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

Maicon de Miranda

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA O CONTROLE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DE UM GERADOR SÍNCRONO

Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2018

Maicon de Miranda

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA O CONTROLE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DE UM GERADOR SÍNCRONO

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. Lucas Giuliani Scherer

Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2018

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

Miranda, Maicon de
Desenvolvimento de um Sistema para o Controle de Excitação de Campo de um Gerador Síncrono / Maicon de Miranda - 2018
52 p.; 30 cm

Orientador: Lucas Giuliani Scherer
TCC (graduado) – Universidade Federal de Santa Maria - Campus Cachoeira do Sul, Curso de Engenharia Elétrica, RS, 2018

1.Engenharia Elétrica 2. Geração Distribuída 3. Gerador Síncrono 4. Controle de Excitação de Campo I. Scherer, Lucas Giuliani. II. Miranda, Maicon de. III. Desenvolvimento de Sistema para o Controle de Excitação de Campo de um Gerador Síncrono.

© 2018
Todos os direitos autorais reservados a Maicon de Miranda. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.
Endereço: Avenida Presidente Vargas, Nº 428, Bairro Barcelos, Cachoeira do Sul, RS, Brasil, CEP: 96506-722;
Endereço Eletrônico: maicondemiranda@hotmail.com.

Maicon de Miranda

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA O CONTROLE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DE UM GERADOR SÍNCRONO

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 12 de Dezembro de 2018:

Lucas Giuliani Scherer, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Celso Becker Tischer, Dr. (UFSM)

Paulo César Vargas Luz, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
Joaquin Sidnei de Miranda e
Indiara Rodrigues Carvalho.

“Aqueles que falam
devem fazer,
e somente os que fazem
devem falar.”
Autor Desconhecido.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA O CONTROLE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DE UM GERADOR SÍNCRONO

Autor: Maicon de Miranda
Orientador: Lucas Giuliani Scherer

O aumento da demanda de energia elétrica mundial e preocupações com o meio ambiente vêm sendo uma motivação para se buscar novas fontes de geração de energia elétrica. Sendo assim, a geração distribuída, que é uma geração de menor porte e mais próxima do consumidor, está em expansão na matriz energética mundial. Com o desenvolvimento de novas tecnologias tem ocorrido aumento na utilização de fontes de energia renovável. Devido as suas características construtivas e facilidade de controle, o gerador síncrono é a máquina mais empregada nos sistemas de geração de energia. A potência ativa e reativa fornecida pelo gerador síncrono são controladas pela excitação de campo do gerador. Deste modo, esse trabalho busca o desenvolvimento de um conversor CC-CC e um sistema de controle de excitação de campo do gerador síncrono para a regulação de potência ativa e reativa.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Gerador Síncrono. Controle de Excitação de Campo.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR THE FIELD EXCITATION CONTROL OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

Author: Maicon de Miranda
Advisor: Lucas Giuliani Scherer

The increase in the world's electric energy demand and the concern for the environment are being a motivation for the search of new sources of electrical energy generation, in order to seek new sources of electricity generation. Thus, distributed generation, that is a smaller generation and closer to the consumer, is expanding in the world energy matrix. With the development of new technologies there has been an increase in the use of renewable energy sources. Due to its constructive characteristics and ease of control, the synchronous generator is the most used machine in the power generation systems. The active and reactive power provided by the synchronous generator is controlled by the field excitation of the generator. In this way, this work seeks the development of a DC-DC converter and a field excitation control system of the synchronous generator for the regulation of active and reactive power

Keywords: Distributed Generation. Synchronous Generator. Field Excitation Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Aspecto construtivo de um gerador síncrono 13
Figura 2.2 – Rotor de Polos Lisos 14
Figura 2.3 – Rotor de Polos Salientes 14
Figura 2.4 – Curva de velocidade mecânica *versus* potência ativa de uma máquina motriz 15
Figura 2.5 – Circuito equivalente de um gerador síncrono 16
Figura 2.6 – Diagrama fasorial com FP unitário de um gerador síncrono 17
Figura 2.7 – Diagrama fasorial com FP atrasado de um gerador síncrono 17
Figura 2.8 – Diagrama fasorial com FP adiantado de um gerador síncrono 18
Figura 2.9 – Efeito do aumento de uma carga com FP unitário sobre a tensão de terminal do GS 19
Figura 2.10 – Efeito do aumento de uma carga com FP atrasado sobre a tensão de terminal do GS 19
Figura 2.11 – Efeito do aumento de uma carga com FP adiantado sobre a tensão de terminal do GS 20
Figura 2.12 – Alteração da potência reativa compartilhada mantendo a tensão de terminal constante 21
Figura 2.13 – Aumento da potência reativa compartilhada através da corrente de campo 21
Figura 2.14 – Sistema de excitação CC 22
Figura 2.15 – Sistema de excitação CA utilizando ponte de tiristores 23
Figura 2.16 – Sistema de excitação CA utilizando ponte de diodos 23
Figura 2.17 – Sistema de excitação estático 24
Figura 2.18 – Sistema de excitação estático utilizando VSC 25
Figura 2.19 – Circuito elétrico básico de um conversor Buck 26
Figura 3.1 – Sistema de Geração Proposto 27
Figura 3.2 – Diagrama de Blocos Geral do Sistema de Controle 28
Figura 3.3 – Conversor Buck com Componentes Não Ideais 30
Figura 3.4 – Conversor Buck Ideal 30
Figura 3.5 – Estado Topológico do Buck para a Chave Fechada 31
Figura 3.6 – Estado Topológico do Buck para a Chave Aberta 32
Figura 3.7 – Circuito Médio Equivalente do Buck 33
Figura 3.8 – Circuito Equivalente do Buck em Regime Permanente 34
Figura 3.9 – Diagrama de Blocos do Sistema de Controle Empregado 39
Figura 4.1 – Potências Fornecidas pelo GS com Variação de 10% da Carga Nominal 43
Figura 4.2 – Tensões do GS com Variação de 10% da Carga Nominal 44
Figura 4.3 – Sinais de Controle com Variação de 10% da Carga Nominal 45
Figura 4.4 – Potências Fornecidas pelo GS com Variação de 50% da Carga Nominal 46
Figura 4.5 – Tensões do GS com Variação de 50% da Carga Nominal 46
Figura 4.6 – Sinais de Controle com Variação de 50% da Carga Nominal 47
Figura A.1 – Sistema de Geração Simulado no Software Simulink 52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Considerações Gerais 11
1.2 Justificativa 11
1.3 Objetivos 12
1.3.1 Objetivos Gerais 12
1.3.2 Objetivos específicos 12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13
2.1 Controle da Frequência do Gerador Síncrono 14
2.2 Controle da Tensão de Saída do Gerador Síncrono 16
2.3 Potência Ativa e Reativa Fornecidas pelo Gerador Síncrono 18
2.4 Sistema de Excitação do Gerador Síncrono 22
2.4.1 Sistema de Excitação CC 22
2.4.2 Sistema de Excitação CA 23
2.4.3 Sistema de Excitação Estático 24
2.5 Considerações Finais 26
3 SISTEMA DE GERAÇÃO PROPOSTO 27
3.1 Modelagem do Gerador Síncrono 28
3.2 Modelagem do Conversor *Buck* 29
3.2.1 Primeira Etapa de Operação 31
3.2.2 Segunda Etapa de Operação 32
3.2.3 Equação Média das Etapas 33
3.2.4 Função de Transferência 34
3.2.5 Projeto do Conversor Buck 37
3.3 Projeto do Sistema de Controle 38
3.3.1 Projeto do Controlador PD 40
3.3.2 Projeto do Controlador PI 41
3.4 Considerações Finais 42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 43
4.1 Conclusões Gerais 47
5 CONCLUSÃO 48
5.1 Trabalhos Futuros 48
REFERÊNCIAS 49
APÊNDICES 51

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem como objetivo converter a energia disponível em sua forma natural e transportá-la ao consumidor na forma de eletricidade, a qual pode ser utilizada de outras maneiras como calor, luz e energia mecânica. A energia na forma elétrica pode ser transportada e controlada de maneira mais fácil, com grande eficiência e confiabilidade. Para o SEP operar de maneira adequada, ele deve atender a alguns requisitos como suportar mudanças de carga, suprir energia com um custo reduzido e baixo impacto ambiental, respeitando certos padrões de qualidade como frequência e tensão constantes, oferecendo confiabilidade ao sistema (KUNDUR, 1993).

Na configuração tradicional atual os sistemas elétricos são constituídos de sistemas de geração conectados a longas linhas de transmissão e distribuição até chegar ao consumidor. Para aumentar a eficiência do fornecimento de energia, pode-se ter vários sistemas elétricos operando interligados, deste modo, a falha ou necessidade de desligamento (manutenção) de um sistema, é compensada pelos demais sistemas, que têm a carga redistribuída entre eles (PEPERMANS et al., 2005).

Recentemente, fatores como inovações tecnológicas, mudanças na economia (liberação do mercado de energia) e maior preocupação com a conservação ambiental tem aumentado o interesse pela geração distribuída (PEPERMANS et al., 2005).

A geração distribuída, por ser caracterizada como sistemas de geração localizadas próximos à carga, permite uma menor utilização das redes de transmissão e distribuição causando uma diminuição do custo de construção das linhas para fornecimento de energia (ACKERMANN; ANDERSSON, 2001). Outra vantagem da geração distribuída é possuir menor porte em relação a grandes projetos elétricos, como hidrelétricas, possibilitando rápido suprimento da demanda energética que está em constante crescimento. Pelo fato de proporcionar várias plantas conectadas ao sistema, a geração distribuída possibilita um aumento na qualidade de energia e confiabilidade da rede (PEPERMANS et al., 2005).

Acontecimentos como a crise energética do Brasil, em 2001, e a liberalização do mercado de energia, contribuíram para o aumento no número de geradores conectados à rede de distribuição de energia elétrica. Embora novas formas de geração de energia elétrica tenham sido aplicadas, como células a combustível e painéis fotovoltaicos, ainda hoje a grande maioria dos sistemas de geração distribuída empregam máquinas síncronas ou assíncronas (ANTUNES, 2007).

A máquina síncrona é considerada o melhor meio de transformar energia mecânica em energia elétrica, sendo assim, a maior parte dos sistemas elétricos de potência no mundo utilizam máquinas síncronas para geração, seja através de turbinas a água ou a vapor, ou através de máquinas de combustão. Outro aspecto positivo é que o comportamento eletromecânico da maioria das máquinas síncronas é praticamente o mesmo, independente de sua aplicação (KRAUSE, 2002). Além desses motivos o gerador síncrono

(GS) também é amplamente utilizado, tanto no sistema elétrico de potência quanto em sistemas de geração distribuída, pelo fato de possuir um método mais simples de controlar a frequência e tensão por ele fornecidas.

Apesar das inúmeras vantagens dos geradores síncronos, nas últimas décadas houve um aumento na utilização de geradores assíncronos ou geradores de indução, principalmente em sistemas de geração eólica e pequenas centrais hidrelétricas. Segundo Scherer (2012), o gerador assíncrono possui algumas vantagens em relação ao gerador síncrono como menor custo, maior robustez e alta densidade de potência (W/kg), sendo que em países e regiões onde a conexão com a rede se torna inviável devido à distância ou custo, opta-se pelo emprego de um sistema de geração isolado, ou seja, sem conexão com o sistema elétrico de potência, consistindo basicamente em um ou mais geradores assíncronos e um pequeno número de cargas que serão alimentadas (LAI; CHAN, 2007).

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma desvantagem, em sistemas de geração isolados, é que ambos os geradores, síncronos e assíncronos, têm a amplitude e frequência das tensões de saída variando em função das cargas elétricas conectadas em seus terminais e também em função da sua velocidade de rotação.

Embora os geradores assíncronos venham sendo cada vez mais utilizados em microgeração, estes possuem uma particularidade em relação a sua operação. O gerador assíncrono não possui circuito de campo, ou seja, é necessária uma fonte externa que forneça potência reativa para que se tenha geração de energia (JUNIOR, 2015). Esta compensação de potência reativa pode ser feita através de um banco de capacitores, um conversor ou até mesmo um gerador síncrono (SCHERER, 2012).

Os geradores síncronos podem ser aplicados tanto em hidrelétricas de grande porte como em aplicações de pequenas potências. A vantagem do gerador síncrono em relação ao gerador assíncrono é o fato de oferecer um controle mais simples sobre as tensões de saída em seus terminais e frequência da rede, sendo reguladas pela variação na corrente do circuito de campo e velocidade de rotação, respectivamente.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido as suas especificidades, o gerador síncrono acaba se tornando o tipo de máquina mais utilizada em sistemas de geração distribuída. Através do controle da corrente de campo (excitação) do gerador síncrono se determina a potência ativa (P) e reativa (Q) geradas. Com o controle sobre a potência ativa e reativa do gerador síncrono, é possível

realizar a compensação do fator de potência e tornar o sistema mais eficiente. E também, em sistemas que utilizam geradores de indução, o gerador síncrono pode ser empregado para fornecer potência reativa a fim de suprir a energia demandada para a excitação dos geradores de indução.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Gerais

Desenvolvimento de um conversor CC-CC e um sistema de controle de excitação de campo do gerador síncrono para a regulação de potência ativa e reativa em um sistema de geração isolado.

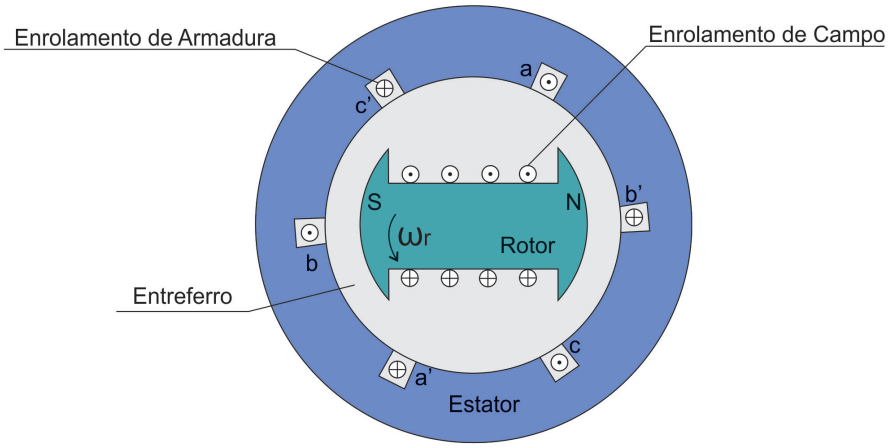
1.3.2 Objetivos específicos

- Revisão bibliográfica de estudos realizados sobre sistemas de geração distribuída com a aplicação de geradores síncronos;
- Modelagem matemática do sistema de geração proposto;
- Desenvolvimento de um conversor CC-CC;
- Desenvolvimento de um sistema de controle para o gerador síncrono;
- Análise do sistema proposto através de resultados obtidos em simulação computacional;
- Possível implementação experimental do sistema desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (2018a), 60,26% da energia elétrica do Brasil é gerada através de usinas hidrelétricas, já as usinas termelétricas são o segundo maior sistema de geração com 25,88% da produção energética. Em ambos os sistemas de geração, há a utilização de geradores síncronos que possuem uma estrutura muito simples, podendo ser dividida em duas partes: estator (parte fixa), identificado como armadura, e rotor (parte móvel), identificado como campo, sendo separadas por um entreferro (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Aspecto construtivo de um gerador síncrono

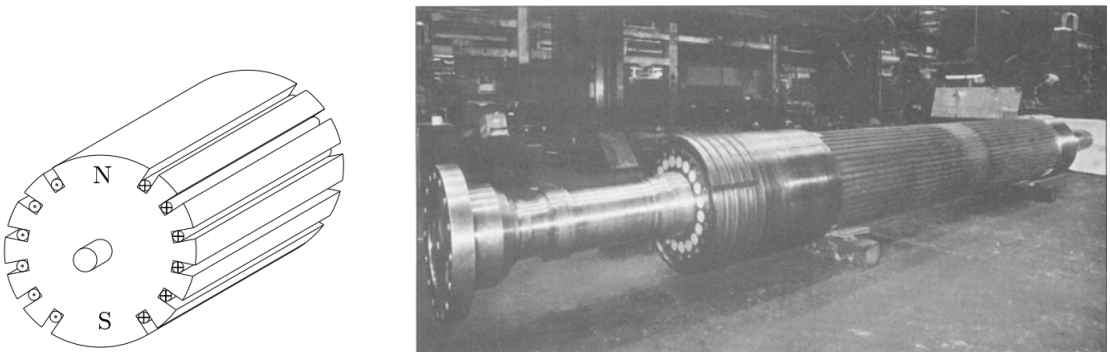


Fonte: Adaptado de (KUNDUR, 1993).

O gerador síncrono é assim chamado por operar na velocidade síncrona, ou seja, sua velocidade de rotação é igual à velocidade do campo girante. Os geradores síncronos podem ser classificados pelo aspecto construtivo de seu rotor, sendo de polos lisos (Figura 2.2) ou de polos salientes (Figura 2.3). Geradores de polos lisos são utilizados em termelétricas, sendo acionados por turbinas a vapor em altas velocidades, de 1800 a 3600 rpm dependendo do número de polos. Por outro lado, os geradores síncronos de polos salientes são utilizados em usinas hidrelétricas, sendo acionados por turbinas a água em baixas velocidades, menores que 900 rpm. Dessa forma, geradores de polos salientes têm um diâmetro maior que os de polos lisos já que possuem um número maior de polos em seus rotores (CAROLINO, 2013).

Em geral, os geradores síncronos operam conectados ao sistema de distribuição ou transmissão, podendo este ser conhecido como barramento infinito, no qual suas tensões e frequência são consideradas constantes. As vantagens de se ter geradores operando em

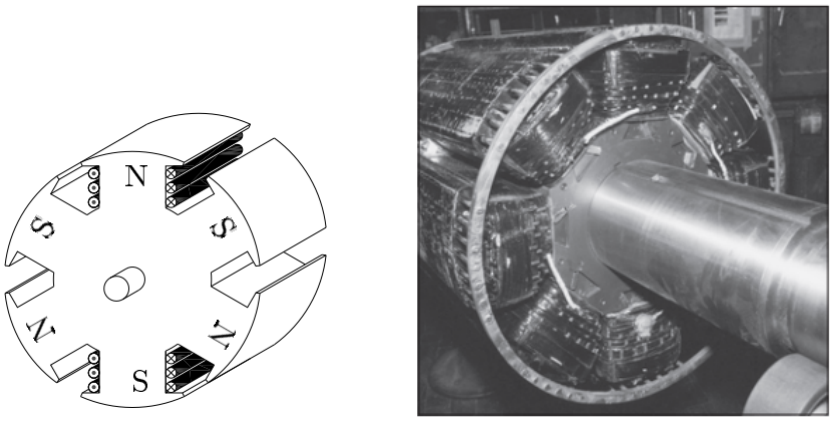
Figura 2.2 – Rotor de Polos Lisos



(a) Esquemático (b) Fotografia

Fonte: (a)(BIM, 2012) e (b)(FITZGERALD; JR; UMANS, 2003).

Figura 2.3 – Rotor de Polos Salientes



(a) Esquemático (b) Fotografia

Fonte: (a)(BIM, 2012) e (b)(CHAPMAN, 2013).

paralelo é o aumento da confiabilidade e flexibilidade do sistema, sendo que se um gerador falhar, a demanda de energia é suprida pelas demais unidades geradoras conectadas ao sistema (CAROLINO, 2013). Da mesma forma isso pode ser realizado no caso de manutenções ou reparos preventivos. Entretanto, quando operando isolado, o gerador síncrono possui suas tensões e frequência variando em função das cargas conectadas em seus terminais, necessitando de um controle adequado para mantê-las reguladas.

2.1 CONTROLE DA FREQUÊNCIA DO GERADOR SÍNCRONO

Os geradores são acionados por máquinas motrizes como turbinas a vapor ou hidráulicas, citadas anteriormente, que são a fonte de potência mecânica do gerador. O rotor do gerador síncrono, também chamado de enrolamento de campo, é basicamente

um eletroímã no qual é aplicada uma corrente contínua. Essa corrente aplicada gera um campo magnético no rotor que ao girar, induz uma tensão alternada com determinada frequência no estator, também chamado de enrolamento de armadura. Através da Equação 2.1 pode-se notar a relação entre a velocidade de rotação do rotor e a frequência elétrica do estator.

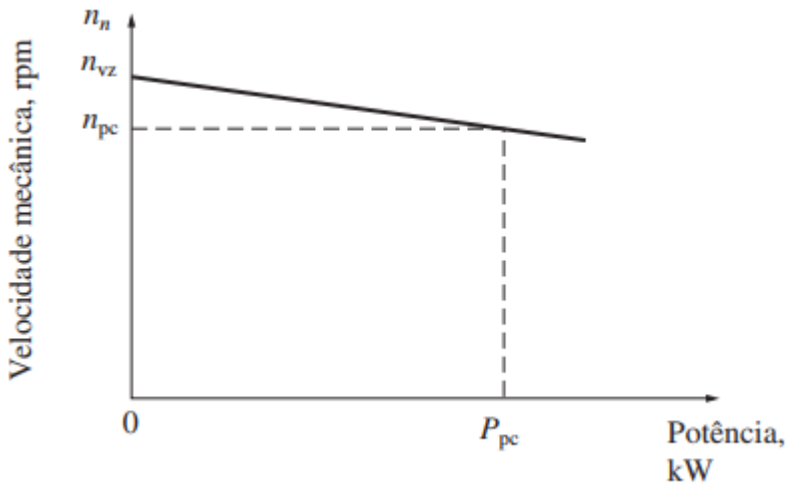
$$f_e = \frac{n_m p}{120} \tag{2.1}$$

Onde:
f_e = frequência elétrica (Hz),
n_m = velocidade de rotação do rotor (rpm),
p = número de polos do gerador.

As máquinas motrizes, independente da fonte de potência mecânica, tendem a diminuir sua velocidade de rotação quando a potência ativa exigida pela carga é aumentada. No momento em que uma carga é conectada aos terminais do gerador, será induzida uma corrente elétrica de carga que irá criar um torque elétrico (conjugado induzido) no sentido oposto ao conjugado mecânico aplicado no rotor causando a diminuição da velocidade da máquina motriz.

Como mostrado na Equação 2.1, a frequência elétrica está relacionada com a velocidade de rotação do eixo. Desta forma, para manter a frequência constante, independente das mudanças de carga nos terminais do GS, as máquinas motrizes possuem um mecanismo regulador de velocidade que tornam linear a variação da velocidade em função da demanda de potência ativa. Como pode ser visto na Figura 2.4, em que n_{vz} e n_{pc} são, respectivamente, a velocidade a vazio e a velocidade a plena carga da máquina motriz.

Figura 2.4 – Curva de velocidade mecânica *versus* potência ativa de uma máquina motriz



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

2.2 CONTROLE DA TENSÃO DE SAÍDA DO GERADOR SÍNCRONO

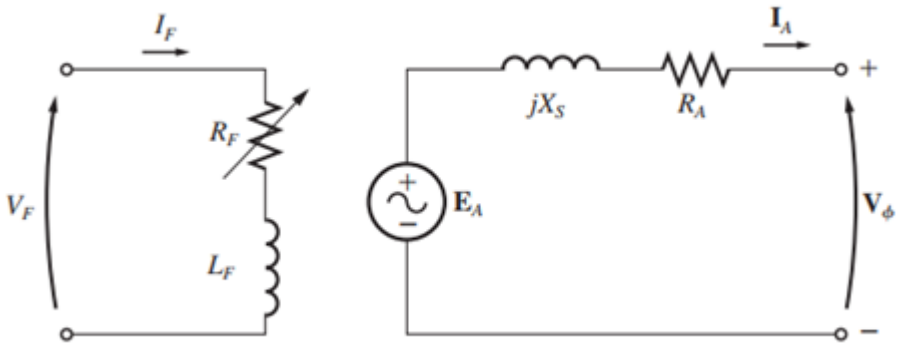
A geração de tensão interna de um gerador síncrono é dada pela equação abaixo

$$E_A = K\phi\omega \tag{2.2}$$

Em que:
E_A = tensão interna gerada,
K = constante que representa os aspectos construtivos do gerador,
ϕ = fluxo magnético,
ω = velocidade de rotação do gerador (rad/s).

Como mostrado na Equação 2.2, e ilustrado na Figura 2.5, a tensão interna gerada E_A é diretamente proporcional ao fluxo magnético, e como o fluxo depende da corrente I_F que flui no circuito de campo do rotor, pode-se afirmar que a tensão interna gerada está relacionada com a corrente de campo do rotor.

Figura 2.5 – Circuito equivalente de um gerador síncrono



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

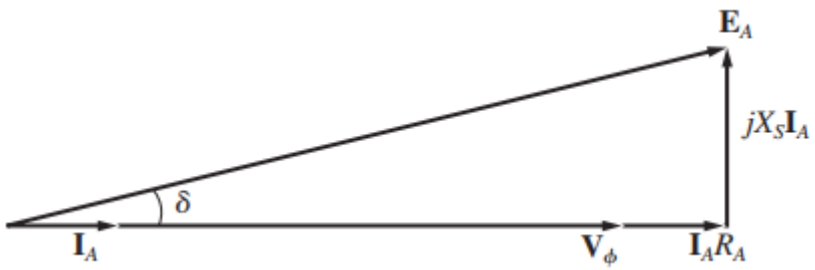
A resistência R_F e indutância L_F são correspondentes ao circuito de campo (rotor), assim variando a tensão de campo V_F, pode-se alterar a corrente I_F de modo a aumentar ou diminuir o valor da tensão interna gerada E_A. A reatância síncrona jX_S e a resistência R_A são pertencentes ao circuito de armadura (estator), sendo o valor da tensão de saída V_ϕ dependente da tensão E_A gerada. A tensão de saída V_ϕ é equivalente ao terminal de uma fase do gerador, para analisar a tensão de linha em seus terminais (V_T) deve-se considerar o tipo de ligação do gerador (delta ou estrela).

Percorrendo a malha correspondente ao circuito de armadura pode-se dizer que a tensão interna gerada é

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A + R_A I_A \tag{2.3}$$

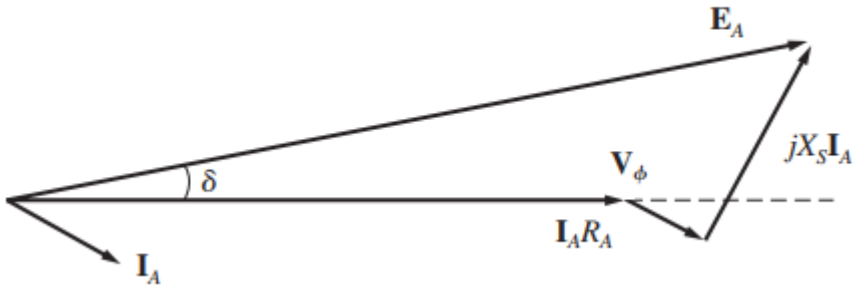
Com base na equação acima pode-se obter o diagrama fasorial do gerador (Figura 2.6) conectado a uma carga puramente resistiva, no qual a diferença entre a tensão interna gerada E_A e tensão de saída V_ϕ irá depender das quedas de tensão referentes à reatância síncrona ($jX_S I_A$) e à resistência de armadura ($R_A I_A$). Do mesmo modo, pode-se obter o diagrama fasorial considerando o gerador ligado a cargas indutivas, ou seja, com fator de potência (FP) atrasado (Figura 2.7), ou a cargas capacitivas, com o fator de potência adiantado (Figura 2.8). Em que δ é denominado o ângulo de conjugado da máquina, dado pela diferença de fase entre a tensão gerada interna e a tensão de saída do gerador.

Figura 2.6 – Diagrama fasorial com FP unitário de um gerador síncrono



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Figura 2.7 – Diagrama fasorial com FP atrasado de um gerador síncrono

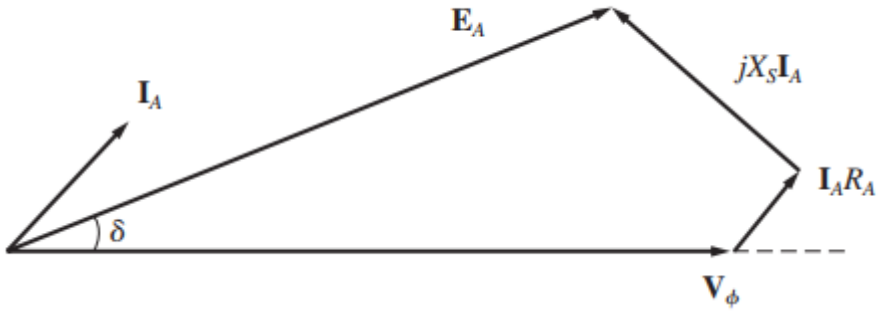


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Ao comparar as Figuras 2.7 e 2.8 pode-se perceber que a tensão interna gerada E_A para cargas indutivas é maior do que para cargas capacitivas. Também pode-se notar que a tensão de saída V_ϕ diminui quando o gerador é conectado a cargas indutivas e aumenta quando conectado a cargas capacitivas. Como em um sistema de geração é necessário manter a tensão de saída constante, reescreve-se a Equação 2.3 em função da tensão V_ϕ, sendo

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \tag{2.4}$$

Figura 2.8 – Diagrama fasorial com FP adiantado de um gerador síncrono



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Para manter a tensão de saída constante para uma determinada corrente I_A exigida pela carga, deve-se variar o valor da tensão interna gerada. Conforme visto na Equação 2.2, E_A depende dos valores da velocidade de rotação ω e fluxo magnético ϕ. Como se deseja também manter uma frequência constante, a velocidade de rotação ω permanece constante. Assim, a tensão de saída V_ϕ é regulada através da variação do fluxo magnético, ou seja, variação do valor da corrente de campo do gerador.

2.3 POTÊNCIA ATIVA E REATIVA FORNECIDAS PELO GERADOR SÍNCRONO

Considerando o gerador síncrono operando isolado ou em paralelo com outro gerador em um sistema isolado, a sua frequência e tensões de terminal serão dependentes da carga conectada a este sistema. A variação da carga, ou seja, a variação da potência ativa ou/e reativa demandada pela carga irá ocasionar uma mudança no valor da corrente de carga I_A, como pode ser visto nas equações a seguir:

$$P_{carga} = 3V_\phi I_A \cos\theta \tag{2.5}$$

$$Q_{carga} = 3V_\phi I_A \text{sen}\theta \tag{2.6}$$

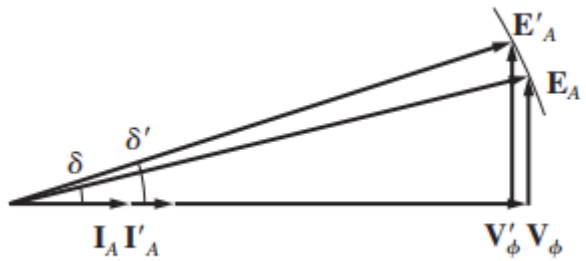
O ângulo θ representa a diferença angular entre a tensão de saída V_ϕ e a corrente de carga I_A, ou seja, o fator de potência da carga. Mantendo a tensão de saída V_ϕ constante, então a potência ativa fornecida pelo gerador será dependente de $I_A \cos\theta$ e a potência reativa será proporcional a $I_A \text{sen}\theta$.

Considerando que mais potência seja exigida pela carga e que o fator de potência permaneça o mesmo, ou seja, o ângulo θ permanece constante. Ocorrerá um aumento no módulo da corrente $|I_A|$, ocasionando um aumento no valor da queda de tensão da reatância síncrona ($jX_S I_A$) e da resistência de armadura ($R_A I_A$), porém seu ângulo será

o mesmo. Como não há nenhuma alteração na corrente de campo, o fluxo permanece o mesmo, e como velocidade de rotação do gerador também permanece a mesma, a tensão interna gerada E_A se manterá constante ($E_A = K\phi\omega$).

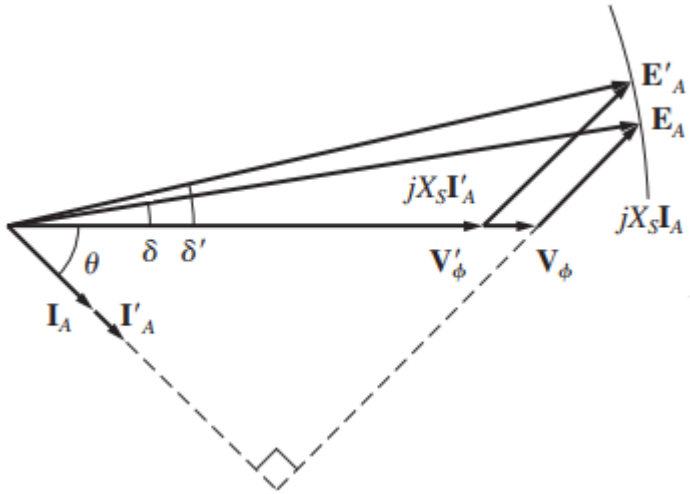
Levando em consideração esses fatores, é possível plotar os diagramas fasoriais do gerador com incremento de cargas puramente resistivas (Figura 2.9), cargas indutivas (Figura 2.10) e cargas capacitivas (Figura 2.11). Como a tensão referente à resistência de armadura ($R_A I_A$) possui um valor bem inferior ao da reatância síncrona ($jX_S I_A$), esta pode ser desconsiderada no diagrama fasorial.

Figura 2.9 – Efeito do aumento de uma carga com FP unitário sobre a tensão de terminal do GS



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

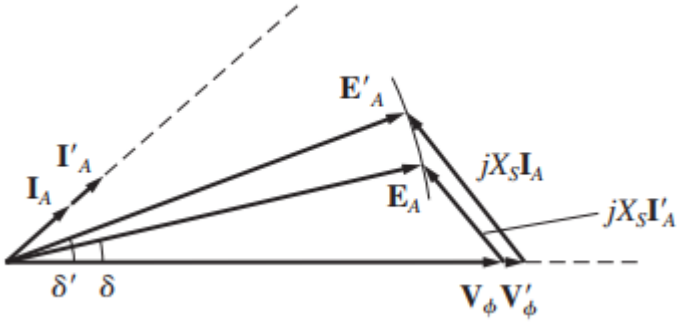
Figura 2.10 – Efeito do aumento de uma carga com FP atrasado sobre a tensão de terminal do GS



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Com base nos diagramas fasoriais pode-se afirmar que a tensão de terminal do gerador varia em função da potência reativa (Q) das cargas conectadas. Sendo que cargas

Figura 2.11 – Efeito do aumento de uma carga com FP adiantado sobre a tensão de terminal do GS



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

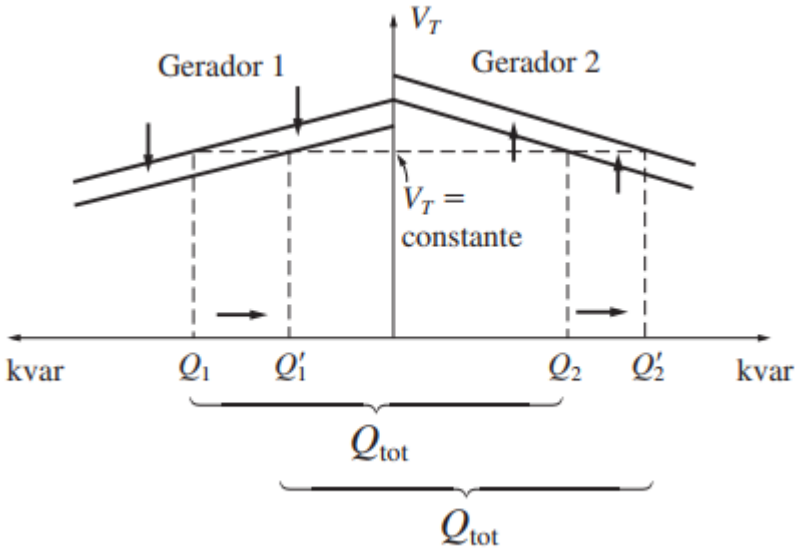
com FP puramente resistivo (sem reativos) causam uma ligeira diminuição da tensão de terminal. Cargas com FP atrasado (indutivas (+Q)) fazem a tensão de terminal diminuir significativamente. E cargas com FP adiantado (capacitivas (-Q)) provocam um aumento na tensão de terminal do gerador.

De acordo com a Equação 2.4, para manter a tensão de saída V_ϕ constante quando houver mudanças de carga (alterações no valor de I_A) no sistema, deve-se variar o valor da tensão interna gerada E_A de modo a compensar essa diferença. O valor de E_A pode ser alterado pela velocidade de rotação e/ou pela variação do fluxo. Como se deseja que a frequência do sistema permaneça constante, a velocidade deve permanecer a mesma. Assim, a variação do valor de E_A é dada pelo fluxo magnético, que é controlado pela variação da corrente de campo no enrolamento do rotor. É necessário um sistema de controle que altere o valor da corrente de campo de modo a manter constante a tensão de saída no terminal do gerador quando houver variação das cargas conectadas.

Quando um gerador síncrono está operando em paralelo com outro gerador em um sistema isolado, a potência ativa e reativa exigida pela carga será distribuída entre os dois geradores. Para manter a frequência do sistema constante, quando um gerador oferecer mais potência ativa o outro deve fornecer menos, da mesma forma, para manter a tensão de terminal constante, quando um gerador fornecer mais potência reativa o outro deverá fornecer menos (Figura 2.12).

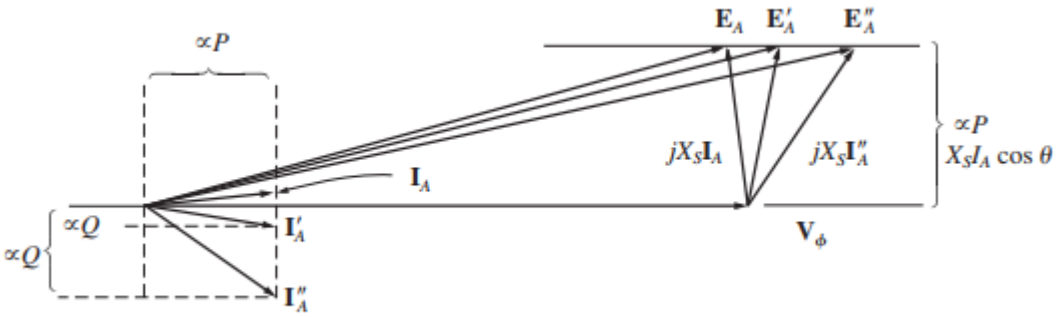
Como a tensão de terminal é controlada pela variação da corrente de campo, quando se deseja que um dos geradores forneça uma potência reativa maior ou menor ao sistema, basta alterar a sua corrente de campo. Considerando que a tensão de terminal V_ϕ se mantenha constante, se a corrente de campo for aumentada, o valor da tensão interna gerada E_A irá aumentar, variando o valor da corrente I_A ($I_A \text{sen}\theta$) de modo a fornecer a potência reativa desejada (Figura 2.13), ou seja, controle sobre o fator de potência, sem alterar o valor da potência ativa demandada pela carga.

Figura 2.12 – Alteração da potência reativa compartilhada mantendo a tensão de terminal constante



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Figura 2.13 – Aumento da potência reativa compartilhada através da corrente de campo



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Então quando um gerador síncrono está operando em paralelo com outro gerador, a sua corrente de campo pode ser alterada de forma a controlar a potência reativa que o gerador compartilha com o sistema, podendo ser utilizado apenas para compensar os reativos da rede. Nesse caso, ele operará como um compensador síncrono.

2.4 SISTEMA DE EXCITAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

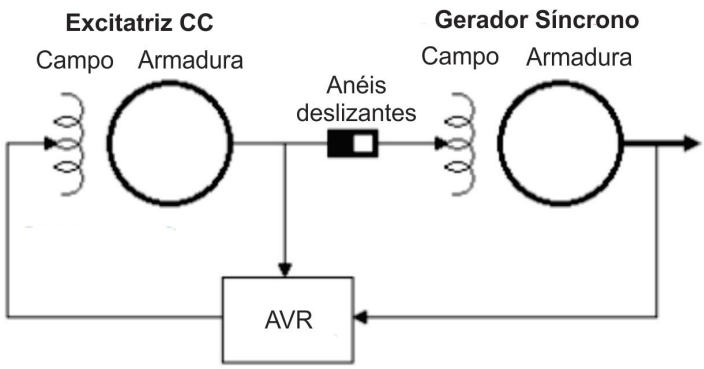
Como visto anteriormente, a tensão de terminal do gerador é regulada pela variação da corrente ou tensão de campo do GS. Os sistemas de excitação tem a finalidade de fornecer a corrente contínua para o enrolamento de campo, e combinados com um sistema de controle, realizam a regulação da tensão de terminal e potência reativa entregues pelo gerador (NEVES, 2013).

O controle sobre a tensão de terminal do gerador é realizado por um regulador de tensão automático (*Automatic Voltage Regulator* - AVR), que a partir de uma tensão de referência e da medição da tensão de terminal, fornece um sinal de controle para o sistema de excitação ajustando a tensão no enrolamento de campo do GS. Os sistemas de excitação podem ser classificados como excitação CC, excitação CA e excitação estática (KUNDUR, 1993).

2.4.1 Sistema de Excitação CC

Este sistema utiliza um gerador CC como máquina auxiliar, chamado de excitatriz CC, para fornecer a corrente de campo do GS, sendo conectado através de escovas/anéis deslizantes ao rotor do gerador síncrono (Figura 2.14). O sistema de excitação CC foi amplamente utilizado entre os anos de 1920 e 1960, atualmente poucas máquinas empregam esse sistema, sendo substituído pelos sistemas de excitação CA e estático.

Figura 2.14 – Sistema de excitação CC



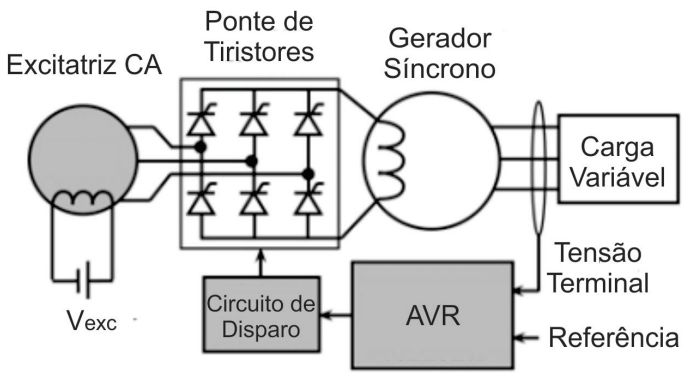
Fonte: Adaptado de (FERNANDES, 2011).

Neste sistema, O AVR realiza o controle da tensão de campo do gerador CC, de modo que a tensão induzida no enrolamento de armadura da excitatriz CC é aplicada no campo do gerador síncrono realizando a regulação do sistema de excitação.

2.4.2 Sistema de Excitação CA

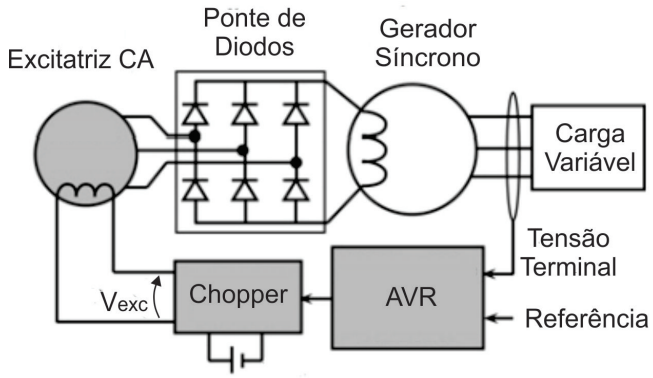
Neste sistema de excitação é utilizada uma excitatriz CA, máquina síncrona de pequeno porte, como máquina auxiliar para fornecer a corrente de campo do gerador síncrono. A excitatriz CA possui seu enrolamento de campo no estator e seu enrolamento de armadura no rotor, estando geralmente acoplada no mesmo eixo do gerador síncrono. Para fornecer corrente contínua no campo do GS a tensão de saída da excitatriz CA é retificada. Isso pode ser realizado através de retificadores controlados (Figura 2.15) ou não controlados (Figura 2.16).

Figura 2.15 – Sistema de excitação CA utilizando ponte de tiristores



Fonte: Adaptado de (CHEN et al., 2016).

Figura 2.16 – Sistema de excitação CA utilizando ponte de diodos



Fonte: Adaptado de (CHEN et al., 2016).

No sistema que utiliza diodos a tensão de saída da excitatriz CA é retificada pela ponte de diodos e então aplicada no rotor (enrolamento de campo principal) do gerador síncrono. O controle da tensão aplicada no circuito de campo do gerador é feito pelo AVR

que através de um *chopper* (conversor CC-CC) varia a corrente de campo da excitatriz CA de forma a manter o sistema regulado (CHEN et al., 2016).

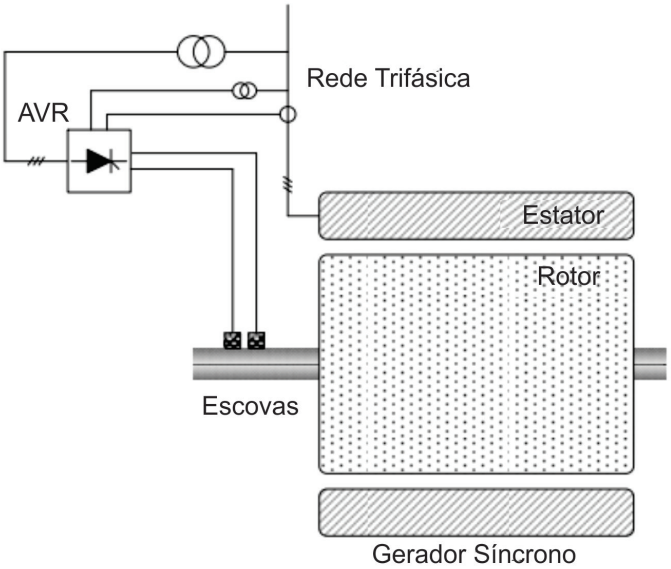
No sistema que utiliza tiristores a mudança na tensão de excitação do gerador é mais rápida, pois o controlador (AVR) atua no ângulo de disparo do tiristor, deste modo, além de retificar a tensão vinda da excitatriz CA, o tiristor também realiza o controle da tensão fornecida ao campo do gerador (CHEN et al., 2016).

O sistema de excitação CA pode ter seu sistema de retificação estático ou rotativo. No sistema estático, a corrente contínua gerada pela excitatriz CA e retificador é fornecida ao campo do GS através de escovas/anéis deslizantes. No sistema rotativo, o retificador é conectado diretamente ao enrolamento de campo do gerador síncrono, eliminando a necessidade de escovas/anéis deslizantes (sistema *brushless*). Isto diminui os custos com manutenção do sistema que na presença de escovas/anéis deslizantes deve ser realizada constantemente (FERNANDES, 2011).

2.4.3 Sistema de Excitação Estático

Este tipo de sistema dispensa a utilização de excitatrizes, a corrente de excitação do gerador síncrono é fornecida diretamente ao campo por retificadores estáticos controlados, sendo necessária a utilização de escovas/anéis deslizantes (Figura 2.17). A alimentação dos retificadores pode ser realizada pelo próprio gerador, através de transformadores abaixadores, ou por barramentos auxiliares presentes no sistema.

Figura 2.17 – Sistema de excitação estático



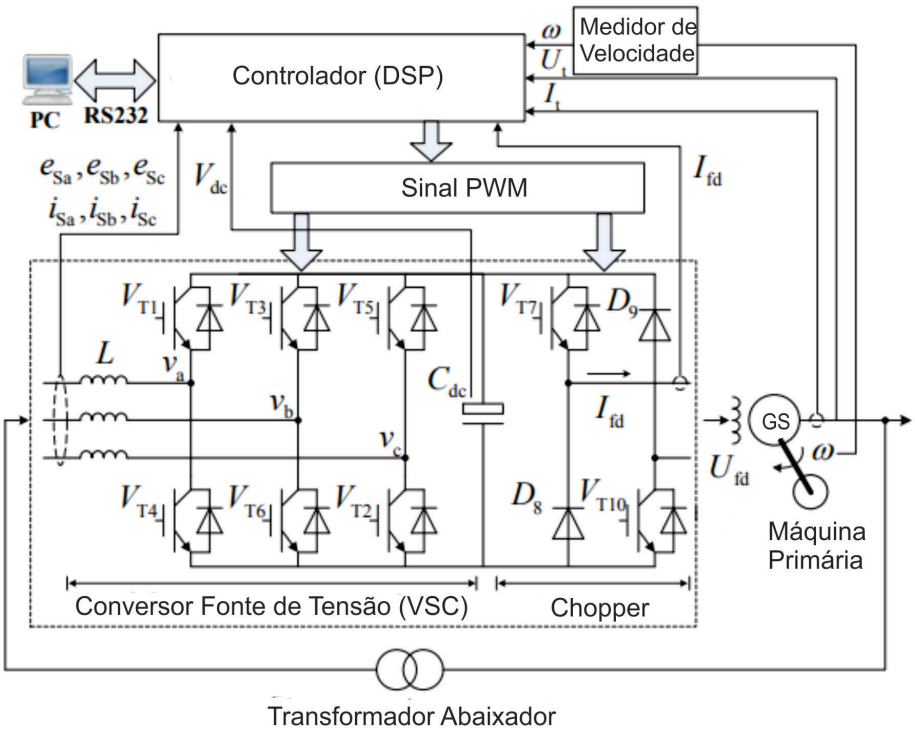
Fonte: Adaptado de (SUH; LIPO, 2017).

Na topologia da Figura 2.17 o retificador recebe uma tensão trifásica alternada de

um transformador abaixador e com o auxílio do AVR, que realiza o controle do ângulo de disparo dos tiristores, gera uma tensão contínua regulada em seus terminais de saída. Essa tensão é aplicada no enrolamento de campo do gerador através das escovas conectadas ao eixo do rotor. Esta topologia possui um rápido tempo de resposta na regulação de tensão, porém devido a presença de escovas/anéis deslizantes é necessária uma manutenção constante (SUH; LIPO, 2017).

Segundo Barakat et al. (2012), um sistema de excitação utilizando um conversor com tiristores apresenta alguns problemas relacionados a qualidade da potência. A topologia sugerida consiste em um conversor fonte de tensão (*Voltage Source Converter* - VSC) com seis IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), um *chopper* meia ponte e um transformador abaixador (Figura 2.18).

Figura 2.18 – Sistema de excitação estático utilizando VSC



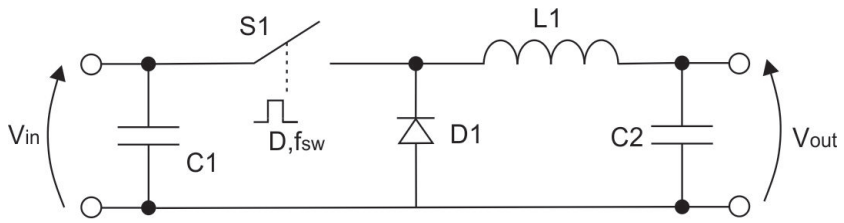
Fonte: Adaptado de (BARAKAT et al., 2012).

O chaveamento dos IGBTs é controlado através do sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) gerado com auxílio computacional em um DSP (*Digital Signal Processor*). Nos terminais de entrada do VSC está conectado o lado de baixa tensão do transformador. Nos terminais de saída do VSC estão conectados os terminais de entrada do chopper e um capacitor. Os terminais de saída do *chopper* irão fornecer a corrente de excitação do rotor (BARAKAT et al., 2012).

De acordo com Sudjoko e Darwito (2017), outra topologia de sistema de excitação que é amplamente empregada na indústria é a utilização de conversores Buck CC-CC. O

conversor Buck converte uma alta tensão CC de entrada (V_{in}) para uma baixa tensão CC de saída (V_{out}) (Figura 2.19).

Figura 2.19 – Circuito elétrico básico de um conversor Buck



Fonte: Adaptado de (SUDJOKO; DARWITO, 2017).

Neste sistema, a tensão de entrada (V_{in}) é proveniente de um barramento auxiliar e pelo chaveamento de uma componente de controle, que pode ser um MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBT, é realizada a regulação da tensão de saída (V_{out}) que será aplicada no enrolamento de campo do GS. Em sistemas de alta potência é mais comum a utilização de IGBTs como componente de chaveamento (SUDJOKO; DARWITO, 2017).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o comportamento do gerador síncrono operando em um sistema de geração isolado, bem como seus aspectos construtivos e métodos de controle utilizados para regular a frequência e tensão de terminal. Foi visto que a frequência é mantida sempre constante, independente da variação de cargas, através de um regulador de velocidade, enquanto que a tensão de terminal é controlada por meio de um sistema de excitação de campo do GS.

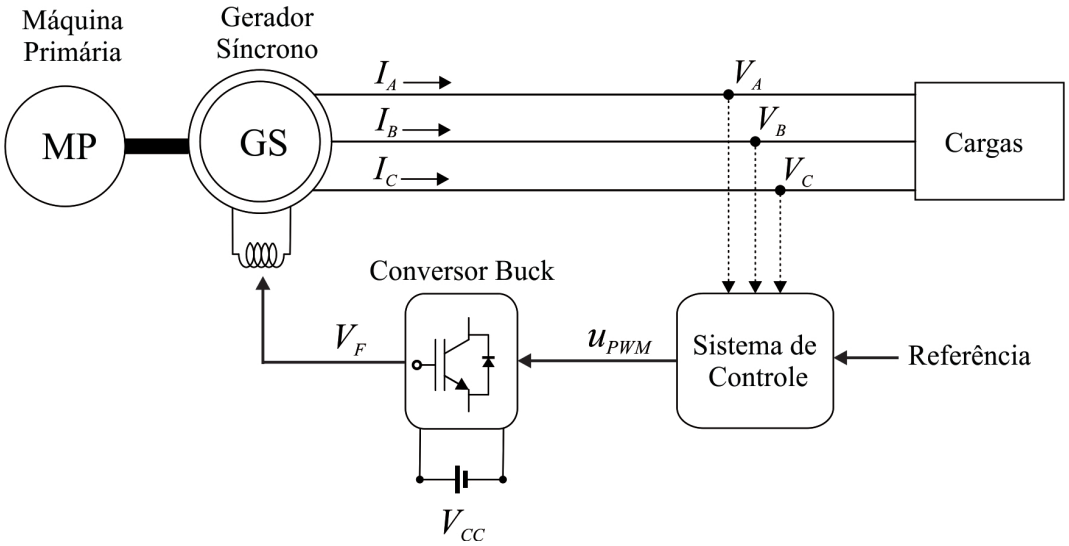
Também foram abordadas as topologias de sistema de excitação encontradas na literatura, podendo ser divididas em três grupos: excitação CC, excitação CA, excitação estática. Os sistemas de excitação CA e CC possuem como principal desvantagem a necessidade de uma máquina auxiliar (excitatriz) para realizar o controle de campo do GS, sendo que o sistema de excitação CC já está praticamente em desuso. Uma vantagem do sistema de excitação CA é a possibilidade de inserir um sistema *brushless*, o que dispensa a utilização de escovas/anéis deslizantes resultando em menores custos com manutenção. O aperfeiçoamento dos materiais semicondutores permitiram um maior emprego de conversores controlados na excitação estática, que embora necessite de escovas para fornecer a corrente de excitação ao GS, possui uma ação mais rápida de controle sobre a regulação da tensão de campo em relação aos outros sistemas.

3 SISTEMA DE GERAÇÃO PROPOSTO

Como apresentado no capítulo anterior, quando o gerador síncrono está operando em um sistema isolado a potência ativa e reativa fornecidas variam em função das cargas conectadas em seus terminais. Esse comportamento provoca um desequilíbrio na amplitude e frequência da tensão gerada fazendo com que o sistema perca sua eficiência, deste modo, é necessário um sistema que mantenha a regulação dessas variáveis.

A regulação da frequência é mantida constante através de um regulador de velocidade acoplado na máquina motriz e a amplitude da tensão é regulada através do controle de um sistema de excitação. Assim a proposta deste trabalho é realizar a regulação da potência ativa e reativa do gerador através do controle de excitação de campo do GS. Esta regulação será efetuada por meio de um sistema de controle e um sistema de excitação estático empregando conversor *buck* CC-CC (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Sistema de Geração Proposto



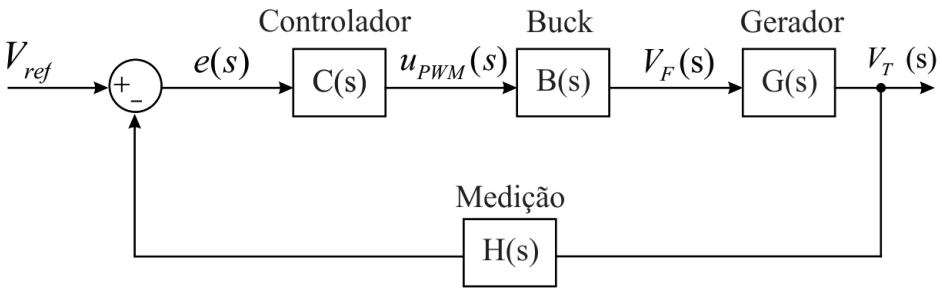
Fonte: Autor.

No sistema proposto a tensão de saída do gerador síncrono é medida e comparada com a tensão de referência pelo sistema de controle. O sistema de controle gera um sinal PWM (u_{PWM}) que é enviado ao conversor para comandar o chaveamento do IGBT. O conversor *buck* possui em sua tensão de entrada uma fonte CC externa (V_{CC}). Através do chaveamento do IGBT realiza-se o controle da tensão de saída do conversor (V_F) que é aplicada no campo do gerador síncrono de forma a manter regulada sua tensão de terminal.

Para projetar o sistema de controle (Figura 3.2) é necessário conhecer o comportamento de cada componente do sistema. Através de uma modelagem matemática se encontra as funções de transferência que representam as características de cada elemento

do sistema considerando sua operação em regime permanente.

Figura 3.2 – Diagrama de Blocos Geral do Sistema de Controle



Fonte: Autor.

3.1 MODELAGEM DO GERADOR SÍNCRONO

A modelagem do gerador síncrono foi realizada analisando sua operação em regime permanente, dessa forma, considera-se o circuito equivalente do GS mostrado anteriormente na Figura 2.5.

Como a tensão interna gerada no estator depende da variação da corrente que percorre o indutor no campo, pode-se afirmar que:

$$E_A = L_F \frac{dI_F}{dt} \tag{3.1}$$

Pode-se escrever a queda de tensão no indutor do estator (V_{L_A}) em função da variação da corrente de armadura, tendo-se:

$$V_{L_A} = jX_S I_A = L_A \frac{dI_A}{dt} \tag{3.2}$$

Substituindo as Equações 3.1 e 3.2 na Equação 2.3 e considerando a tensão de fase como a tensão de terminal do gerador (V_ϕ=V_T), obtém-se:

$$L_F \frac{dI_F}{dt} = V_T + L_A \frac{dI_A}{dt} + R_A I_A \tag{3.3}$$

Aplicando a Transformada de Laplace na Equação 3.3 tem-se:

$$L_F s I_F(s) = V_T(s) + L_A s I_A(s) + R_A I_A(s) \tag{3.4}$$

Como a corrente de campo depende da tensão aplicada no enrolamento do rotor e a corrente de armadura depende da carga (Z_L) aplicada nos terminais do GS, estas podem ser representadas, respectivamente, por:

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \tag{3.5}$$

$$I_A = \frac{V_T}{Z_L} \tag{3.6}$$

Substituindo as Equações 3.5 e 3.6 na Equação 3.4, obtém-se:

$$L_F s \frac{V_F}{R_F}(s) = V_T(s) + L_A s \frac{V_T}{Z_L}(s) + R_A \frac{V_T}{Z_L}(s) \tag{3.7}$$

Desenvolvendo a Equação 3.7 se obtém a função de transferência do gerador síncrono que relaciona a tensão de saída (V_T) com a tensão de campo (V_F). Como pode ser visto na Equação 3.8.

$$G(s) = \frac{V_T(s)}{V_F(s)} = \frac{\dfrac{L_F Z_L}{R_F L_A} s}{s + \dfrac{(R_A + Z_L)}{L_A}} \tag{3.8}$$

Devido à algumas limitações técnicas não foi possível realizar ensaios para obter os valores reais dos parâmetros do GS. Assim os parâmetros do gerador síncrono (Tabela 3.1) foram obtidos através da adaptação de modelos presentes no *software* MATLAB/Simulink, ambiente no qual se realizou as simulações.

Tabela 3.1 – Parâmetros do Gerador Síncrono

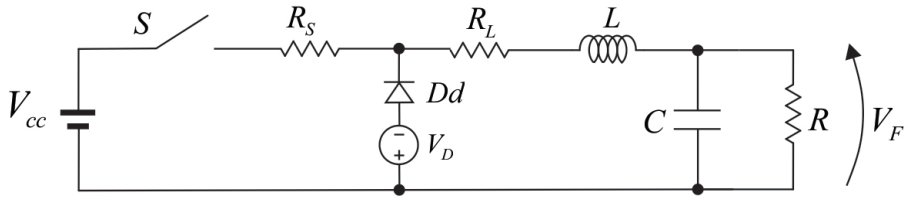
Parâmetro	**Valor**
Potência Nominal	5 kVA
Tensão de Terminal (rms)	380 V
Frequência	60 Hz
Resistência de Campo	6,83 Ω
Indutância de Campo	22 mH
Resistência de Armadura	4,07 Ω
Indutância de Armadura	9.41 mH
Carga	28,88 Ω

Fonte: Autor.

3.2 MODELAGEM DO CONVERSOR *BUCK*

Para a modelagem do conversor *buck* será considerada uma carga resistiva em seus terminais de saída que equivale à resistência de campo do GS. Segundo Barbi (2015), na prática existem algumas perdas relativas aos componentes do circuito como resistência da chave (R_S), queda de tensão do diodo (V_D) e resistência do indutor (R_L), ilustradas na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Conversor Buck com Componentes Não Ideais



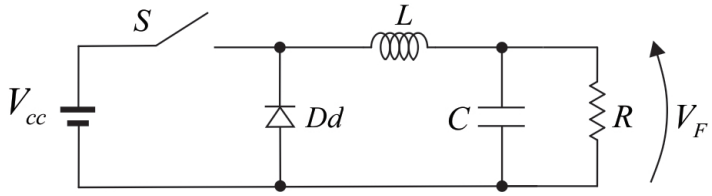
Fonte: Adaptado de (BARBI, 2015).

Assim para a modelagem do *buck* serão realizadas as seguintes considerações:

- Todos os componentes que integram o conversor são ideais (sem perdas);
- É realizada a análise das etapas de operação considerando valores médios de corrente e tensão nos componentes do conversor;
- O conversor opera em modo de condução contínua (CCM), há sempre um valor maior que zero na corrente do indutor;
- Frequência de chaveamento constante.

Dessa forma, o circuito equivalente para o modelagem é mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Conversor Buck Ideal



Fonte: Adaptado de (BARBI, 2015).

O período total do ciclo da chave (intervalo de comutação) pode ser escrito como

$$T = t_{on} + t_{off} \tag{3.9}$$

Onde:
T = Intervalo de comutação da chave,
t_{on} = Intervalo de condução da chave,
t_{off} = Intervalo de interrupção da chave.

A razão entre o intervalo de condução e o intervalo de comutação é chamada de razão cíclica (D), como mostrado na Equação 3.10.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \tag{3.10}$$

A partir da razão cíclica, pode-se determinar o tempo em que a chave permanece aberta e fechada. Isto pode ser visto nas Equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$t_{off} = T(1 - D) \tag{3.11}$$

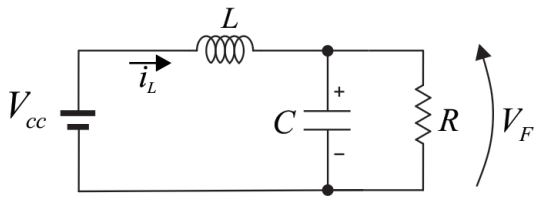
$$t_{on} = DT \tag{3.12}$$

Para a modelagem do conversor são encontradas equações para cada uma das etapas de operação, ou seja, com a chave aberta e fechada.

3.2.1 Primeira Etapa de Operação

O circuito da Figura 3.5 ilustra a primeira etapa de operação, na qual a chave está fechada.

Figura 3.5 – Estado Topológico do Buck para a Chave Fechada



Fonte: Adaptado de (BARBI, 2015).

Aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff, este circuito pode ser representado pelas seguintes equações:

$$L\frac{di_L}{dt} = V_{cc} - V_c \tag{3.13}$$

$$C\frac{dV_c}{dt} = i_L - \frac{V_c}{R} \tag{3.14}$$

Onde:

i_L = Corrente no indutor,

V_c = Tensão no capacitor.

A representação matricial das Equações 3.13 e 3.14 é dada por:

$$\begin{bmatrix} L\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ C\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\dfrac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V_{cc} \tag{3.15}$$

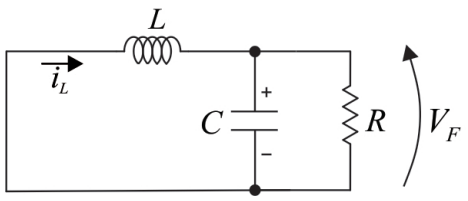
Multiplicando todos os termos da Equação 3.15 por D obtém-se:

$$\begin{bmatrix} DL\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ DC\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -D \\ D & -\dfrac{D}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} V_{cc} \tag{3.16}$$

3.2.2 Segunda Etapa de Operação

O circuito da Figura 3.6 ilustra a segunda etapa de operação, na qual a chave está aberta.

Figura 3.6 – Estado Topológico do Buck para a Chave Aberta



Fonte: Adaptado de (BARBI, 2015).

A segunda etapa de operação é representada pelas seguintes equações:

$$L\frac{di_L}{dt} = -V_c \tag{3.17}$$

$$C\frac{dV_c}{dt} = i_L - \frac{V_c}{R} \tag{3.18}$$

As Equações 3.17 e 3.18 podem ser representadas na forma matricial por:

$$\begin{bmatrix} L\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ C\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\dfrac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Multiplicando todos os termos da Equação 3.19 por (1-D) obtém-se:

$$\begin{bmatrix} (1-D)L\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ (1-D)C\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-D) \\ (1-D) & -\dfrac{(1-D)}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

3.2.3 Equação Média das Etapas

Como,

$$\begin{bmatrix} L\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ C\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DL\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ DC\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1-D)L\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ (1-D)C\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Para encontrar uma equação que relacione as duas etapas de operação soma-se as Equações 3.16 e 3.20, obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} L\dfrac{di_L}{dt} \\ \\ C\dfrac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\dfrac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} V_{cc} \tag{3.22}$$

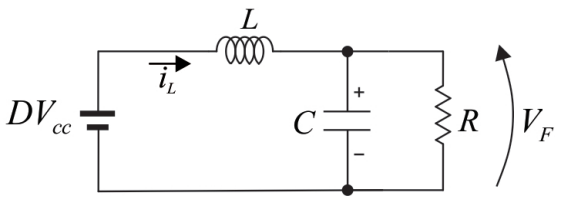
Esta forma matricial pode ser representada por duas equações de primeira ordem, ou seja:

$$L\frac{di_L}{dt} = -V_c + DV_{cc} \tag{3.23}$$

$$C\frac{dV_c}{dt} = i_L - \frac{V_c}{R} \tag{3.24}$$

As Equações 3.23 e 3.24 representam o circuito médio considerado para o conversor *buck* (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Circuito Médio Equivalente do Buck



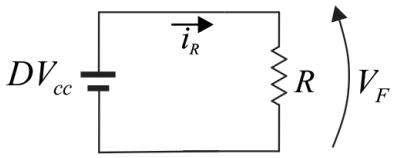
Fonte: Adaptado de (BARBI, 2015).

Como em regime permanente $\frac{di_L}{dt} = 0$ e $\frac{dV_c}{dt} = 0$, as Equações 3.23 e 3.24 podem ser reescritas, como mostrado nas Equações 3.25 e 3.26, respectivamente. Representando o circuito equivalente para operação em regime permanente (Figura 3.8).

$$V_c = DV_{cc} \tag{3.25}$$

$$i_L = \frac{V_c}{R} \tag{3.26}$$

Figura 3.8 – Circuito Equivalente do Buck em Regime Permanente



Fonte: Adaptado de (BARBI, 2015).

Com base no circuito da Figura 3.8 obtém-se as seguintes equações:

$$i_R = \frac{DV_{cc}}{R} \tag{3.27}$$

$$V_F = i_R R \tag{3.28}$$

Substituindo a Equação 3.27 na 3.28, encontra-se a razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada que é o ganho estático do conversor *buck*, sendo neste caso dado pela razão cíclica (Equação 3.29).

$$A_v = \frac{V_F}{V_{cc}} = D \tag{3.29}$$

Analisando a Equação 3.29 pode-se concluir que é possível controlar a tensão de saída do *buck* através da alteração de sua razão cíclica. Assim busca-se encontrar uma função de transferência que relacione a tensão de saída (V_F) pela razão cíclica (D) do conversor.

3.2.4 Função de Transferência

Segundo Barbi (2015), as etapas 1 e 2 de operação podem ser representadas pelas Equações 3.30 e 3.31 respectivamente.

$$\dot{X} = A_1 X + B_1 U \tag{3.30}$$

$$\dot{X} = A_2 X + B_2 U \tag{3.31}$$

Somando-se as Equações 3.30 e 3.31 obtém-se:

$$\dot{X} = [A_1 D + A_2(1-D)]\, X + [B_1 D + B_2(1-D)]\, U \tag{3.32}$$

Para modelar o conversor em torno de um ponto de operação deve-se considerar as seguintes definições:

$$x = X + \bar{x} \tag{3.33}$$

$$d = D + \bar{d} \tag{3.34}$$

Onde:
X = vetor de estados para um ponto de operação,
D = razão cíclica para um ponto de operação,
$\bar{x}$ = pequenas variações do vetor de estado para este ponto de operação,
$\bar{d}$ = pequenas variações da razão cíclica para este ponto de operação.

Assim:

$$\dot{x} = \dot{X} + \dot{\bar{x}} \tag{3.35}$$

Substituindo as Equações 3.33, 3.34 e 3.35 na Equação 3.32, obtém-se:

$$\dot{X} + \dot{\bar{x}} = \left[A_1(D+\bar{d}) + A_2(1-D-\bar{d})\right](X+\bar{x}) + \left[B_1(D+\bar{d}) + B_2(1-D-\bar{d})\right] U \tag{3.36}$$

Pode-se desenvolver separadamente cada termo da Equação 3.36, resultando em:

$$P_1 = [A_1 D + A_2(1-D)]\, X + (A_1 - A_2)\bar{d} X + [A_1 D + A_2(1-D)]\, \bar{x} + (A_1 - A_2)\bar{d}\,\bar{x} \tag{3.37}$$

$$P_2 = [B_1 D + B_2(1-D)]\, U + \left[B_1 \bar{d} - B_2 \bar{d}\right] U \tag{3.38}$$

Como em regime permanente $\dot{X} = 0$, os termos que não possuem variações podem ser eliminados, ou seja:

$$\dot{X} = [A_1 D + A_2.(1-D)]\, X + [B_1 D + B_2(1-D)]\, U = 0 \tag{3.39}$$

Considerando $(A_1 - A_2)\bar{d}\,\bar{x} \approx 0$, e combinando as Equações 3.37, 3.38 e 3.39 obtém-

se:

$$\dot{\bar{x}} = [A_1 D + A_2(1-D)]\,\bar{x} + (A_1 - A_2)\bar{d}X + [B_1 - B_2]\,U\bar{d} \tag{3.40}$$

A Equação 3.40 descreve o comportamento do conversor *buck* para pequenas variações em torno do ponto de operação definido por X e D.

Isolando os termos $\frac{di_L}{dt}$ e $\frac{dV_c}{dt}$ das Equações 3.15 e 3.19, obtém-se respectivamente:

$$\begin{bmatrix} \dot{i_L} \\ \dot{V_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{cc} \tag{3.41}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i_L} \\ \dot{V_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

Analisando as Equações 3.41 e 3.42, pode-se concluir que $\mathbf{A_1} = \mathbf{A_2}$ e $\mathbf{B_2} = 0$, dessa forma a Equação 3.40 pode ser escrita como:

$$\dot{\bar{x}} = A_1\bar{x} + B_1 U\bar{d} \tag{3.43}$$

Aplicando a transformada de Laplace na Equação 3.43 tem-se:

$$Is\bar{x}(s) = A_1\bar{x}(s) + B_1 U\bar{d}(s) \tag{3.44}$$

Onde **I** é a matriz identidade, sendo assim:

$$\bar{x}(s) = [sI - A_1]^{-1} B_1 U\bar{d}(s) \tag{3.45}$$

Em que:

$$[sI - A_1] = \begin{bmatrix} s & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s + \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

$$B_1 U\bar{d}(s) = \begin{bmatrix} \frac{\bar{d}(s)}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{cc} \tag{3.47}$$

Substituindo as Equações 3.46 e 3.47 na Equação 3.45 e desenvolvendo os termos,

obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_L \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \begin{bmatrix} \left(s + \frac{1}{RC}\right)\frac{\bar{d}(s)}{L} \\ \\ \frac{\bar{d}(s)}{LC} \end{bmatrix} V_{cc} \tag{3.48}$$

Com base na Equação 3.48 é possível encontrar a função de transferência que relaciona a tensão de saída (V_c) pela razão cíclica (D) em torno de um ponto de operação (Equação 3.49).

$$B(s) = \frac{\bar{V}_c(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{\frac{V_{cc}}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \tag{3.49}$$

Os valores dos elementos da função de transferência do conversor estão relacionados com os parâmetros do gerador síncrono, de forma que o projeto do *buck* deve ser feito considerando as características e exigências do GS.

3.2.5 Projeto do Conversor Buck

Como o conversor irá fornecer a tensão de excitação para o gerador síncrono, são considerados os parâmetros do circuito de campo do GS para o projeto do *buck*. Assim serão consideradas a tensão de excitação (V_F) do GS como tensão de saída do conversor e a resistência de campo (R_F) do GS como a carga resistiva conectada nos terminais de saída do *buck*.

Dessa forma, baseando-se nos parâmetros do gerador, pode-se calcular a potência (P_o) e a corrente (I_o) que serão entregues pelo conversor:

$$P_o = \frac{V_F^2}{R_F} \tag{3.50}$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_F} \tag{3.51}$$

Vale ressaltar que a tensão de campo (V_F) considerada é baseada em um valor que mantém a tensão de saída (V_T) do GS regulada para carga nominal conectada em seus terminais. A Tabela 3.2 mostra as grandezas consideradas para projetar os elementos do conversor.

Tabela 3.2 – Parâmetros para o Desenvolvimento do Conversor Buck

Parâmetro	**Valor**
Potência Nominal (P_o)	937.04 W
Tensão de Entrada (V_{cc})	660 V
Tensão de Saída (V_F)	80 V
Ripple da Tensão de Saída (ΔV_F)	800 mV
Corrente de Saída (I_o)	11.71 A
Ripple da Corrente do Indutor (ΔI_L)	117.1 mA
Carga (R_F)	6,83 Ω
Frequência de Comutação (f_{PWM})	25 kHz

Fonte: Autor.

Baseado na Equação 3.29 calculou-se a razão cíclica do sistema e substituiu-se esse valor nas Equações 3.52 e 3.53 para encontrar os valores de indutância e capacitância do conversor,respectivamente (RODRIGUES, 2007).

$$L = \frac{(1-D)V_F}{\Delta I_o f_{PWM}} \tag{3.52}$$

$$C = \frac{(1-D)V_F}{8L\Delta V_F {f_{PWM}}^2} \tag{3.53}$$

Substituindo os parâmetros da Tabela 3.2 nas Equações 3.52 e 3.53, obtém-se os valores projetados do conversor (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Parâmetros Projetados para o Conversor Buck

Parâmetro	**Valor**
Razão Cíclica (D)	0.1212
Indutor (L)	24 mH
Capacitor (C)	73,21 μF

Fonte: Autor.

Agora que se têm as funções de transferência do gerador e do *buck* com todos os seus parâmetros definidos, é possível projetar o sistema de controle que mantém a regulação da tensão de terminal do gerador.

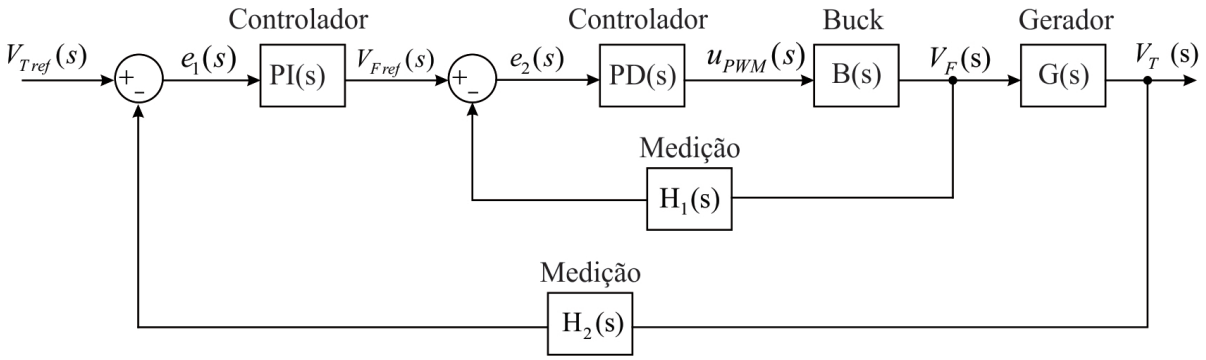
3.3 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

Atualmente, os controladores Proporcional-Integral (PI) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID) são os mais empregados para o controle de excitação de geradores sín-

cronos. Esses controladores são mais utilizados devido à sua maior simplicidade de implementação e sintonização de seus parâmetros que alteram a dinâmica do sistema de acordo com as características desejadas (NEVES, 2013).

No sistema proposto a tensão de terminal do gerador é medida e comparada com uma tensão de referência gerando um sinal para o conversor *buck* alterar a tensão de campo. Como existe toda a dinâmica de funcionamento do *buck* entre chaveamento e entrega da tensão saída desejada, este deve possuir um tempo de resposta mais rápido que o gerador. Deste modo, o sistema empregado possui duas malhas de controle (Figura 3.9). A malha externa controla a tensão de terminal do GS através de um PI e a malha interna utiliza um controlador Proporcional-Derivativo (PD) para regular a tensão de campo fornecida pelo conversor.

Figura 3.9 – Diagrama de Blocos do Sistema de Controle Empregado



Fonte: Autor.

No sistema da Figura 3.9 a tensão de saída do GS é medida e comparada com a referência (V_{Tref}) enviando um sinal de erro (e_1) para o controlador PI. O controlador PI gera um sinal de referência para a tensão de campo (V_{Fref}) que o *buck* deve fornecer ao gerador. A tensão de saída do *buck* é comparada com esse sinal de referência e enviada ao controlador PD que através de um sinal PWM irá atuar no chaveamento do conversor.

A escolha desses controladores se deu ao fato de suas características. O PI é utilizado na malha externa pela sua capacidade de convergir para a referência, zerando o erro em regime permanente. Já o PD foi utilizado na malha interna pela sua capacidade de tornar a resposta do sistema mais rápida que é o desejado para a dinâmica do conversor *buck*. Como citado, o tempo de resposta do conversor deve ser mais rápido que o do gerador, assim no projeto considerou-se a malha de controle do GS operando uma década abaixo da frequência de operação da malha de controle do *buck*, ou seja, dez vezes mais lenta.

3.3.1 Projeto do Controlador PD

O projeto do controlador PD é realizado considerando a malha interna do sistema, buscando controlar a tensão de saída (V_F) do conversor em função de um sinal de referência (V_{Fref}). Assim nesta malha são consideradas as funções de transferência do controlador PD ($C_{PD}(s)$), do conversor *buck* (B(s)) e medição do sinal da tensão de campo ($H_1(s)$). A Equação 3.54 mostra a função transferência correspondente à malha interna fechada.

$$T_{MI}(s) = \frac{C_{PD}(s)B(s)H_1(s)}{1 + C_{PD}(s)B(s)H_1(s)} \tag{3.54}$$

A função de transferência do controlador PD pode ser escrita como:

$$C_{PD}(s) = K_p + K_d s \tag{3.55}$$

Onde:
K_p = ganho proporcional,
K_d = ganho derivativo.

Considerando $H_1(s) = 1$ e desenvolvendo a Equação 3.54 obtém-se:

$$T_{MI}(s) = \frac{K_p \dfrac{V_{cc}}{LC} + K_d \dfrac{V_{cc}}{LC} s}{s^2 + \left(\dfrac{1}{R_F C} + K_d \dfrac{V_{cc}}{LC}\right) s + \left(\dfrac{1}{LC} + K_p \dfrac{V_{cc}}{LC}\right)} \tag{3.56}$$

Deve-se calcular os ganhos proporcional e derivativo do controlador para que o conversor atenda as especificações de projeto. Como a frequência de chaveamento do conversor é de 25 kHz, optou-se por utilizar como frequência de corte para a malha interna uma frequência de mínimo uma década abaixo desta frequência de chaveamento, ou seja, menor que 2,5 kHz. Dessa forma, a frequência utilizada para o projeto é mostrada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros para Projeto do Controlador PD

Parâmetro	**Valor**
Coeficiente de Amortecimento (ξ)	0.8
Frequência Natural de Oscilação (ω_n)	1,4324 kHz

Fonte: Autor.

Um sistema de segunda ordem pode ser representado de uma forma generalizada como mostra a Equação 3.57.

$$T_{EC}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{3.57}$$

Igualando os denominadores das Equações 3.56 e 3.57 se encontra uma relação

para calcular os ganhos do controlador PD de modo que a planta siga o comportamento esperado (Equações 3.58 e 3.59).

$$K_d = \frac{2\xi\omega_n - \frac{1}{R_F C}}{\frac{V_{cc}}{LC}} \tag{3.58}$$

$$K_p = \frac{\omega_n^2 - \frac{1}{LC}}{\frac{V_{cc}}{LC}} \tag{3.59}$$

Com base nas Equações 3.58 e 3.59 foram calculados os ganhos proporcional e derivativo do controlador PD como pode ser visto na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Ganhos do Controlador PD

Parâmetro	**Valor**
K_p	0,2135
K_d	$3,2901 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Autor.

Como sua frequência de operação é uma década acima, todo esse sistema de controle da malha interna pode ser simplificado como uma função de transferência de valor unitário para o projeto de controle da malha externa.

3.3.2 Projeto do Controlador PI

O projeto do controlador PI é realizado considerando a malha externa do sistema, buscando controlar a tensão de terminal (V_T) do gerador em função de um sinal de referência (V_{Tref}). Assim nesta malha são consideradas as funções de transferência do controlador PI ($C_{PI}(s)$), do sistema da malha interna ($T_{MI}(s)$), do gerador síncrono (G(s)) e medição do sinal da tensão de saída do gerador ($H_2(s)$). A Equação 3.60 mostra a função transferência correspondente à malha externa fechada.

$$T_{ME}(s) = \frac{C_{PI}(s)T_{MI}(s)G(s)H_2(s)}{1 + C_{PI}(s)T_{MI}(s)G(s)H_2(s)} \tag{3.60}$$

A função de transferência do controlador PI pode ser escrita como:

$$C_{PI}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \tag{3.61}$$

Onde:
K_p = ganho proporcional,
K_i = ganho integral.

Considerando $H_2(s) = 1$ e $T_{MI}(s) = 1$, desenvolve-se a Equação 3.60 de forma a obter:

$$T_{ME}(s) = \frac{\dfrac{L_F Z_L}{R_F L_A + K_p L_F Z_L}(K_p s + K_i)}{s + \dfrac{R_F(R_A + Z_L) + K_i L_F Z_L}{R_F L_A + K_p L_F Z_L}} \tag{3.62}$$

O polo do denominador da Equação 3.62 define a velocidade que o sistema do gerador opera. Como este deve operar em uma frequência dez vezes menor que o conversor, no máximo 143,24 Hz, varia-se os ganhos do controlador PI de modo a manter a dinâmica do GS na frequência desejada. A frequência de operação projetada para a malha de controle do gerador é 127,32 Hz. Assim através do polo da Equação 3.62 calcula-se os ganhos para essa frequência (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 – Ganhos do Controlador PI

Parâmetro	**Valor**
K_p	0,35
K_i	6,7140

Fonte: Autor.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

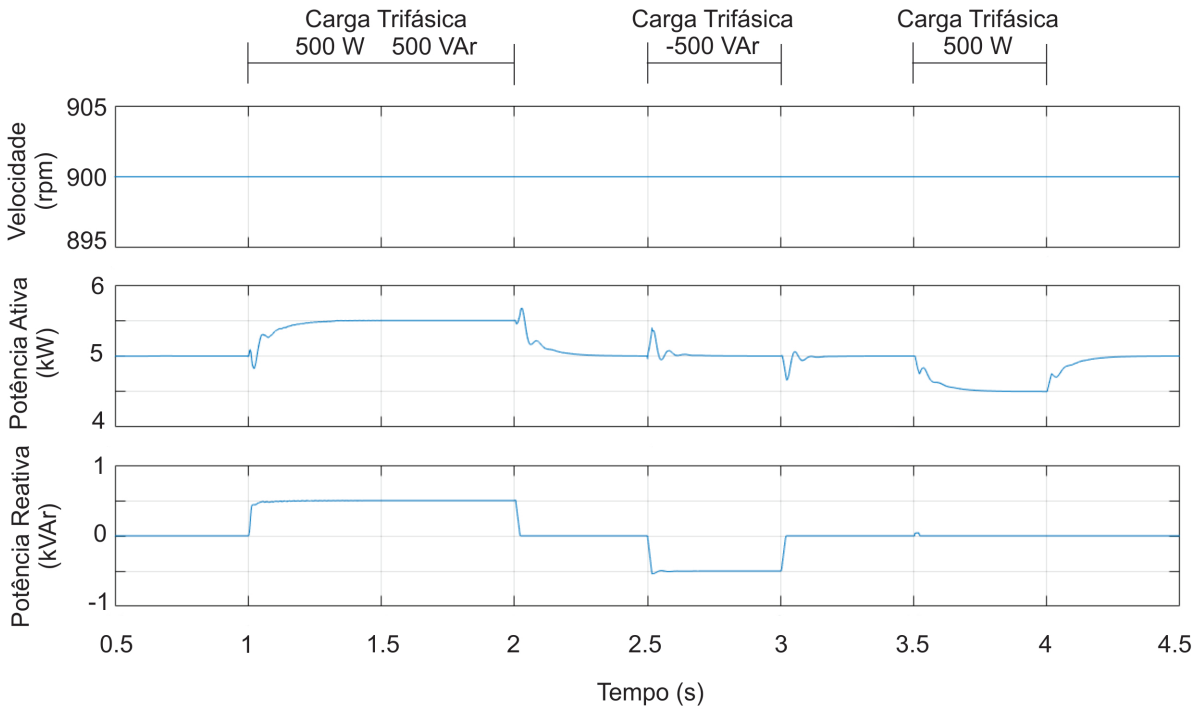
Neste capítulo foi abordado o sistema de geração proposto analisando cada um de seus elementos e sua atuação no sistema. Foi apresentada a modelagem do gerador síncrono e do conversor *buck* obtendo as funções de transferência que regem seu comportamento em regime permanente. Também realizou-se o projeto do conversor *buck* e do sistema de controle empregado que utiliza duas malhas, interna e externa, com controladores PD e PI, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No capítulo anterior foi apresentado o funcionamento e equacionamento do sistema de geração proposto. Este sistema foi simulado no *software* Matlab através da ferramenta Simulink (Anexo A.1), na qual se analisou sua resposta para variação de cargas. O gerador síncrono foi simulado operando em sua potência nominal de 5 kW, de forma que a variação das cargas foi realizada em torno dessa potência. Considerou-se na análise uma variação de cargas de 10% e 50% da potência nominal do GS.

O gerador foi simulado em um período total de 0 a 4,5 segundos com uma velocidade constante de 900 rpm, gerando uma frequência de 60 Hz nos terminais de saída do GS, e fornecendo sua potência nominal (5 kW). No período de 1 a 2 segundos são conectadas uma carga resistiva de 500 W e uma carga indutiva de 500 VAr. No instante de 2,5 segundos é adicionada uma carga capacitiva de -500 VAr e retirada no instante de 3 segundos. Uma carga resistiva de 500 W é retirada no período de 3,5 a 4 segundos. Essa variação de cargas do sistema e as potências ativa e reativa entregues pelo gerador podem ser vistas na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Potências Fornecidas pelo GS com Variação de 10% da Carga Nominal

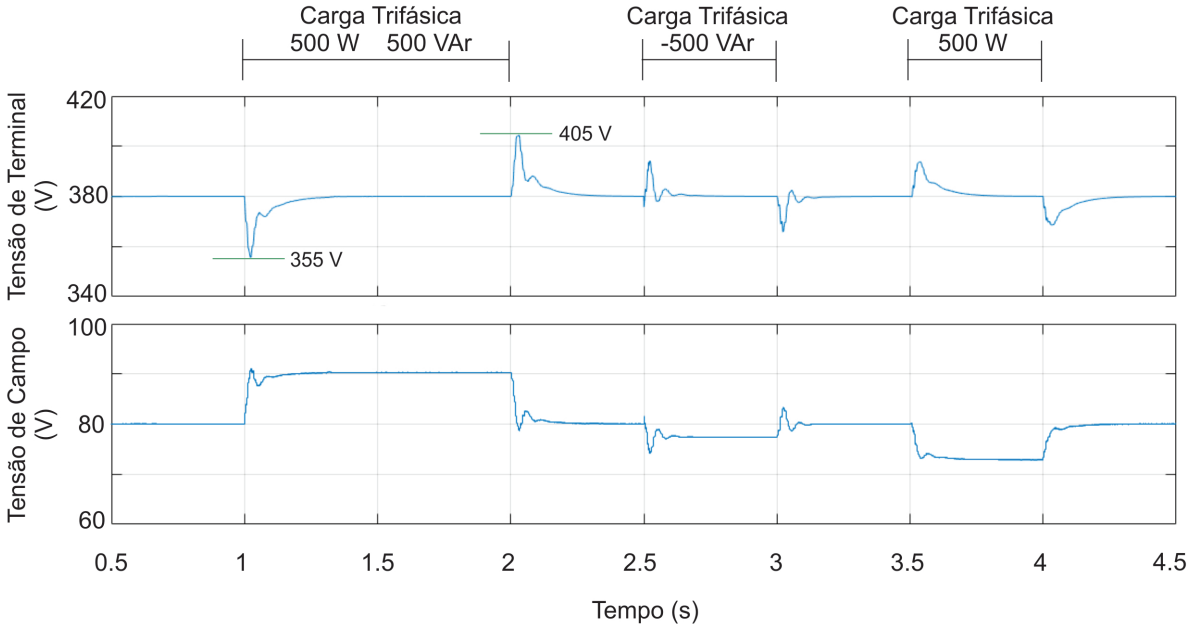


Fonte: Autor.

A tensão de terminal do gerador síncrono deve permanecer no valor nominal do sistema, ou seja, tensão de linha de 380 V_{rms}. O valor da tensão de terminal varia de acordo com o tipo de carga conectada ao sistema, ocorrendo um afundamento de tensão

para cargas resistivas e indutivas e uma sobretensão para cargas capacitivas. Assim varia-se a tensão de campo do GS conforme a variação de cargas de modo a manter regulada a tensão de saída (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Tensões do GS com Variação de 10% da Carga Nominal



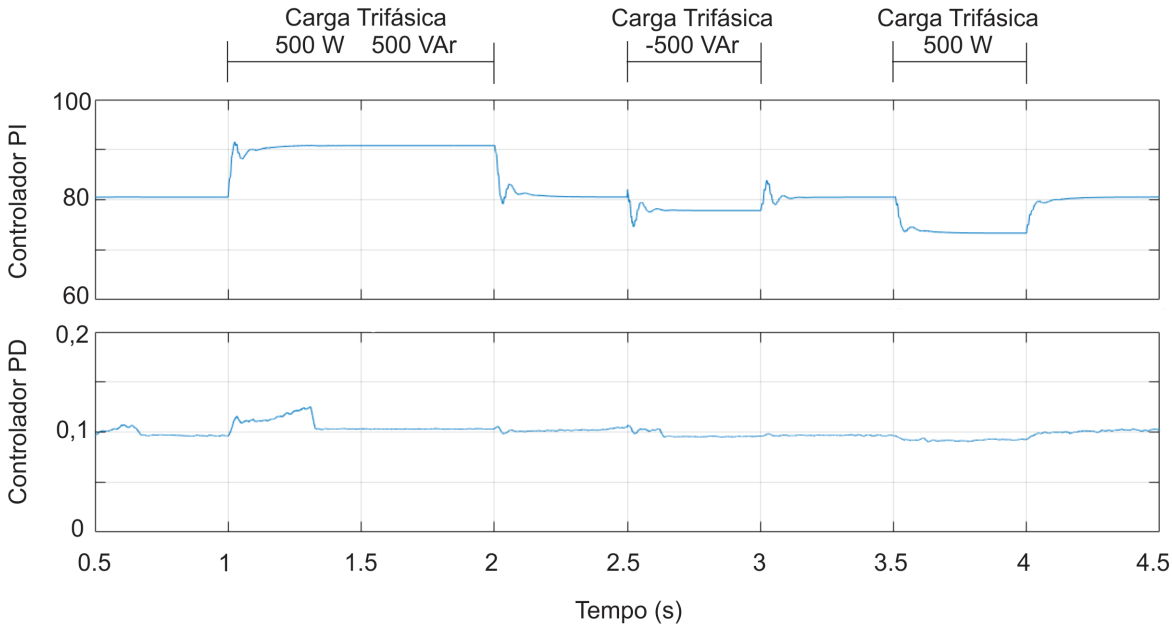
Fonte: Autor.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2018b) a variação admitida para a tensão é de 0,9 a 1,1 pu da tensão nominal do sistema, como neste caso a tensão de operação é de 380 V, a variação de tensão deve permanecer entre os valores de 342 V e 418 V. Como é mostrado na Figura 4.2, a variação máxima de tensão para 10% da carga nominal se encontra entre os valores de 355 V e 405 V, permanecendo dentro dos limites da norma.

A tensão de saída do gerador síncrono é medida e comparada com a tensão de referência (380 V), a diferença entre elas é utilizada pelo controlador PI para gerar a tensão de campo que o conversor *buck* deve fornecer. Através da diferença dessa tensão com a tensão de saída do *buck*, o controlador PD produz um sinal que é comparado com uma onda portadora para gerar o sinal PWM que regula a tensão de saída do conversor. Os sinais de controle gerados pelo PI e PD podem ser visualizados na Figura 4.3.

Como pode ser visto na Figura 4.3, o sinal de controle do PI é exatamente o valor aplicado no campo do gerador pelo conversor *buck*. Também pode-se notar que o sinal do controlador PD se mantém em torno de 0,1 que é a razão cíclica projetada.

Figura 4.3 – Sinais de Controle com Variação de 10% da Carga Nominal



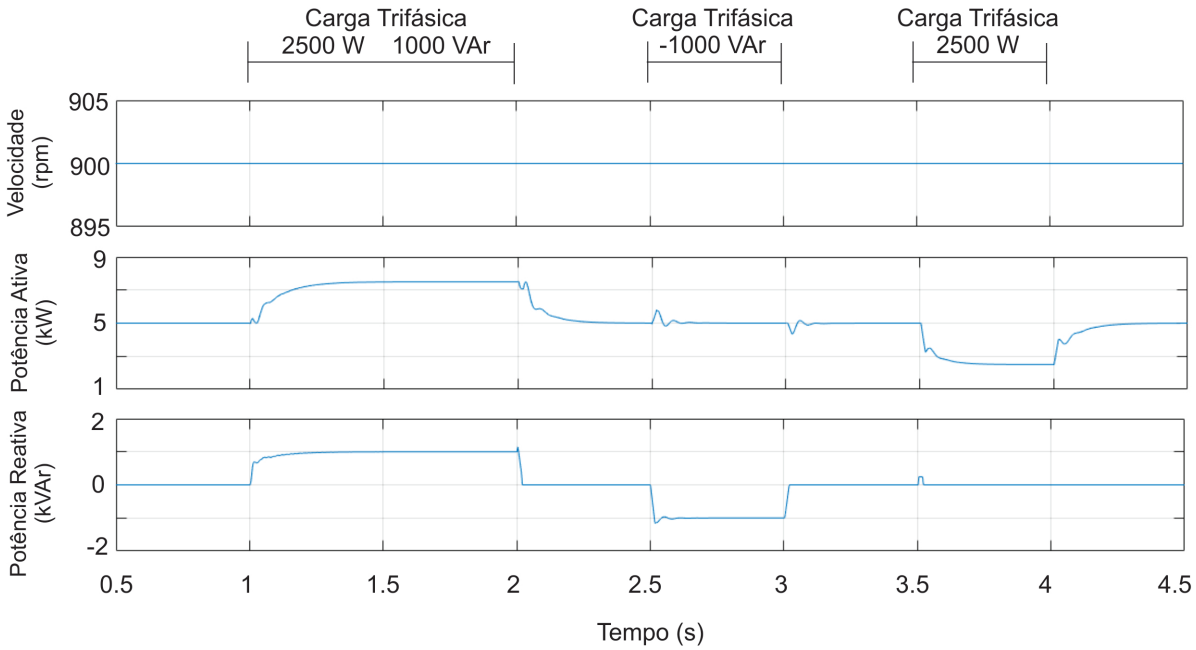
Fonte: Autor.

Novamente o gerador é simulado no tempo total de 0 a 4,5 segundos com mesma velocidade (900 rpm) e fornecendo mesma potência nominal (5 kW), porém agora é submetido a uma variação de cargas mais elevada. No período de 1 a 2 segundos são conectadas uma carga resistiva de 2500 W e uma carga indutiva de 1000 VAr. No instante de 2,5 segundos é adicionada uma carga capacitiva de -1000 VAr e retirada no instante de 3 segundos. Uma carga resistiva de 2500 W é retirada no período de 3,5 a 4 segundos. Essa variação de cargas do sistema e as potências ativa e reativa entregues pelo gerador podem ser vistas na Figura 4.4.

Devido a essa maior variação de cargas, a amplitude dos picos de tensão se tornam mais elevados, chegando a valores máximo e mínimo de 466 V e 309 V, respectivamente. Através da Figura 4.5, pode-se notar também uma variação maior na tensão de campo que deve ser aplicada no GS para suprir esta conexão e desconexão de cargas. Percebe-se que estes valores não se encontram dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma (342 V - 418 V), demonstrando que o sistema projetado não possui um bom desempenho para grandes variações de carga. Isso ocorre pelo fato deste regime transitório não ser considerado na modelagem do gerador síncrono.

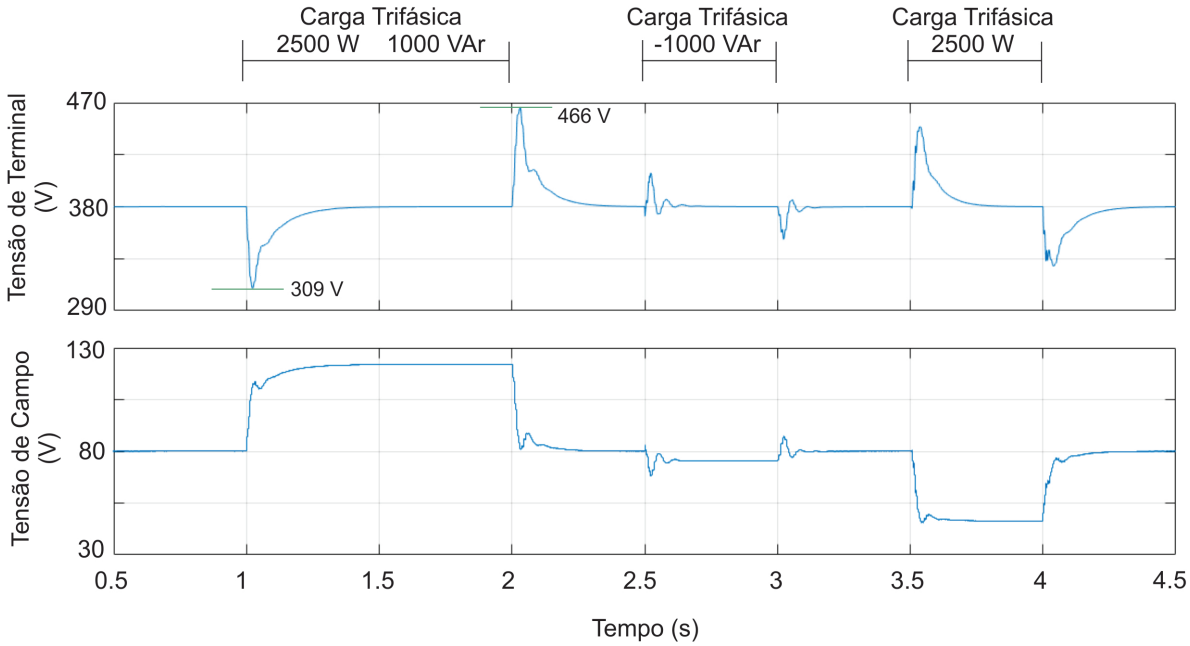
Como citado anteriormente, a ação de controle do PI terá a mesma resposta que a tensão aplicada no campo do gerador, já que o sinal do controlador é a referência desta tensão de campo. E analisando o controlador PD, percebe-se que a variação de seu sinal é maior para esta configuração de cargas (Figura 4.6).

Figura 4.4 – Potências Fornecidas pelo GS com Variação de 50% da Carga Nominal



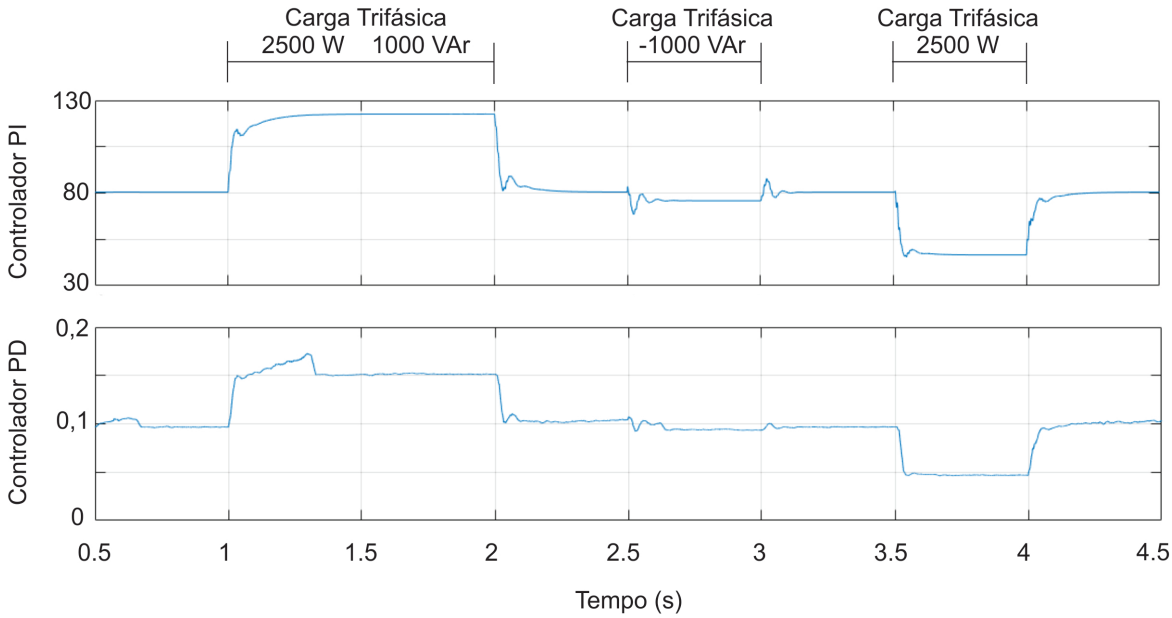
Fonte: Autor.

Figura 4.5 – Tensões do GS com Variação de 50% da Carga Nominal



Fonte: Autor.

Figura 4.6 – Sinais de Controle com Variação de 50% da Carga Nominal



Fonte: Autor.

4.1 CONCLUSÕES GERAIS

Neste capítulo foi analisada a resposta do sistema de geração projetado frente a conexão com diferentes tipos de cargas, sendo estas resistivas, capacitivas e indutivas. Também considerou-se a operação do gerador sobre-excitado e sub-excitado, e observou-se o desempenho do sistema de controle para a regulação da tensão de terminal do gerador síncrono perante as mudanças de carga.

5 CONCLUSÃO

O gerador síncrono, quando operando em um sistema de geração isolado, possui sua tensão de saída variando em função das cargas conectadas em seus terminais. Neste trabalho foi proposto um sistema de controle para a excitação de campo do gerador síncrono de modo a manter reguladas as suas tensões de terminal. Utilizou-se um sistema de excitação estático com o emprego de um conversor *buck*, que a partir de um sinal PWM ajusta a tensão aplicada ao campo de forma a regular a tensão de saída do gerador. Este sinal PWM é gerado a partir de duas malhas de controle que empregam controladores dos tipos PI e PD.

Ao analisar a resposta do sistema de geração em função da variação de cargas, percebe-se que o sistema obteve um desempenho satisfatório, atingindo a tensão de referência e assim mantendo a regulação da tensão do sistema. Nota-se que o pico de tensão no regime transitório é bem elevado, ultrapassando os limites estabelecidos pela norma. Isso se deve ao fato de que não foi levado em consideração o regime transitório na modelagem do gerador síncrono.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Na continuação do trabalho será visada primeiramente a modelagem do gerador considerando seu comportamento durante os regimes subtransitório e transitório. Após esta modelagem do sistema dinâmico do gerador síncrono serão realizadas simulações para posteriormente realizar a implementação do sistema de geração.

Outro objetivo é a interligação desse sistema à outros sistemas de geração, de modo que o gerador síncrono forneça potência ativa e possa realizar a compensação dos reativos, assim melhorando a qualidade da energia do sistema.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Capacidade de Geração do Brasil**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>.

ANTUNES, H. **Modelagem Matemática do Gerador Síncrono de Polos Salientes**. 2007.

BARAKAT, A. et al. Output voltage control of synchronous generator using diode and thyristor excitation structures combined with multivariable H controllers. **IET Electric Power Applications**, v. 6, n. 4, p. 203–213, 2012.

BARBI, I. **Modelagem de Conversores CC-CC Empregando Modelo Médio em Espaço de Estados**. [S.l.]: Edição do Autor, 2015.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. [S.l.]: Elsevier, 2012.

CAROLINO, S. F. **Regulador Automático de Tensão Robusto Utilizando Técnicas de Controle Adaptativo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. [S.l.]: McGraw Hill, 2013.

CHEN, Z. et al. Design and Implementation of Voltage Source Converter Excitation System to Improve Power System Stability. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 4, p. 2778–2788, 2016.

FERNANDES, P. C. **Regulador Automático de Tensão: Influência do Ganho no Sistema Elétrico de Potência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2011.

FITZGERALD, A. E.; JR, C. K.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. [S.l.]: McGraw Hill Inc, 2003.

JUNIOR, A. S. S. **Estudo de um Gerador de Indução Assíncrono Autoexcitado por Capacitores**. 2015.

KRAUSE, P. C. **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. [S.l.]: Wiley-Blackwell, 2002.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw Hill Inc, 1993.

LAI, L. L.; CHAN, T. F. **Distributed Generation: Induction and Permanent Magnet Generators**. [S.l.]: John Wiley, 2007.

NEVES, R. V. A. **Controle de Tensão Terminal e Potência Reativa de um Grupo Motor Gerador Diesel Conectado à Rede de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

PEPERMANS, G. et al. Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy Policy**, v. 33, n. 6, p. 787 – 798, 2005.

RODRIGUES, L. G. **Estudo e Desenvolvimento de um Conversor DC-DC de Topologia Buck para Aplicação Aeroespacial**. 2007.

SCHERER, L. G. **Modelagem e Controle de uma Micro Central Hidrelétrica com Utilização de Gerador de Indução Auto-Excitado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

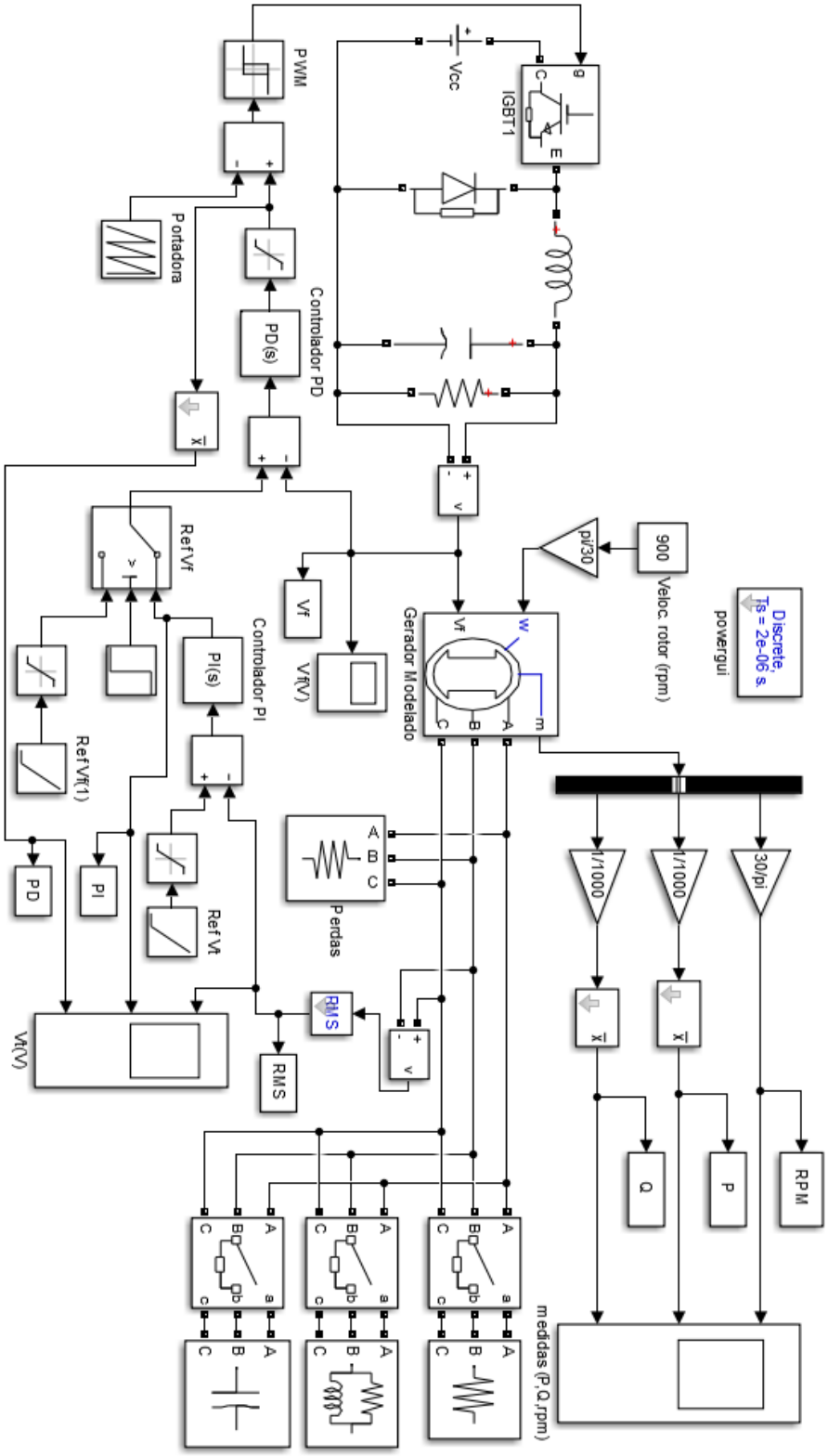
SUDJOKO, R. I.; DARWITO, P. A. Design and simulation of synchronous generator excitation system using buck converter at motor generator trainer model LEM-MGS. **International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)**, p. 41–45, 2017.

SUH, Y.; LIPO, T. A. Field Excitation Scheme using a Machine-side 4-leg Converter in MW-range WRSG Wind Turbine Systems. **IEEE**, 2017.

APÊNDICES

Apêndice A – Sistema de Geração

Figura A.1 – Sistema de Geração Simulado no Software Simulink



Fonte: Autor.