolheu-se por sinais de razão cíclica com progressiva elevação, representado pela Figura 3.6, ou seja, em rampa. Com isso, o sinal de chaveamento após passar pelo bloco de modulação se estabelece de forma gradativa.

Figura 3.6 – Progressão do sinal de razão cíclica para acoplamento de banco de capacitores



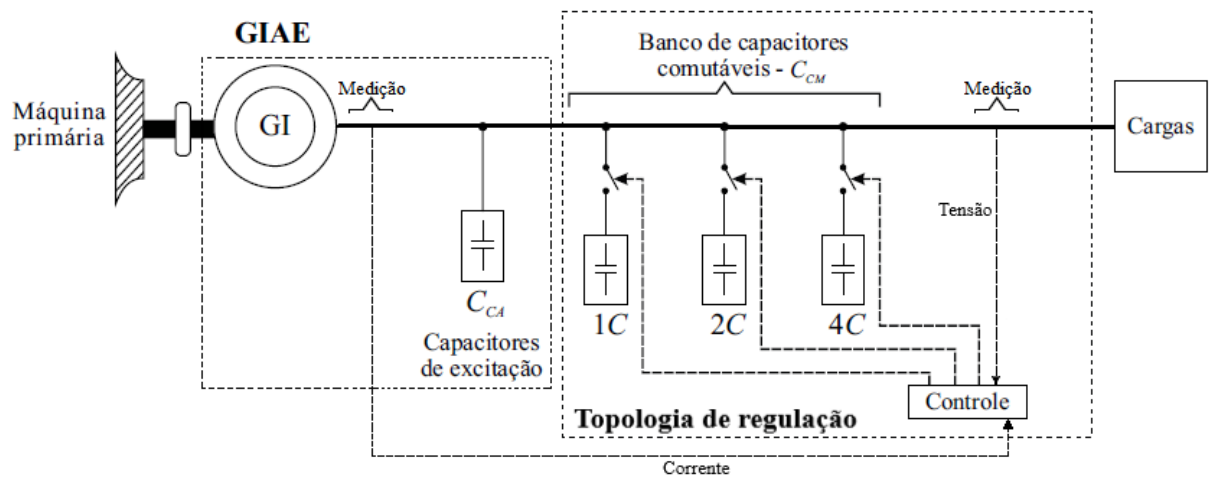
Fonte: Autor.

Para a realização do comportamento descrito acima, no bloco quatro o  $N_K$  é convertido em sinais de acionamento da progressão do sinal de razão cíclica ou bloqueio de corrente da chave semicondutora. Se o sinal emitido pelo algoritmo for de acionamento da progressão do sinal, a razão cíclica se eleva em formato de rampa. Contudo, quando o sinal é de bloqueio de corrente ocorre a abertura da chave instantaneamente.

## 4 DESCRIÇÃO DA PLANTA DE MICROGERAÇÃO

Esse capítulo apresenta as características da planta tida como referência para os estudos, as simulações e para aquisição dos resultados. O circuito esquemático do sistema de microgeração de energia elétrica é representado na Figura 4.1. O sistema de geração isolada é composto pelo GI com rotor gaiola de esquilo, acoplado mecanicamente a uma máquina primária com velocidade e torque constantes.

Figura 4.1 – Planta de referência



Fonte: Autor.

O barramento CA é composto pelos capacitores de excitação do gerador e pela topologia de regulação de tensão, sendo esta composta por três bancos de capacitores comutáveis em configuração delta.

### 4.1 GERADOR DE INDUÇÃO

Os dados do gerador de indução utilizado para obtenção dos resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados do gerador de indução

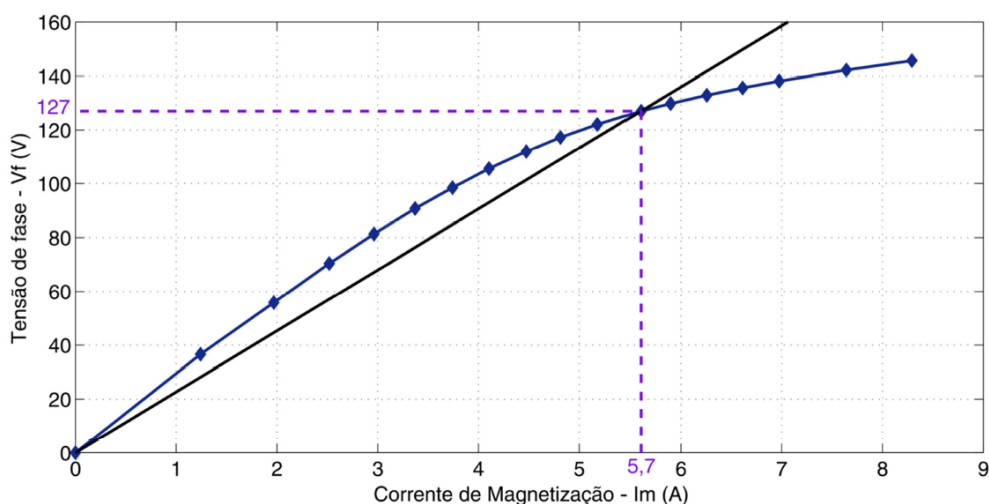
Parâmetros	Valor
Potência	5 cv
Tensão de linha (RMS)	220/127 V
Número de polos	4
Frequência	60 Hz
Velocidade	1730 rpm
$I_p/I_n$	7,2
Rendimento	87,5%

Fonte: (TISCHER, 2017).

## 4.2 CAPACITOR DE EXCITAÇÃO

Para realizar a autoexcitação na planta, um banco de capacitores fixo no sistema foi calculado a partir das metodologia demonstrada no Capítulo 3. Com a curva de magnetização do gerador e sabendo que a tensão de fase proporcionada pelo sistema é 127 V, é possível verificar a corrente de necessária para magnetização sendo de 5,7 A, conforme mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Projeto de capacitor pela corrente de magnetização



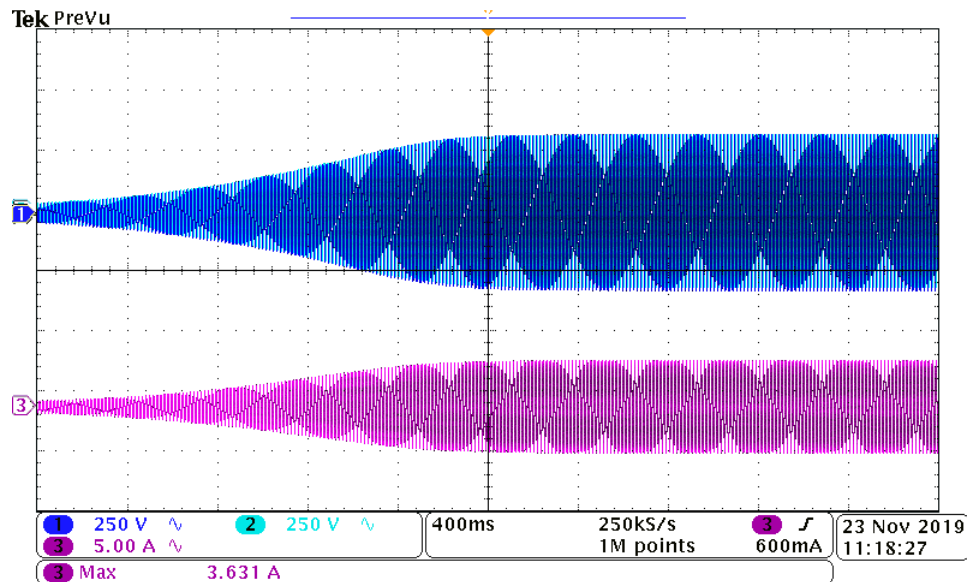
Fonte: Autor.

Com a corrente de magnetização e as Equações 3.1, 3.2 e 3.3 é possível realizar o dimensionamento do banco capacitivo de excitação que, para esse sistema de microgeração, possui configuração delta e capacitância de 40  $\mu\text{F}$ . Devido a magnetização é possível



realizar a partida do gerador, conforme ilustrado a Figura 4.3 e em regime permanente, a máquina, permanecerá em 220 V.

Figura 4.3 – Tensão e corrente de saída do gerador ao ser acionado pela máquina primária

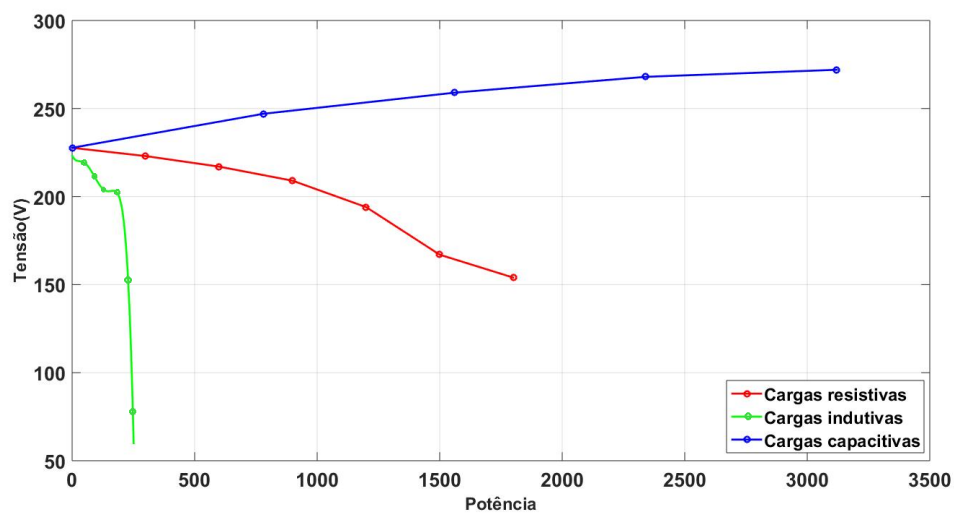


Fonte: Autor.

#### 4.3 COMPORTAMENTO DE TENSÃO DO SISTEMA DE MICROGERAÇÃO PARA CARGAS LINEARES

A amplitude de tensão de um GIAE dependerá, se mantida a velocidade constante, do valor da capacitância de excitação e da carga acoplada no barramento do sistema. Dependendo do fator de potência da carga, ocorre a variação dos níveis de tensão gerada e da frequência (VANCO et al., 2016). A Figura 4.4 representa a amplitude de tensão de saída do GIAE com variações de cargas capacitivas, indutivas e resistivas, tais dados foram coletados a partir do acoplamento de cargas ao gerador sem topologias de regulação de tensão. Quando a carga é puramente resistiva o gerador tende a perder energia reativa, resultando em menores níveis de tensão na saída. Quando a carga possui fator de potência capacitivo a tensão de saída aumenta, pois o gerador recebe maiores quantidades de energia reativa (HANAFY et al., 2019). É possível verificar que a partir de cargas com fator de potência indutivas, os níveis de tensão de saída tendem a diminuir drasticamente, pois os bancos de capacitores que originalmente serviriam para a magnetização do gerador, fornecem parte de sua energia reativa à carga, reduzindo a magnetização do GIAE.

Figura 4.4 – Amplitude da tensão de saída do GIAE com variações de cargas resistivas, capacitivas e indutivas



Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesse capítulo são apresentadas as respostas da planta, descrita no capítulo anterior, aos diferentes métodos de chaveamento por meio de simulação.

As simulações foram realizadas na ferramenta Simulink presente no software Matlab. Essa ferramenta permite a utilização de blocos pré existentes com características dos principais elementos do sistema de microgeração. Foram utilizados blocos de estruturas: cargas, capacitores, gerador de indução, diversos tipos de chaves, medidores de corrente, tensão e *s-function*. O bloco *s-function* tem o funcionamento semelhante ao DSP em um sistema físico. Essa estrutura recebe os valores de tensão e corrente após passarem por uma discretização *Zero-Order Hold (ZOH)* com frequência de amostragem de 10kHz e por um ganho responsável por transformar a grandeza em pu. Após o cálculo da potência reativa através da Equação 5.1 e processamento do algoritmo dos bancos de capacitores, o bloco *s-function* retorna os sinais de comutação.

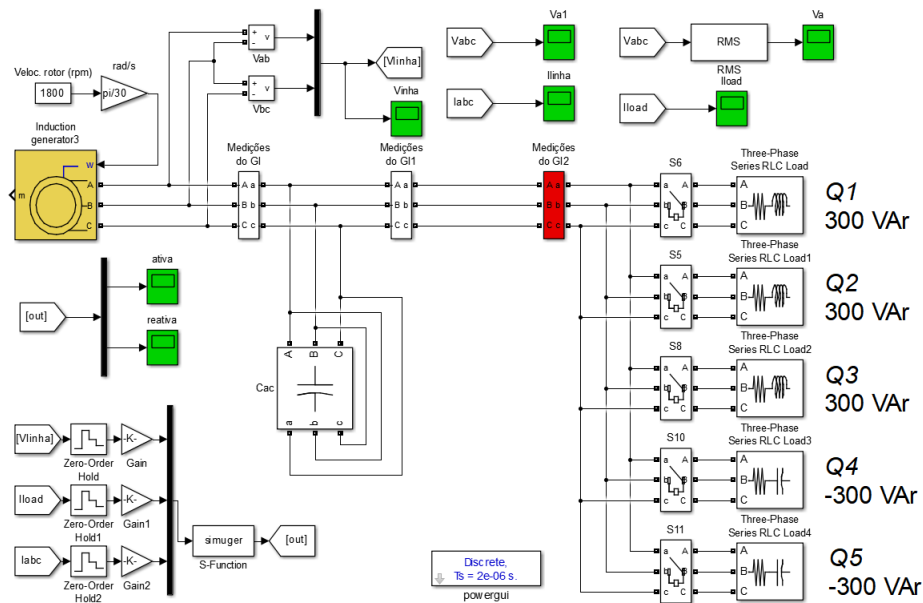
$$Q_{SIS} = \frac{(v_A - v_B)i_C + (v_B - v_C)i_A + (v_C - v_A)i_B}{\sqrt{3}} \quad (5.1)$$

Com intuito de comparação entre os resultados de simulações envolvendo a planta sem regulação de tensão, a com chaveamento discreto e a que utiliza chaves semicondutoras para o comutação dos capacitores da topologia, foram utilizadas cinco cargas (Q) acopladas durante vinte segundos. Em todas as simulações, nos primeiros três segundos da simulação o gerador opera a vazio, alcançando assim, o regime permanente. As cargas Q1, Q2 e Q3 são puramente indutivas comutadas nos tempos 3s, 6s e 9s respectivamente, Q4 e Q5 são puramente capacitivas chaveadas nos tempos 10s e 16s após o início da simulação. Todas as cargas são desacopladas no tempo de 18 segundos e o gerador opera a vazio. Esse método foi utilizado para que não ocorresse a total desmagnetização do gerador principalmente na planta sem regulação de tensão.

### 5.1 PLANTA SEM REGULAÇÃO DE TENSÃO

A Figura 5.1 representa a planta de microgeração sem topologia de regulação. Nessa simulação o bloco *s-function* tem a função de apenas calcular a potência reativa presente no sistema, sendo assim, o gerador recebe energia reativa apenas dos capacitores de excitação, não mantendo os níveis de tensão aceitáveis.

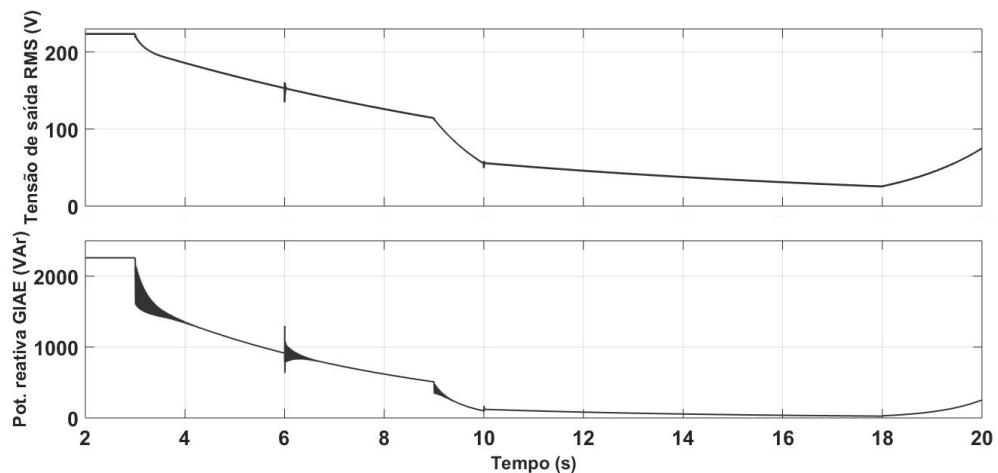
Figura 5.1 – Planta simulada sem regulação de tensão



Fonte: Autor.

Conforme o acréscimo de cargas indutivas Q1, Q2 e Q3 os níveis de tensão RMS caem rapidamente, assim como a energia reativa no gerador, produzindo no gerador a perda gradativa de sua excitação. Ao acoplar as cargas capacitivas Q4 e Q5 ocorre o acréscimo de potência reativa permitindo ao gerador aumentar seu nível de excitação. Conforme visto na Figura 5.2 a tensão RMS varia em demasia, quase gerando a perda total de excitação do gerador, proporcionando ao sistema instabilidade, o que dificultaria sua utilização em uma planta real para alimentar cargas comerciais.

Figura 5.2 – Tensão de saída e potência reativa do sistema sem regulação de tensão

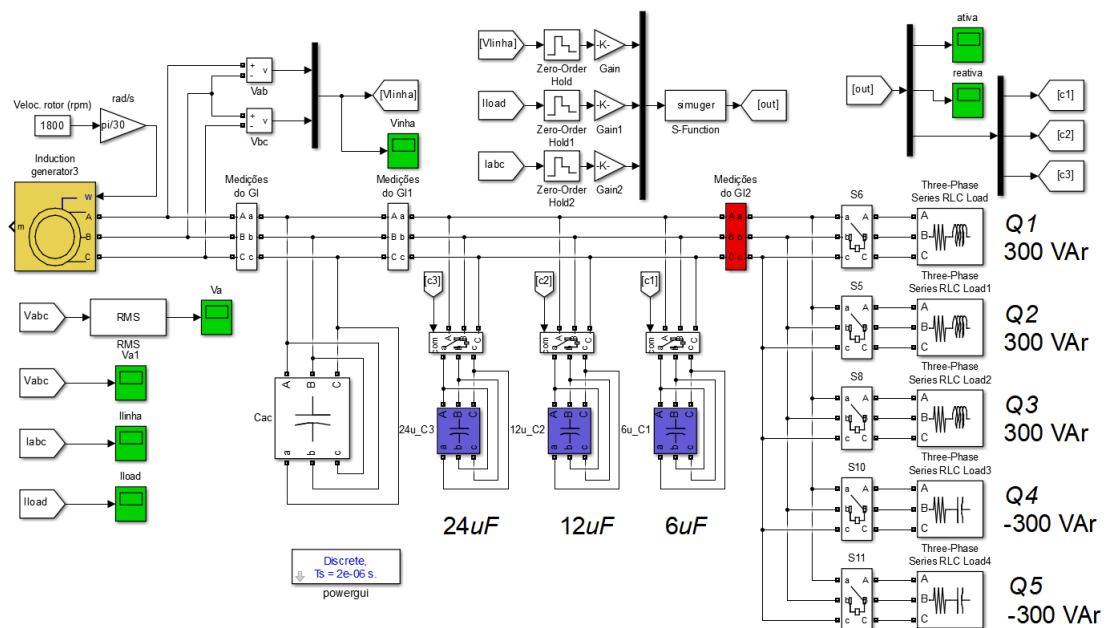


Fonte: Autor.

## 5.2 PLANTA COM REGULAÇÃO DE TENSÃO COM CHAVES DISCRETAS

A planta com regulação de tensão com chaves discretas, representada na Figura 5.3, é apresentada nessa subseção. Nela o DSP, na bancada, e o bloco *s-function*, na simulação, têm papel fundamental, sendo estes, responsáveis por processar o algoritmo que permite o chaveamento das chaves discretas. Na bancada experimental estes dispositivos de comutação são as contatoras.

Figura 5.3 – Planta simulada com chaves discretas



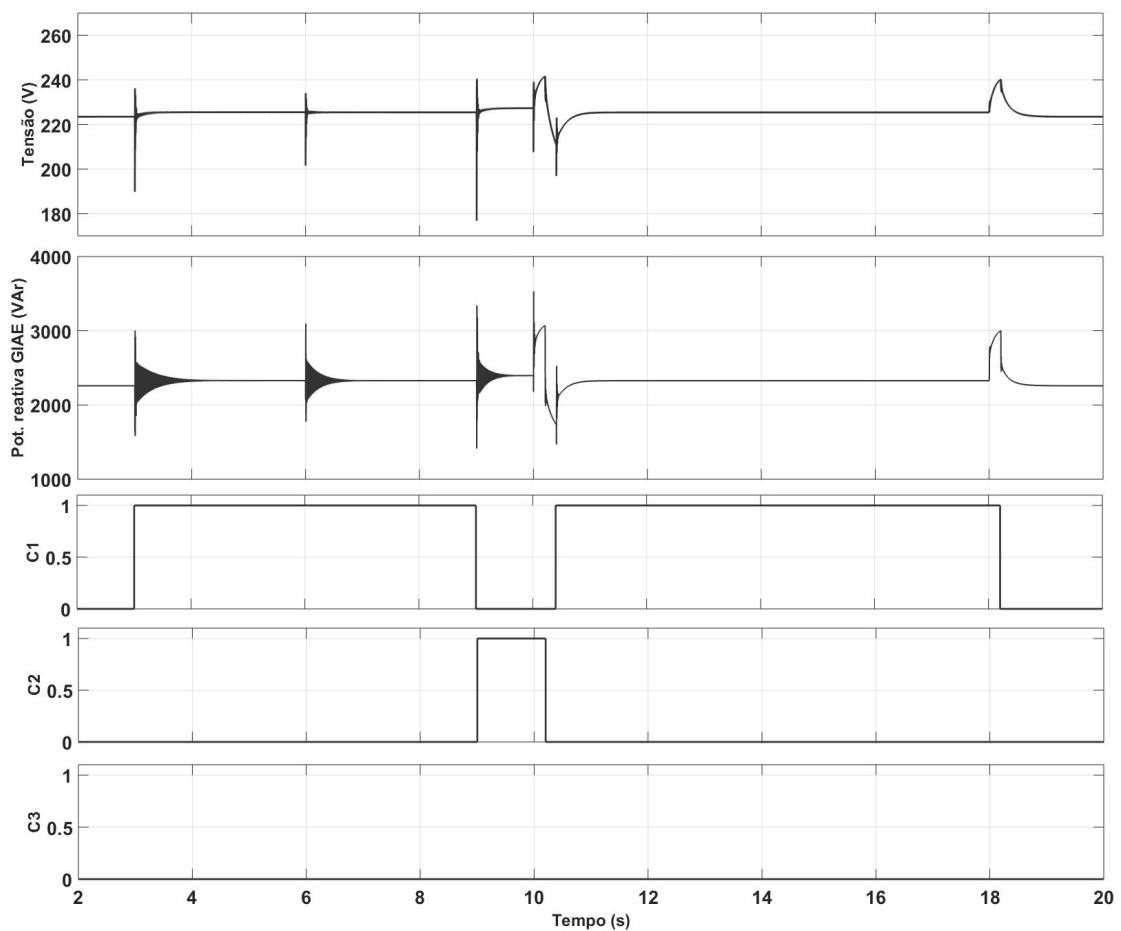
Fonte: Autor.

Na Figura 5.4, são representadas a tensão de saída do gerador, a potência reativa presente na máquina e as comutações das chaves discretas na simulação. É possível verificar pelos formatos de ondas a atuação da regulação conforme as variações de carga.

Quando a carga Q1 é acoplada ao sistema o algoritmo reconhece essa potência empregada e aciona o primeiro banco, posteriormente a carga Q2 e Q3 são acopladas, o que resulta no chaveamento do segundo banco de capacitores e a retirada do primeiro. Com o acoplamento da carga capacitiva Q4, o segundo banco é desacoplado e acontece o retorno do primeiro banco. Com o acoplamento da segunda carga capacitiva são retirados todos os bancos.

Para essa configuração de tensão e conforme a Tabela 1.1 a carga obteve limites adequados no regime permanente de tensão de saída. Porém apresentou amplitudes elevadas de tensão e corrente nas repostas transitórias nas comutações dos bancos capacitivos.

Figura 5.4 – Tensão de saída, potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves discretas

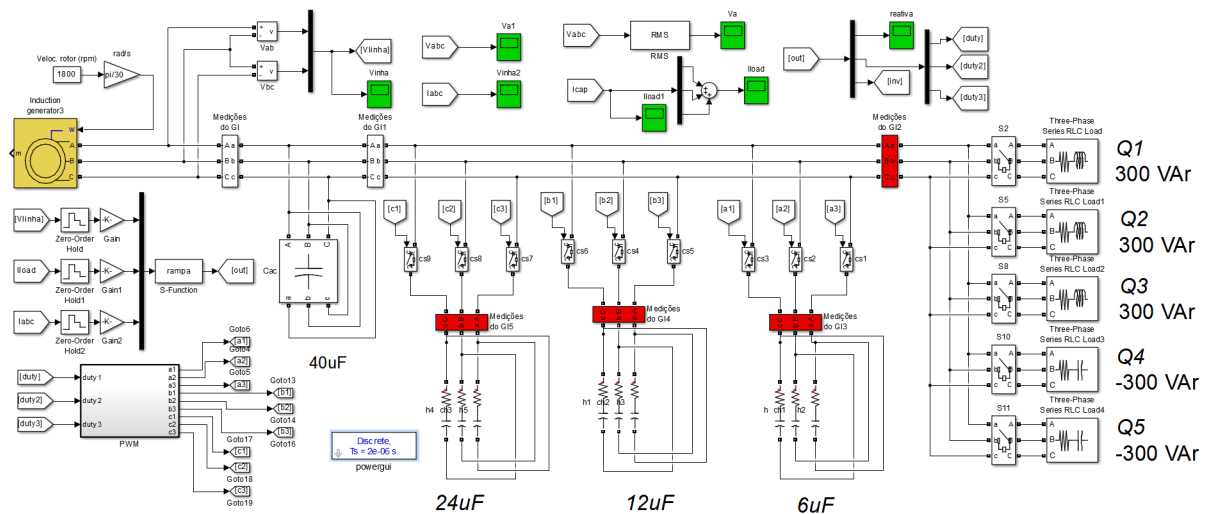


Fonte: Autor.

### 5.3 PLANTA COM REGULAÇÃO DE TENSÃO COM CHAVES SEMICONDUTORAS

A planta de regulação de tensão com dispositivos semicondutores é ilustrado na Figura 5.5. Essa configuração foi realizada apenas em simulação pela ferramenta Simulink.

Figura 5.5 – Planta simulada com chaves semicondutoras



Fonte: Autor.

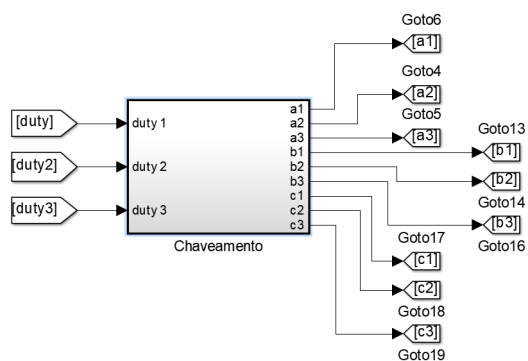
De forma ineficaz, tentou-se elaborar um algoritmo e uma planta referência em que ocorre-se o controle da porcentagem da energia reativa entregue ao sistema a partir da razão cíclica de chaveamento dos dispositivos semicondutores. Ficou constatado que em uma comutação a três chaves por banco capacitivo (uma por fase), a porcentagem da energia reativa não pode ser controlada, pois mesmo que com menor valor de razão cíclica ocorre a entrega de nível máximo da potência reativa do banco. Portanto optou-se por utilizar a chave com o intuito de diminuição da amplitude de transitórios, pelo menor nível de desgaste mecânico quando comparado a contatoras e por ter vida grande útil.

Diferentemente das outras simulações foi acoplada resistências em série aos capacitores dos bancos de regulação de tensão a serem comutados, com o intuito de reduzir os efeitos transitórios. O valor desse dispositivo resistivo foi de  $66 \Omega$ . Essa grandeza foi estipulada a partir das simulações e comportamento da tensão e da corrente no sistema.

### 5.3.1 Estratégia de chaveamento

Após a aquisição dos sinais de razão cíclica, o bloco de modulação, representado na Figura 5.6, realiza a aquisição de sinal de cada chave do sistema a partir da modulação ON-OFF por comparação com onda dente de serra. Cada banco possui três comparações, uma para cada fase, para isso, cada onda dente de serra do conjunto, que possuem frequência de 10 kHz e são defasadas  $120^\circ$  entre si.

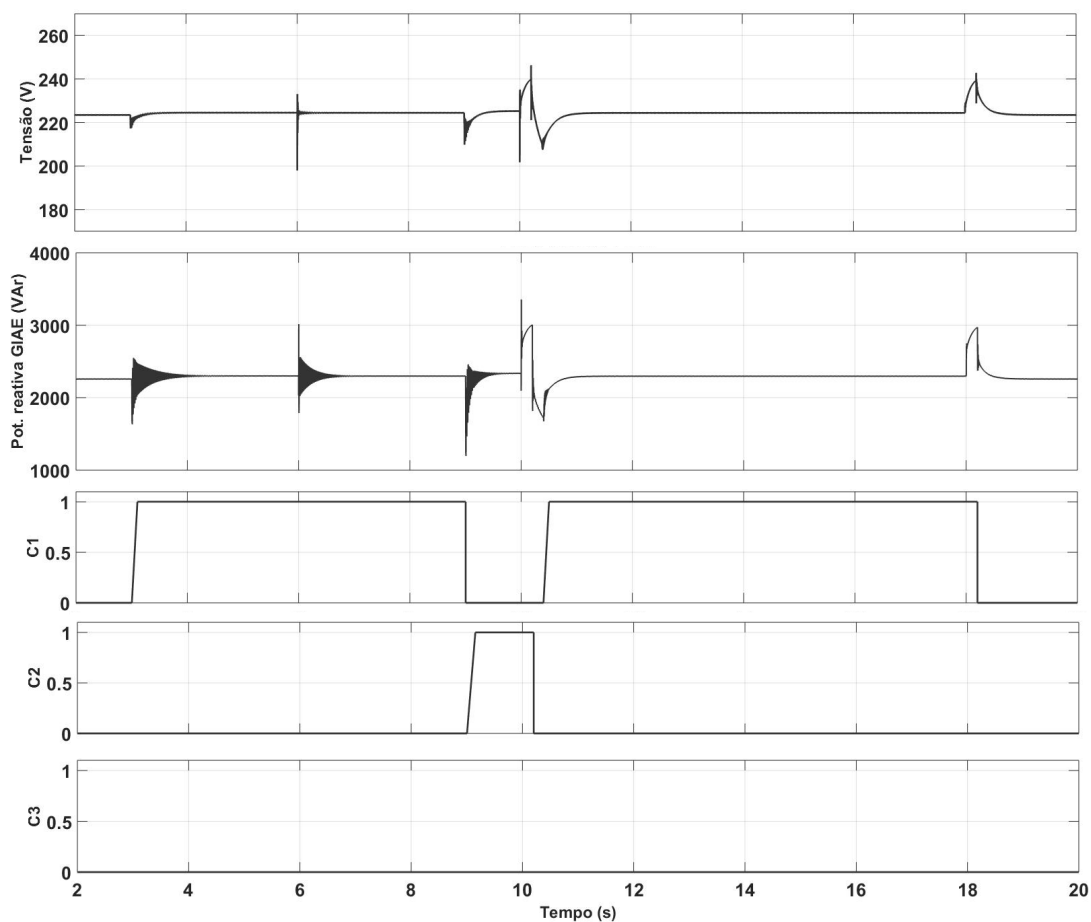
Figura 5.6 – Bloco de chaveamento



Fonte: Autor.

Os sinais adquiridos na simulação são mostrados na Figura 5.7. O valor da tensão RMS de saída em regime permanente obedecem os limites adequados de fornecimento de tensão. É possível verificar as rampas de progressão do sinal de razão cíclica a cada chaveamento de um novo banco capacitivo de regulação.

Figura 5.7 – Tensão de saída, potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves IGBTs



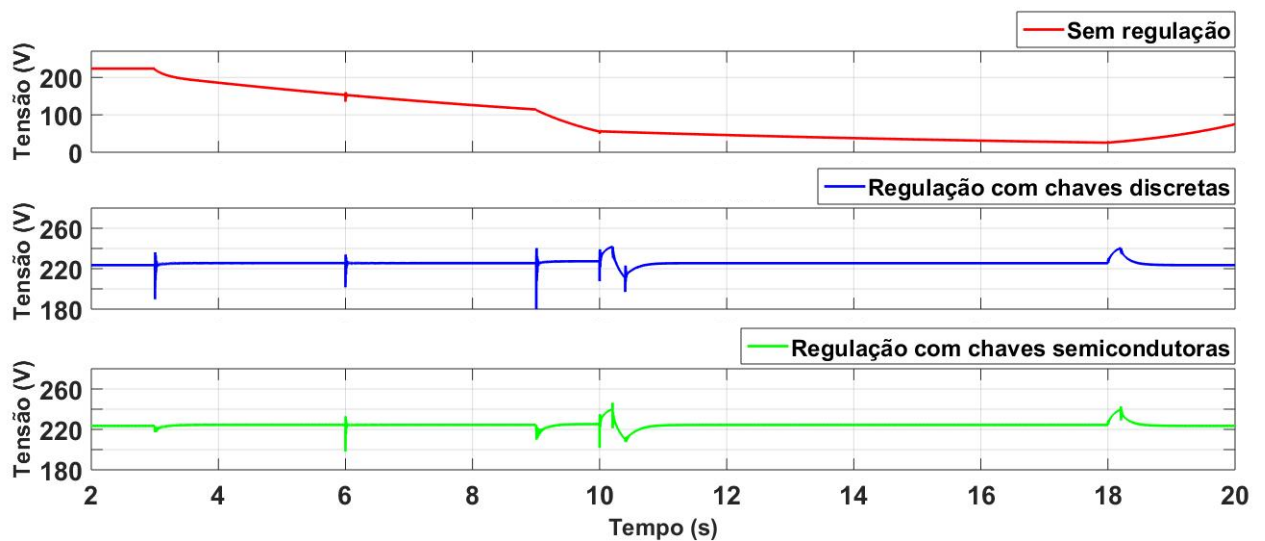
Fonte: Autor.



## 5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Perante a comparação de tensões RMS de saída do gerador da Figura 5.8, fica evidente a necessidade da regulação de tensão. Na simulação sem a mesma, é percebida quase a perda total da magnetização do gerador. Com as mesmas condições de carga, as simulações com topologia de regulação mantém a tensão em regime permanente e de flutuação em níveis considerados adequados pelo (ANEEL, 2017).

Figura 5.8 – Comparação entre as tensões



Fonte: Autor.

A simulação com chaves semicondutoras apresenta peculiaridades em seus períodos de transitório. Em casos simples de acoplamento, ou seja, de um único banco capacitivo, apresenta respostas transitórias satisfatórias e imperceptíveis para o sistema. Com o acoplamento de um banco de capacitores e retirada de outro, a topologia apresenta transitórios com menor amplitude de tensão, porém maior tempo de transição comparado com a configuração com chaves discretas.

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

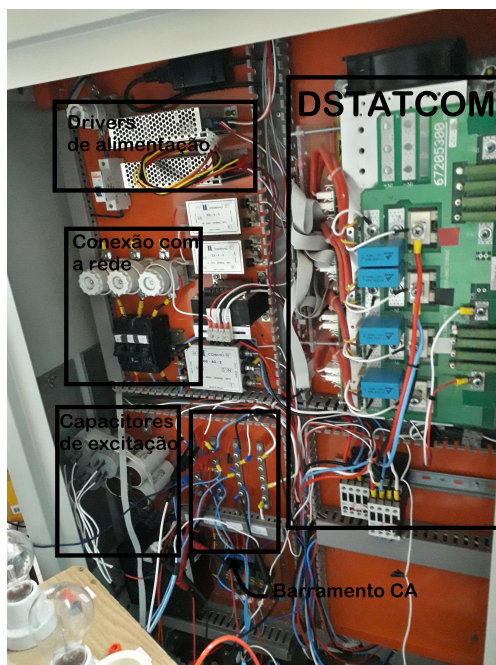
Nesse capítulo são apresentadas as respostas da planta, descrita no capítulo anterior, aos diferentes métodos de chaveamento por meio das bancadas experimentais.

### 6.1 BANCADAS EXPERIMENTAL

Com o intuito de obter resultados de um conjunto físico, foram utilizadas bancadas experimentais que emulam um sistema de microgeração de energia elétrica. As bancadas estão localizadas no Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), no Campus sede da Universidade Federal de Santa Maria. Esse conjunto possui um computador, um motor, um gerador e quatro bancadas, dentre elas, uma principal e três de acoplamento de cargas.

A bancada principal conta com um DSTATCOM, *drivers* de alimentação de 12 e 24 V, um barramento CA com um banco de capacitores de excitação de 40  $\mu\text{F}$ , um processador digital de sinais (DSP) e sensores de corrente e tensão. Os componentes presentes na bancada principal são representados na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Componentes da bancada de simulação de um sistema de microgeração



Fonte: Autor.

O motor de indução, utilizado como máquina primária é acionado por um inversor de frequência, conforme mostrado na Figura 6.2, emulando assim, um potencial hidráulico ou eólico, possibilitando o acionamento do gerador.

Figura 6.2 – Inversor de Frequência e conjunto máquina primária/gerador de indução



Fonte: Autor.

A partir de sensores presentes na bancada, os valores de corrente do gerador, tensão medido no barramento de CA da topologia e correntes do DSTATCOM são repassados ao DSP possibilitando a atuação de códigos em linguagem C especificados no Code Composer Studio. Esses códigos de controle são repassados ao DSP via USB pelo computador, como mostrado na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Programação para o DSP

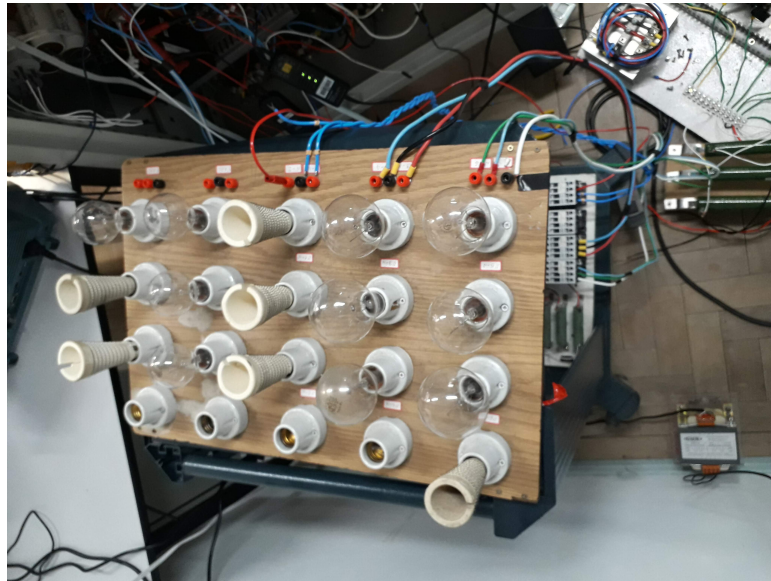


Fonte: Autor.

As cargas resistivas são mostradas na Figura 6.4. As cargas podem ser dispostas em quatro fileiras e configuradas conforme a necessidade do usuário em delta ou estrela.

Com potência de 100 W, 200 W e 600 W.

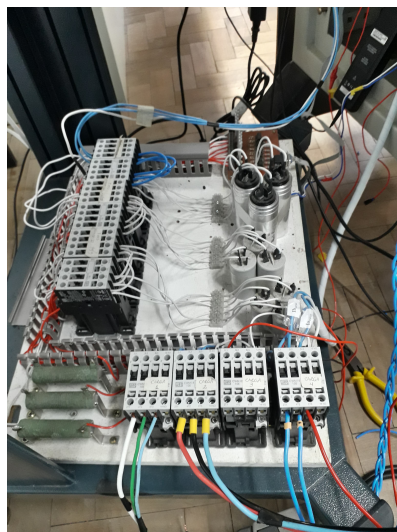
Figura 6.4 – Bancada de cargas resistivas



Fonte: Autor.

A bancada capacitiva, mostrada na Figura 6.5, tem papel fundamental no sistema de microgeração, pois nela estão presentes dez contadoras ligadas a ao baramento de corrente alternada e acionadas pelo DSP. Esse fator permite que quatro contadoras dessa bancada sejam intermediarias para acoplamento das bancadas de carga resistivas e indutivas. As demais contadoras são de acionamento de três bancos de capacitores, que podem atuar como carga e/ou através da topologia de regulação. Os bancos possuem capacitância de  $6 \mu\text{F}$ ,  $12 \mu\text{F}$  e  $25 \mu\text{F}$ .

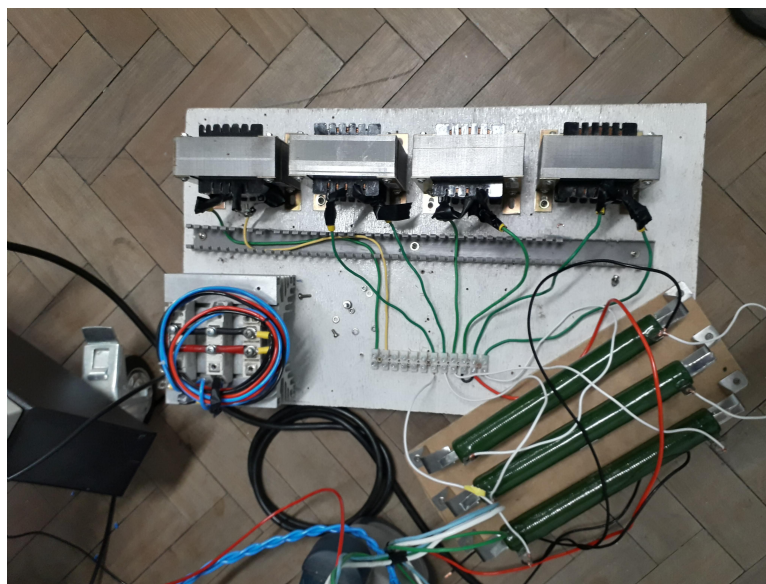
Figura 6.5 – Bancada de cargas capacitivas



Fonte: Autor.

A bancada indutiva, Figura 6.6, possui três braços ligados em delta com indutores de 256,8 mH em série com resistores de 10  $\Omega$ , totalizando uma carga de 14,5 kW e 1,5 kVAr, conforme demonstrado na simulação de tensão de saída da Figura 6.18.

Figura 6.6 – Bancada de cargas indutivas



Fonte: Autor.

As formas de onda da tensão e corrente presentes neste capítulo foram adquiridos a partir de um osciloscópio da Tektronix de 4 canais, enquanto os dados referentes a potência reativa no gerador e de chaveamento dos capacitores foram adquiridos pelos *buffers* presentes no DSP.

## 6.2 PLANTA SEM TOPOLOGIA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

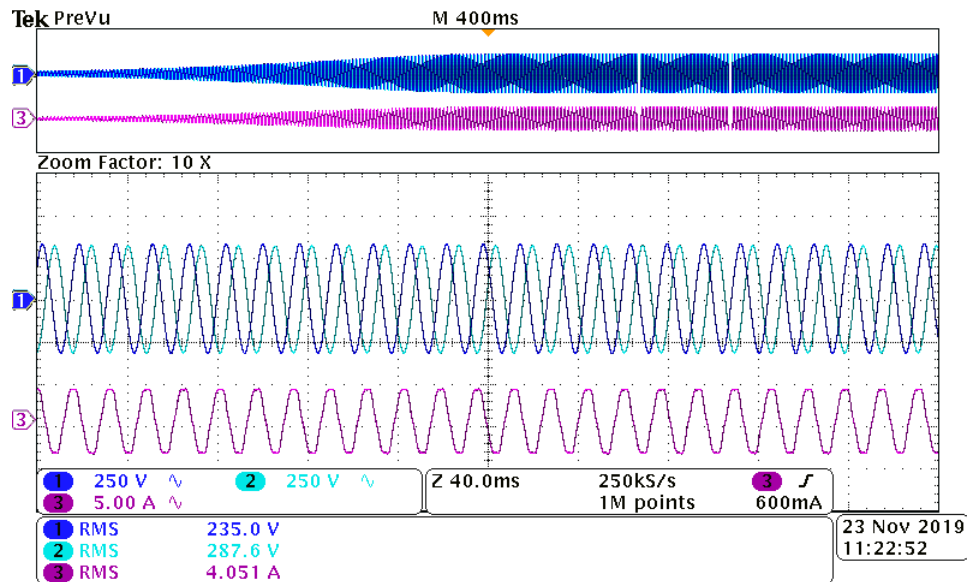
Nas bancadas experimentais de microgeração foram realizadas diversos ensaios para comprovar o efeito de acoplamento de cargas resistivas, capacitivas e uma indutiva no sistema. Os sinais de tensão e corrente de partida do gerador trabalhando a vazio é representado na Figura 6.7. Verifica-se uma corrente senoidal de saída do gerador com valor RMS de 4,051 A e das tensões de linha entre as fases A e B (VAB), e as fases B e C (VBC), com amplitude 332 V e frequência de 60 Hz.

Ao aplicar cargas resistivas no barramento, a tensão de saída e a potência reativa presentes na máquina tendem a reduzir e a corrente de saída tende a aumentar. Essas variações dependem da potência empregada na carga.

O comportamento da tensão é ilustrado na Figura 6.8, em que individualmente são aplicadas cargas de 300 W, 600 W e 1800 W, respectivamente. Pela Figura 6.9, é apresentada a potência reativa no gerador, esse comportamento explica a diminuição de

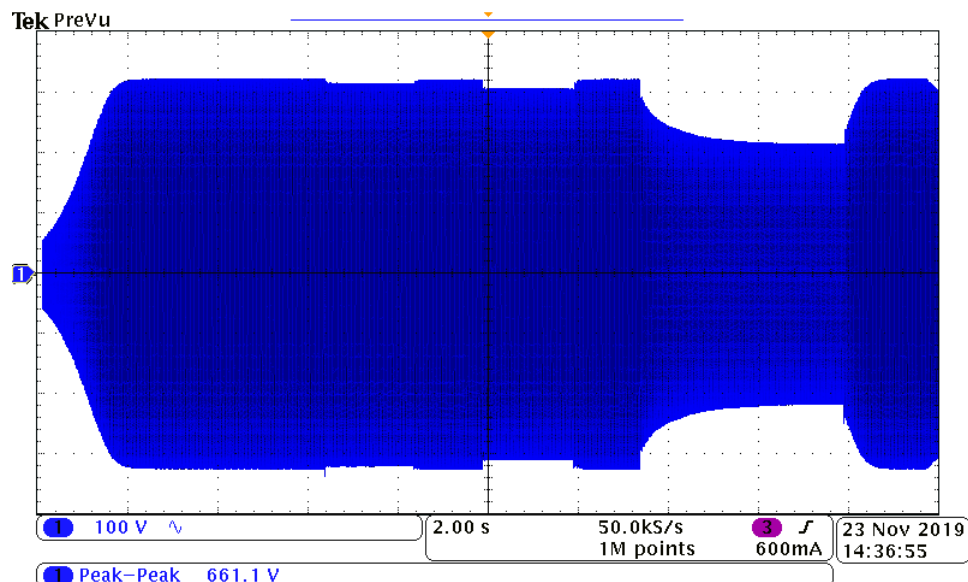
tensão que ocorre pela redução da potência reativa necessária para a perfeita magnetização da máquina.

Figura 6.7 – Comportamento de partida do gerador e forma de onda das tensões de linha e corrente do gerador



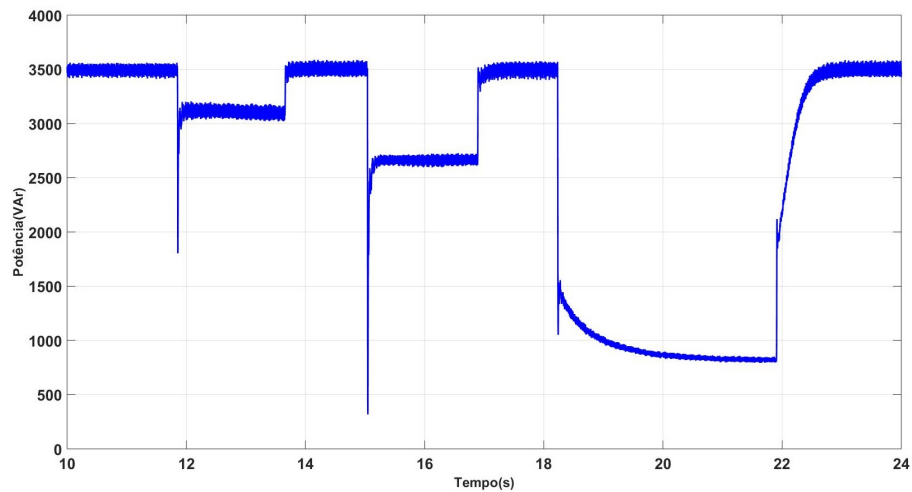
Fonte: Autor.

Figura 6.8 – Resposta da tensão de saída a cargas resistivas de 300 W, 600 W 1800 W



Fonte: Autor.

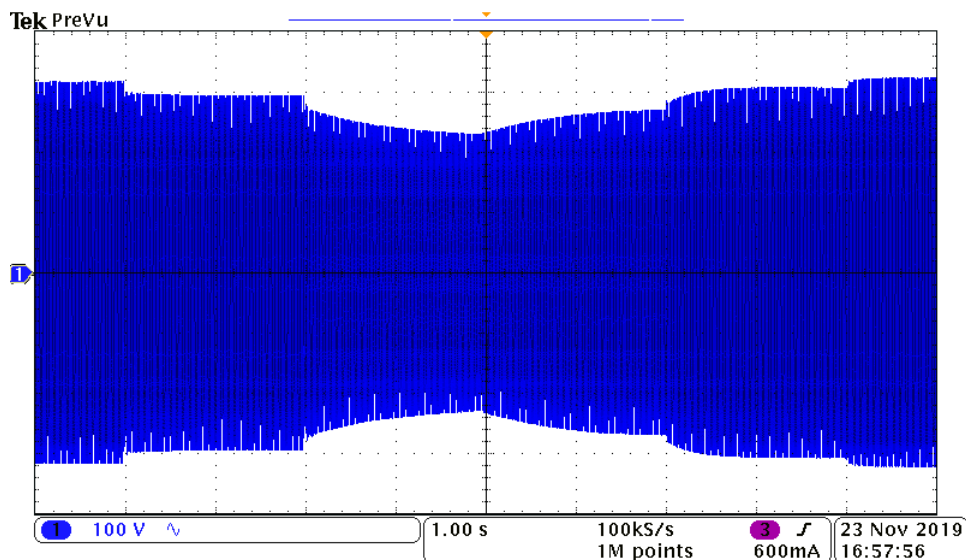
Figura 6.9 – Potência reativa no com cargas resistivas de 300W, 600 W e 1800 W



Fonte: Autor.

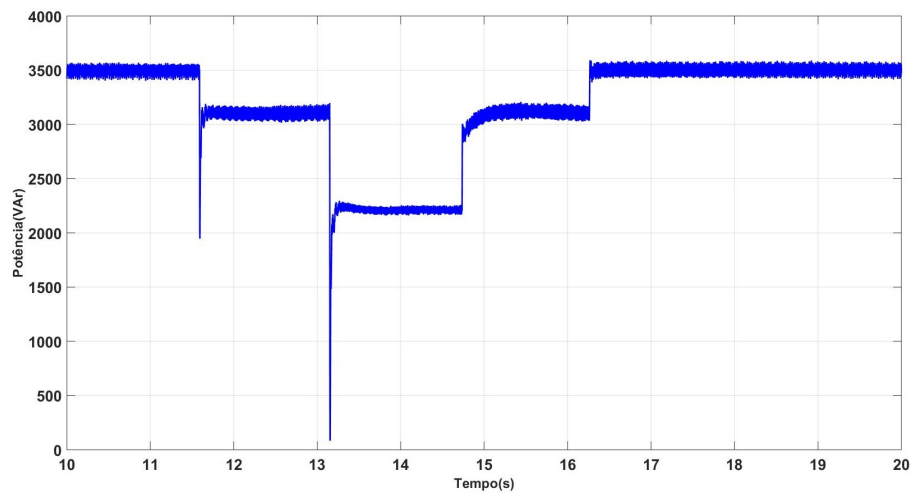
Com os mesmos efeitos do paragrafo anterior, é demonstrado na Figura 6.10, o comportamento da tensão de saída quando aplicado ao gerador uma carga de 300W e, após um intervalo de tempo, sobreposta uma carga de 600 W, totalizando uma carga de 900 W. A potência reativa no gerador, nesse caso, é mostrada na Figura 6.11.

Figura 6.10 – Resposta da tensão de saída a sobreposição de cargas resistivas de duas cargas de 300 W e uma de 600 W



Fonte: Autor.

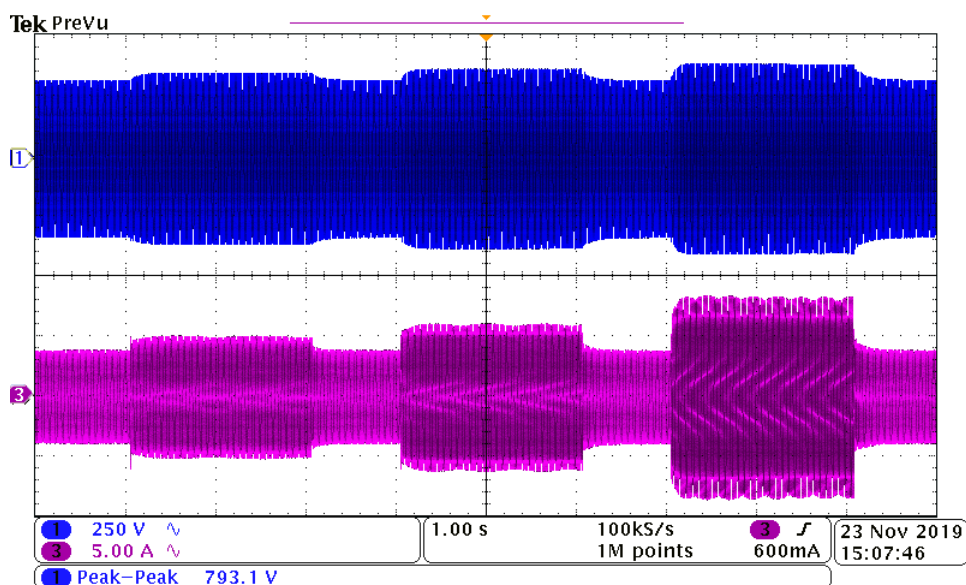
Figura 6.11 – Potência reativa do sistema com cargas sobrepostas resistivas de 300W e 600 W



Fonte: Autor.

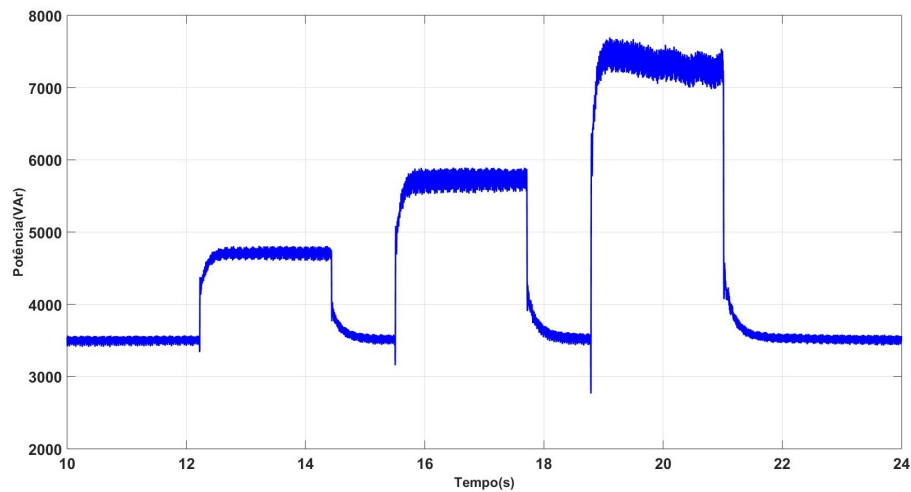
O efeito reverso ocorre quando as cargas acopladas no gerador são majoritariamente capacitivas. O comportamento de corrente e tensão de saída são demonstrados na Figura 6.12, enquanto a potência reativa é representada na Figura 6.13. São acopladas individualmente três cargas de  $6\mu\text{F}$ ,  $12\mu\text{F}$  e  $25\mu\text{F}$ . A potência reativa tende a aumentar, gerando assim, uma sobre-excitação, que por sua vez, produz maiores níveis de tensão na saída. A corrente cresce de acordo com a potência da carga, independentemente do fator de potência (FP) da mesma.

Figura 6.12 – Resposta da tensão e corrente de saída a cargas capacitivas de  $6\mu\text{F}$ ,  $12\mu\text{F}$  e  $25\mu\text{F}$



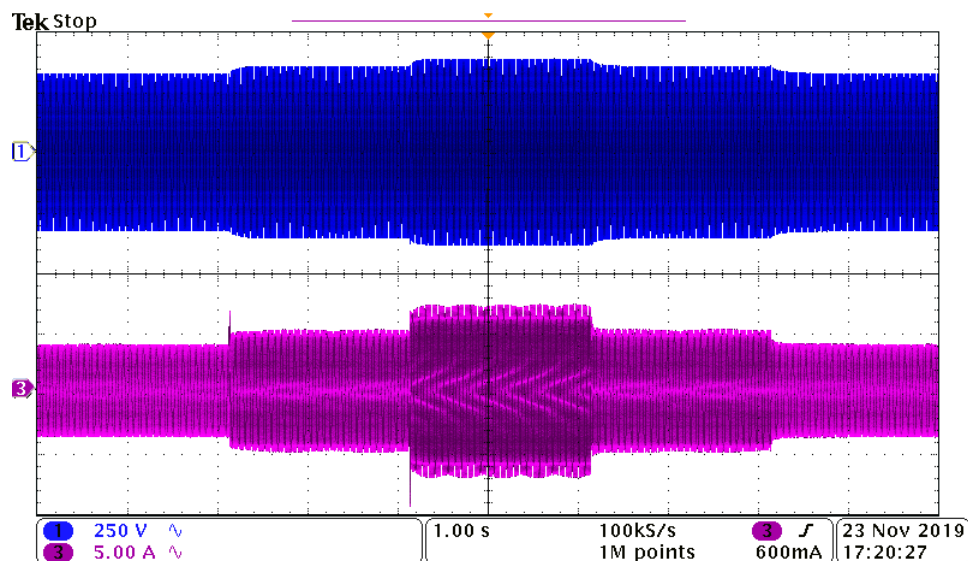
Fonte: Autor.



Figura 6.13 – Potência reativa do sistema com cargas capacitivas de  $6\mu\text{F}$ ,  $12\mu\text{F}$  e  $25\mu\text{F}$ 

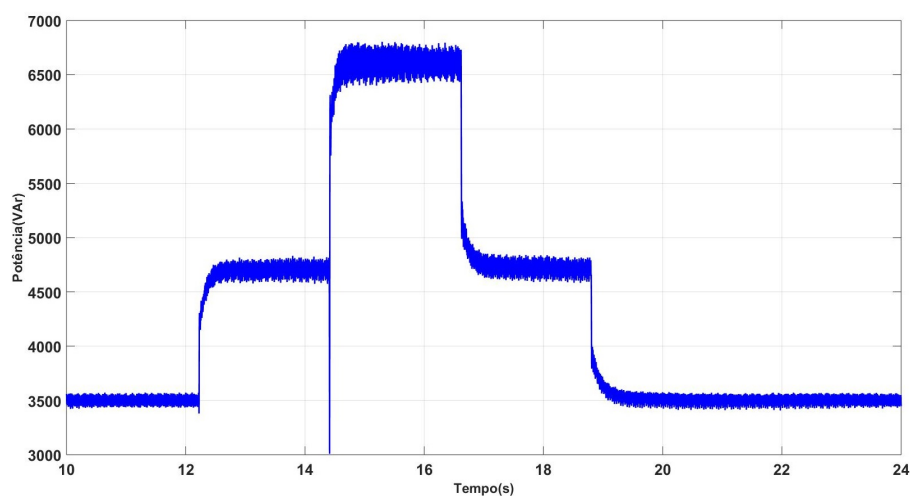
Fonte: Autor.

Com o mesmo comportamento acima citado, na Figura 6.14 são constatados a tensão e corrente de saída quando no sistema são aplicadas cargas capacitivas sobrepostas de  $6\mu\text{F}$  e  $12\mu\text{F}$ . Enquanto na Figura 6.15 é mostrado o comportamento da energia reativa presentes no gerador. Com o objetivo de constatar os diferentes níveis de tensão RMS, as Figuras 6.16 e 6.17, representam as formas de onda da tensão de saída do gerador quando este está exposto a cargas de  $18\mu\text{F}$  e  $6\mu\text{F}$  respectivamente.

Figura 6.14 – Resposta da tensão e corrente de saída a cargas capacitivas sobrepostas de  $6\mu\text{F}$  e  $12\mu\text{F}$ 

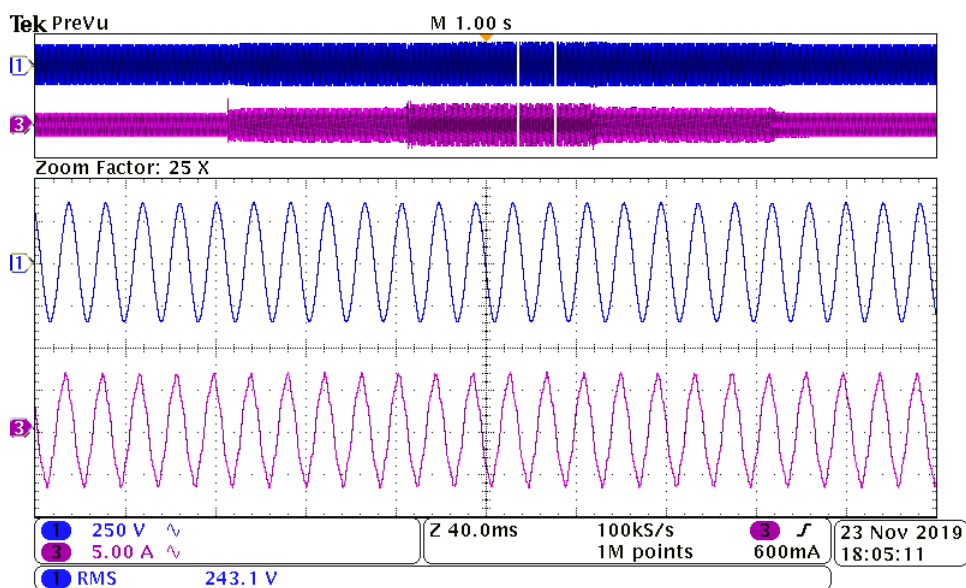
Fonte: Autor.

Figura 6.15 – Potência reativa do sistema com cargas capacitivas sobrepostas de  $6\mu\text{F}$  e  $12\mu\text{F}$

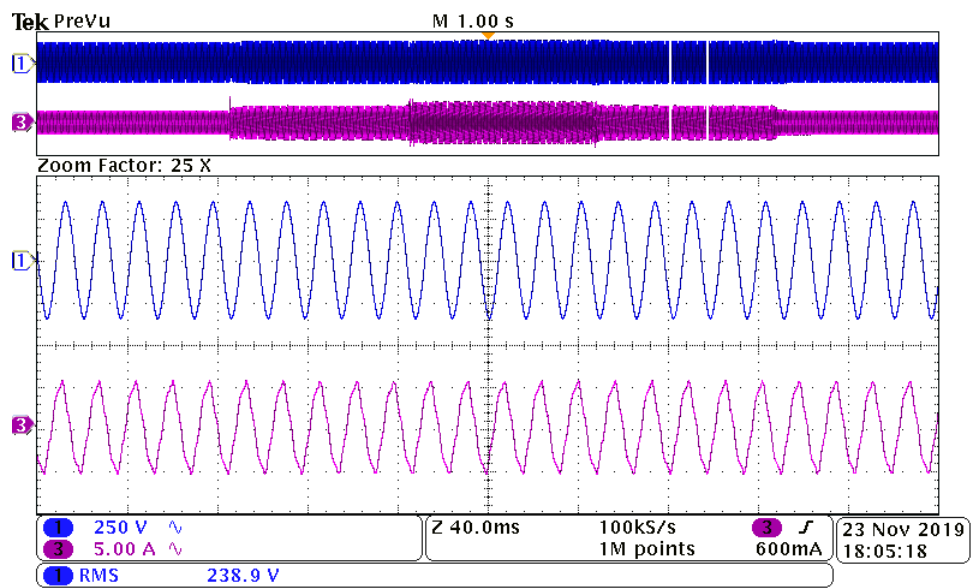


Fonte: Autor.

Figura 6.16 – Forma de onda e valor RMS da tensão de saída, com uma carga de  $18\mu\text{F}$



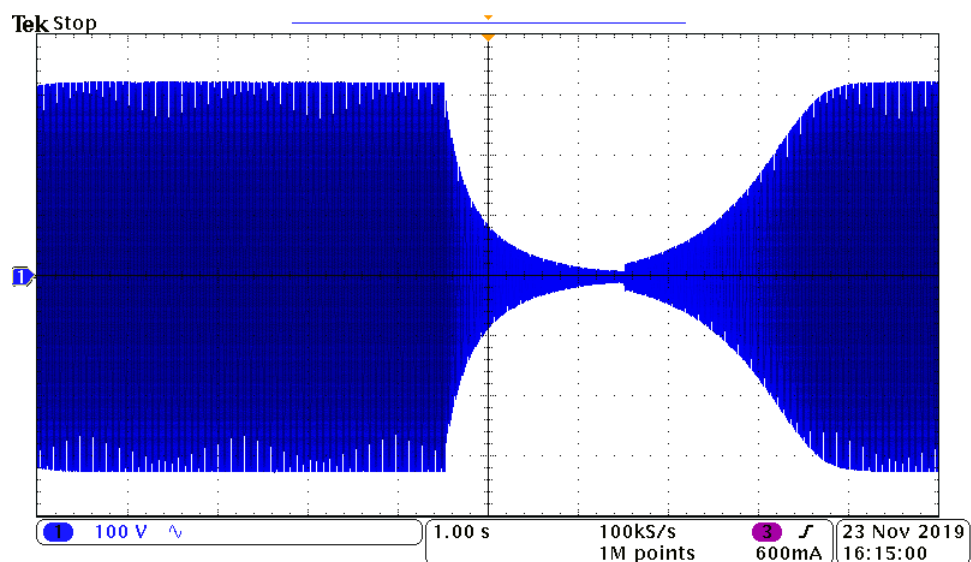
Fonte: Autor.

Figura 6.17 – Forma de onda e valor RMS da tensão de saída, com uma carga de  $6\mu\text{F}$ 

Fonte: Autor.

Ao aplicar a carga indutiva, devido sua elevada potência, tensão tendeu a zero como mostrado na Figura 6.18, levando o gerador para a zona de desmagnetização.

Figura 6.18 – Resposta da tensão de saída a cargas indutiva



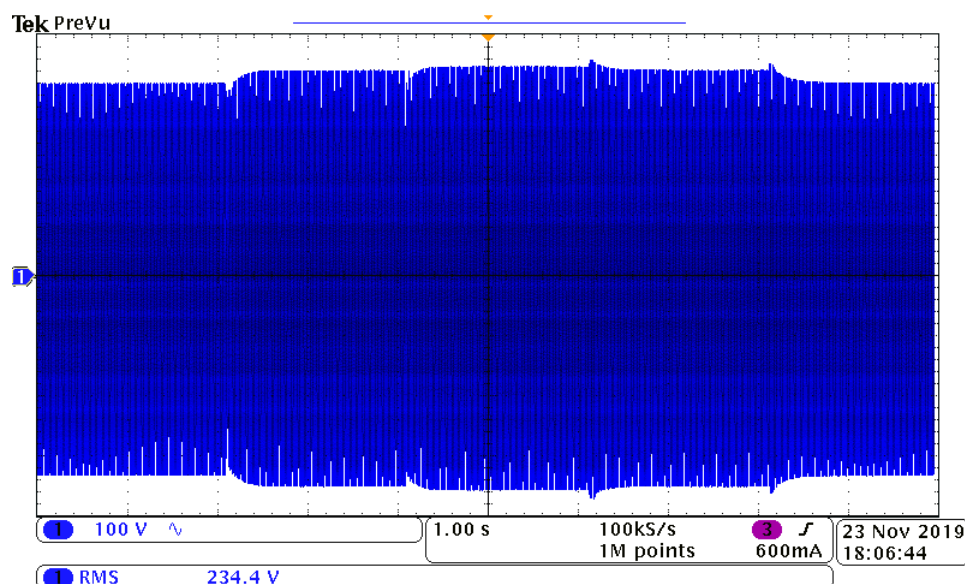
Fonte: Autor.

### 6.3 PLANTA COM TOPOLOGIA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO COM CHAVE DISCRETA

Na bancada experimental foram coletados dados a partir do acoplamento de cargas resistivas, objetivando observar o chaveamento dos bancos capacitivos como regulador de tensão. A topologia de regulação de tensão foi utilizada a partir da bancada de cargas capacitivas da Figura 6.5.

No primeiro ensaio, mostrada na Figura 6.19 foram acopladas sobrepostas duas cargas de 600 W. A tensão gerada obteve formato de onda representado na Figura 6.19. Nela é possível verificar, além de pequenos transitórios nas comutações, níveis de tensão semelhantes nos diferentes estados de carregamento de carga.

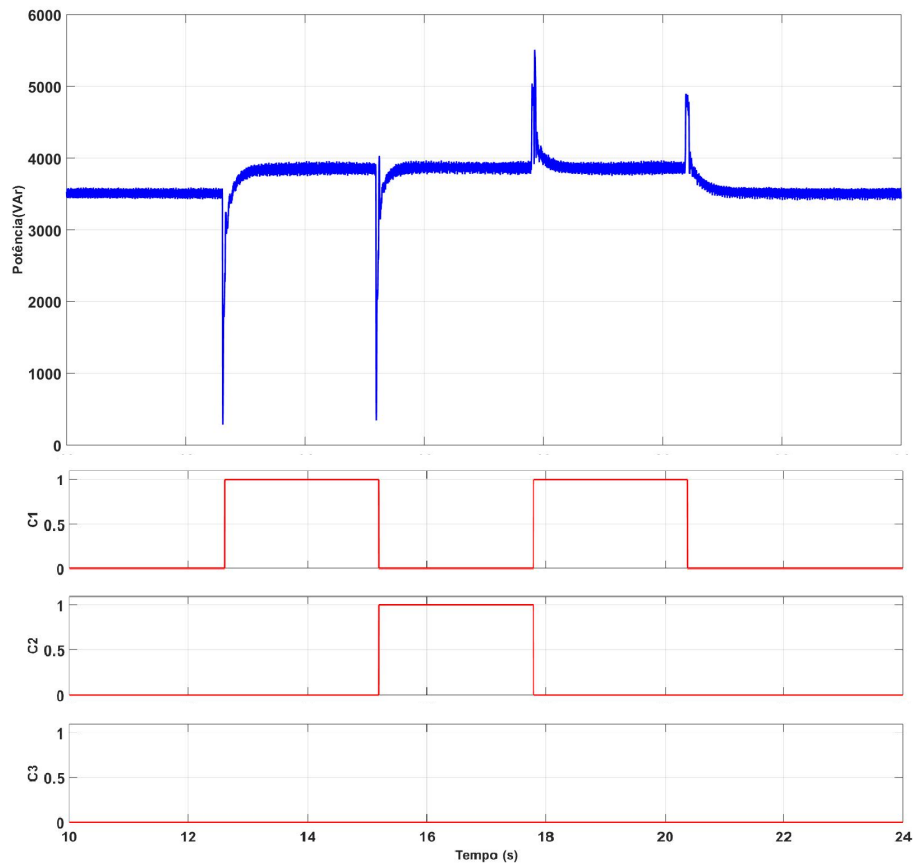
Figura 6.19 – Resposta da tensão de saída a sobreposição de duas cargas resistivas de 600 W



Fonte: Autor.

A Figura 6.20 mostra a comparação da potência reativa presente no sistema e o chaveamento das contatoras. Ocorreram, nessa configuração, três estados de chaveamento. Enquanto operava a vazio, nenhum banco de capacitor foi requisitado, todavia após a entrada da primeira carga, o primeiro banco de capacitores foi requisitado. Posteriormente, no acionamento da segunda carga o primeiro banco é retirado e é acoplado o segundo banco de capacitores. Com o decorrer do ensaio ocorre a retirada dos bancos pelo acoplamento de cargas capacitivas e posteriormente, o gerador atua a vazio.

Figura 6.20 – Potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves discretas com duas cargas resistivas sobrepostas de 600 W

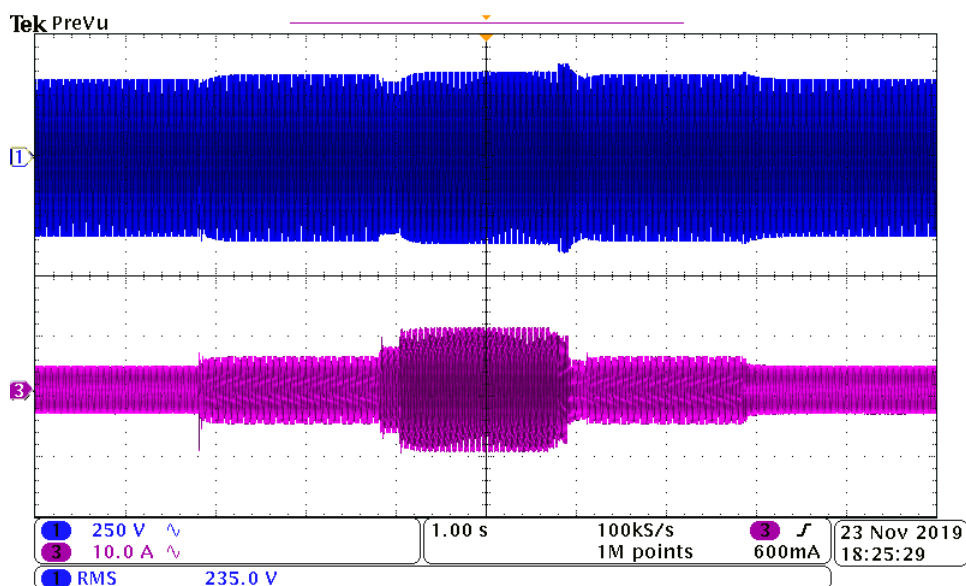


Fonte: Autor.

No segundo ensaio foi realizada com a sobreposição de uma carga de 600 W e outra de 1800 W. Neste ensaio ocorreram requisições mais severas do sistemas. Assim como na regulação anterior, os níveis de tensão alcançaram limites considerados adequados de fornecimento de energia elétrica. É possível verificar na Figura 6.21 a tensão e a corrente de saída do gerador.

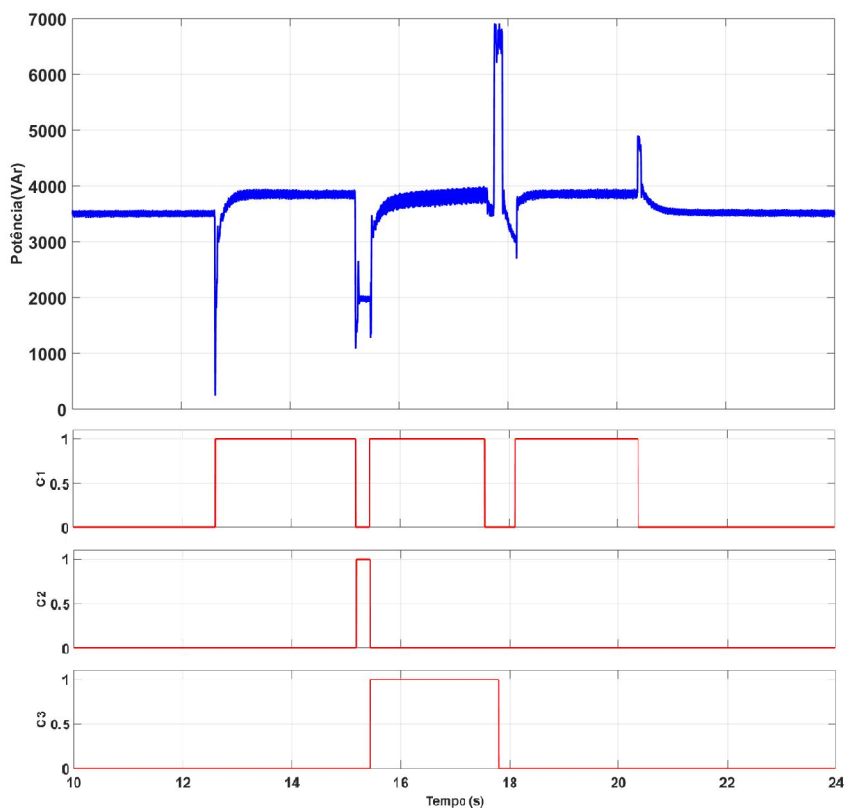
Na Figura 6.22, é representada a potência reativa no gerador e a comutação dos capacitores. Nesse ensaio ocorreram cinco estados níveis de capacitância chaveados. Esse comportamento ocorre devido a elevada potência da segunda carga acoplada ao sistema.

Figura 6.21 – Resposta da tensão e corrente de saída a sobreposição de cargas resistivas de 600 W e 1800 W



Fonte: Autor.

Figura 6.22 – Potência reativa do sistema e chaveamento com regulação de tensão com chaves discretas com cargas sobrepostas de 600 W e 1800 W



Fonte: Autor.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho proporcionou desenvolver conhecimentos teóricos e práticos de múltiplas áreas estudadas durante o curso de Engenharia Elétrica.

O estudo apresentado nesse relatório contribui à regulação de tensão para microsistemas que utilizam geradores de indução autoexcitados. Segundo a (ENERGIA, 2018), será necessário o aumento da planta energética para suprir a demanda de eletricidade até 2050, para isso, a implementação de novos pequenos aproveitamentos de energia elétrica e aprimoramento dos já existentes serão de suma importância. Como os geradores de indução são excelentes alternativas para pequenos aproveitamentos, o estudo da sua regulação de tensão permite o desenvolvimento e aprimoramento de pequenas, mini e micro centrais de geração de energia elétrica.

A topologia de capacitores em paralelo, apresentada neste relatório, obteve resultados satisfatórios, visto que, permitiu ao sistema, em regime permanente, segundo (ANEEL, 2017), ter qualidade de tensão adequada, com o acoplamento de cargas lineares, enquanto o sistema sem regulação de tensão apresenta níveis críticos de tensão com a aplicação de pequenas cargas, já para grandes cargas ocorre a perda de excitação do gerador .

O chaveamento dos capacitores por dispositivos semicondutores resultou melhores respostas em amplitude de transitórios comparado as chaves discretas. Aliado ao menor desgaste mecânico, evidenciou-se vantagem em sua utilização frente as contatoras. Foi observado ainda, que os algoritmos propostos para o chaveamento dos bancos de capacitores de regulação de tensão, com chaves discretas e semicondutoras, apresentaram desempenhos satisfatórios para essa aplicação, propiciando uma melhor regulação de tensão.

Em comparação com topologias de regulação de tensão mais complexas como as que utilizam DSTATCOMs, as topologias com banco de capacitores em paralelo possuem baixo custo, facilitando assim, ainda mais a sua utilização em uma planta comercial.

### 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste relatório é possível implementar sistemas de aprimoramento ou semelhantes para sistemas que utilizem geradores de indução autoexcitados.

- Implementação de diferentes tipos de regulação de tensão;
- Regulação de frequência aliada a topologias de regulação de tensão;
- Controle de reativos pela razão cíclica de chaveamento dos capacitores;

- Interligação de cargas com características distintas, com intuito de verificar a resposta do sistema proposto neste relatório;
- Utilização de métodos de sincronismo e chaveamento que permitam a diminuição de amplitude e tempo de acomodação nas respostas transitórias;



## REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. [S.l.]: Prentice Hall, 2000. ISBN 85-87918-03-6.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST Módulo Oito Qualidade de energia**. 2017. <[https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M~A{^3}dulo\\_8-Revis~A\protect\T1\textsterlingo\\_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9](https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M~A{^3}dulo_8-Revis~A\protect\T1\textsterlingo_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9)>. Acessado em: 28/04/2019.
- \_\_\_\_\_. **Geração Distribuída**. 2018. <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acessado em: 28/04/2019.
- BAU, D. F. **Estratégias de modulação PWM e controle aplicadas ao conversor multinível modular**. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.
- BETTONI, S. **Máquinas Elétricas**. 2014. <https://slideplayer.com.br/slide/1559421/>. Acessado em: 03/07/2019.
- BRAGA, H. A. C.; BARBI, I. Conversores estáticos multiníveis - uma revisão. **SBA Controle e Automação Vol. 11 n. 01**, p. 20–29, 2000.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. [S.l.]: AMGH, 2013. v. 1. ISBN 978-85-8055-207-2.
- CHAUHAN, Y. K.; JAIN, S. K.; SINGH, B. A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications. **IEEE Transactions on industry applications**, v. 46, no. 2, p. 720–730, 2010.
- CORTEZ, D. **Família de retificadores PWM unidirecionais três-níveis híbridos a capacitor chaveado com elevado fator de potência**. 253 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- COSTA, R. C. d. C.; PRATES, C. P. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**. 1. ed. [S.l.]: BNDES, 2005. v. 1.
- ENDERLE, T. P. **Análise, projeto e implementação de um D-STATCOM para redes de distribuição monofásica**. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- ENERGIA, M. de Minas e. **Cenários de Demanda para o PNE 2050**. 2018. <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/Cen%C3%A1rios%20de%20Demanda.pdf>>. Acessado em: 16/06/2019.

- EPE. **Projeção da demanda de energia elétrica**. 2017. <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001\\_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026\\_VF\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf)>. Acessado em: 29/11/2019.
- FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. 2. ed. [S.l.]: Editora da UFSM, 2010. v. 1. ISBN 978-85-7391-126-8.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; D, U. S. **Electric Machinery**. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2003. v. 1. ISBN 0-07-366009-4.
- FREITAS, W. et al. Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída. **Revista Controle e Automação**, v. 18, p. 322–344, 2006.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis um futuro sustentável. **Revista USP n. 72**, p. 6–15, 2006.
- HANAFY, H. et al. Analysis of a proposed connection for the two-winding single-phase self-excited induction generator operating at constant voltage and frequency. **Journal of Electrical Systems and Information Technology**, Springer, v. 6, n. 1, p. 2, 2019.
- HOMRICH, G. **Regulação de tensão em geradores de indução**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- JENKINS, N. Embedded generation. **Power Engineering Journal**, p. 145–150, 1995.
- KREUTZFELD, S. **Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução pelo método dos elementos finitos**. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- LOPES, R. E. et al. O Uso de BFTS Acionando Geradores de Indução como Solução de Baixo Custo e Eficiência no que se refere a Micro e Mini Centrais Hidrelétricas. 2008.
- LOSEKANN, L.; HALLACK, M. Novas energias renováveis no Brasil: Desafios e oportunidades. **Desafios da Nação: artigos de apoio**, p. 631–655, 2018.
- MACCARINI, M. C. **Retificador monofásico com fator de potência unitário, de alto ganho, baseado em um conversor boost híbrido**. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- MARTIGNONI, A. **Máquinas de Corrente Alternada**. 6. ed. [S.l.]: Globo, 1995.
- MARTINS, G. B. **Estudo de conversores a capacitores chaveados**. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

- MUSA, I.; ZAHAWI, B.; GADOUE, S. M. Integration of Induction Generator Based Distributed Generation and Shunt Compensation Capacitors in Power Distribution Networks. **4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**, p. 1105–1109, 2013.
- NASCIMENTO, C. S. C. d. **Diretrizes analíticas para projeto de geradores de indução de rotor tipo gaiola de esquilo**. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- NASCIMENTO, C. S. C. do. **Proposta para implementação de microcentrais de geração a gás com utilização de geradores de indução**. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- POSSAGNO, R. **Transistor de efeito de campo e dispositivos de memória baseados em polímeros e compósitos de polímeros e nanotubos de carbono**. 77 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. [S.l.]: Makron Books, 1999. ISBN 85-346-0698.
- RECH, C. et al. Impacto de métodos de sincronismo no desempenho de geradores de indução. **Revista Controle e Automação - SBA**, v. 19, p. 475–485, 2008.
- SANTOS, A. et al. **Eficiência Energética: teoria e prática**. 1. ed. [S.l.]: Ministério de Minas e Energia, 2007. ISBN 978-85-60369-01-0.
- SCHERER, L. G. **Modelagem e controle de uma micro central hidrelétrica com utilização de gerador de indução auto-excitado**. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- SINGH, S.; AZAD, M. L.; KUMAR, A. Electronic load controllers for self excited induction generator. 2016.
- SUTO, Z.; NAGY, I. Nonlinear Dynamics and Three-Phase Voltage Source converters: review . In: **16th Int. Conference on Electrical Drives and Power Electronics Slovakia**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 2.
- TISCHER, C. B. **Estudo de curvas de capacidade aplicada ao monitoramento da operação de geradores síncronos** . 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.
- TISCHER, C. B. **Desenvolvimento de uma topologia híbrida a três fios para regulação de tensão aplicada em microcentrais hidrelétricas**. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

TISCHER, C. B. **Contribuições ao controle aplicado a uma topologia híbrida para regulação de tensão em geradores de indução autoexcitados**. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

TORO, V. D. **Basics Electric Machines**. [S.l.]: Prentice Hall, 1990.

TRAPP, J. G. **Gerador de indução isolado com tensão e frequência reguladas por conversor matricial esparso**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

VANCO, W. E. et al. Experimental Analysis of a Self-excited Induction Generators Operating in Parallel with Synchronous Generators Applied to Isolated Load . **IEEE Latin America Transactions** n. 04, p. 1730–1736, 2016.

\_\_\_\_\_. Feasibility Analysis of the Use of the Generation of Induction in the Distributed Generation. **IEEE Latin America Transactions**, Vol. 16, No. 7, p. 1921–1927, 2018.

ZAMBRA, D. A. B. **Estudo e comparação de sistemas de acionamento multiníveis para aplicações de alta potência e média tensão**. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.