

DIEGO FERREIRA DE SOUZA
WEBERT JAQUES CERQUEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO
SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO BRUSHLESS EM
PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DOCTUM – MINAS GERAIS

2014

DIEGO FERREIRA DE SOUZA

WEBERT JAQUES CERQUEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO
SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO BRUSHLESS EM
PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

Monografia apresentada à banca examinadora da faculdade de Engenharia Elétrica, do Instituto Doctum de Educação e Tecnologia, como exigência parcial de obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica, sob a orientação do Prof. Joildo Fernandes Costa Júnior.

DOCTUM – CARATINGA

2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que nos acompanha em cada fase de nossas vidas, sem ele não teríamos forças para lutar e alcançar tais objetivos.

Aos nossos familiares e esposas que estão sempre presente nos momentos fáceis e difíceis, sem medirem esforços.

Aos professores Joildo Fernandes Costa Júnior e Vagner Bravos Valadares, que nos orientou neste presente estudo.

Aos demais professores que se dedicam ao nosso aprendizado e formação acadêmica.

Aos colegas de classe, que em cinco anos participaram de um grande período de convivência e troca de experiências.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Elétrica brasileira 2013	22
Figura 2: Perfil esquemático de uma Usina Hidrelétrica.....	27
Figura 3: Diagrama esquemático da Unidade Geradora	28
Figura 4: Bloco de controle de um sistema de excitação	33
Figura 5: Sistema de excitação com excitatriz cc.....	38
Figura 6: Sistema de excitação com excitatriz cc em cascata.....	39
Figura 7: Sistema de Excitação com excitatriz Estática	41
Figura 8: Sistema de Excitação Estático alimentado por barramento auxiliar	43
Figura 9: Sistema de excitação Estático alimentado pelos terminais do gerador.....	44
Figura 10: Sistema de excitação Estático com alimentação composta.	45
Figura 11: Sistema de excitação Brushless.....	47
Figura 12: Sistema de alimentação do campo da excitatriz	51
Figura 13: Sistema de Excitação Brushless por ímã permanente (PMG)	54
Figura 14: Tempo de regulagem da tensão.....	55
Figura 15: Tempo de resposta	56
Figura 16: Excitatriz Estática da PCH Areia Branca.....	59
Figura 17: Diagrama Unifilar das UG's	60
Figura 18: Desgaste das escovas	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Perdas pela queima dos transformadores.....	63
Tabela 2: Gastos devido à queima dos transformadores de excitação	64
Tabela 3: Gastos com manutenção e aquisição de escovas	64
Tabela 4: Prejuízo devido manutenção das escovas	65
Tabela 5: Perdas totais na PCH Areia Branca	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Tensão induzida.....	35
Equação 2: Cálculo da velocidade síncrona.....	48
Equação 3: Densidade de corrente	62

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A - Ampère

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

B_{3F} - conjunto trifásico de bobinas

CA - Corrente alternada

CC - Corrente contínua

CGH - Centrais Geradoras Hidrelétricas

d - densidade de corrente

f - frequência

HH - Homem Hora

I_E - corrente no campo da excitatriz

kV - Kilovolts

L_E - campo da excitatriz

L_G - campo do gerador principal

MME - Ministério de Minas e Energia

MVA - Mega Volt Ampère

MW - Mega watts

n - número de escovas por anel

N_i - número de espiras do gerador por fase

p - número de polos

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

PID - Proporcional integral derivativo

PLC - Controlador Lógico Programável

PMG - Gerador Magnético Permanente

P_{RD} - ponte trifásica rotativa a diodos

PT - Permissão de Trabalho

QDGCC - Quadro Distribuição Geral de Corrente Contínua

RPM - Rotação por minuto

s - área de contato da escova

t - tempo

TC - Transformador de corrente

TP - Transformador de potencial

UG - Unidade Geradora

UHE - Usina Hidrelétrica de Energia

V - Volt

V_{CEIL} - tensão ceiling

V_d - tensão corrente contínua

v_s - velocidade síncrona

V_T - tensão terminal do gerador

ε - tensão induzida

Φ - fluxo magnético

ω - velocidade do campo magnético

RESUMO

Neste presente estudo serão apresentados os diversos tipos de sistemas de excitação para geradores síncronos de energia elétrica, trazendo informações sobre suas características técnicas, bem como suas aplicações. Será realizada uma análise sobre a viabilidade de implantação dentre os vários tipos existentes, analisando sua confiabilidade, menor índice de manutenção e aplicabilidade. Diversos profissionais da área de geração de energia elétrica trabalham diante desses sistemas de excitação, mas muitas vezes não possuem conhecimento técnico sobre esse sistema, surgindo dúvidas sobre qual o melhor tipo de excitatriz a ser empregada em cada tipo de gerador, e demonstrar os parâmetros necessários para determinar e projetar esses equipamentos, a fim de se ter maior eficácia na elaboração de projetos. Para solução deste assunto abordado, será realizado um estudo minucioso sobre os diversos tipos de excitatrizes existentes, desde os primórdios da geração de energia elétrica até os tempos atuais, onde ocorreram diversas mudanças tecnológicas, fato que impulsionou muitas evoluções para tais sistemas. Serão abordadas as diversas características de cada tipo de equipamento, trazendo uma base sólida de conhecimento para profissionais e estudantes da área de engenharia elétrica.

Palavras-chave

Excitatriz, geradores síncronos, sistemas de excitação, energia elétrica.

ABSTRACT

This present study will be presented the various types of excitation systems for synchronous generators of electricity, bringing about its technical characteristics as well as their applications. An analysis on the feasibility of implementation among the various existing types will be performed by analyzing its reliability, lower maintenance needs and applicability. Several professionals in the electric power generation work on these excitation systems, but often lack technical knowledge about this system, emerging doubts about the best type of exciter to be used in each type of generator, and demonstrate the necessary parameters to determine and design the equipment in order to be more effective in preparing projects. To solve this issue addressed, a detailed study on the various types of exciters will be held, since the dawn of electricity generation till today, where several technological changes, fact led to many developments such systems occurred. The different characteristics of each type of equipment will be addressed by bringing a solid knowledge base for professionals and students in the field of electrical engineering.

Keywords

Exciter, synchronous generators, excitation systems, electricity.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS	16
1.GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	21
1.1 INFORMAÇÕES GERAIS	21
1.2 MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL	21
1.2.1 Matriz Elétrica Brasileira	21
1.2.2 Potencial hidrelétrico do Brasil	23
1.2.3 Capacidade de geração do Brasil	23
1.2.4 Pequenas Centrais Hidrelétricas no Brasil	24
1.3 COMO SÃO CONSTITUÍDAS AS HIDRELÉTRICAS	25
1.3.1 Estrutura de uma hidrelétrica	25
1.3.1.1 Barragem.....	25
1.3.1.2 Vertedouro.....	26
1.3.1.3 Sistemas de captação e adução.....	26
1.3.1.4 Casa de Força.....	26
1.3.2 Componentes de um grupo gerador	27
1.3.2.1 Gerador	28
1.3.2.2 Turbina	29
1.3.2.3 Sistema de regulação de velocidade	29
1.3.2.4 Sistema de proteção.....	30
1.3.2.5 Sistema de medição	31
1.3.2.6 Sistema de excitação.....	31
1.4 PRINCÍPIOS DE TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA.....	33
1.4.1 Introdução	33

1.4.2 Geradores Síncronos	34
1.4.3 Geradores de Indução (assíncronos).....	35
2.SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	37
2.1 INTRODUÇÃO	37
2.2 SISTEMA DE EXCITAÇÃO ROTATIVO COM GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA	37
2.3 SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO UTILIZANDO TIRISTORES	40
2.3.1 Sistema alimentado por barramento auxiliar	42
2.3.2 Sistema alimentado pelos terminais do gerador	43
2.3.3 Sistema alimentado pela corrente e tensão do gerador.....	44
2.4 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO ROTATIVO COM GERADOR DE CORRENTE ALTERNADA (BRUSHLESS)	46
2.4.1 Funcionamento	46
2.4.2 Principais componentes de um Sistema de Excitação Brushless	49
2.4.2.1 Transformador de Excitação.....	49
2.4.2.2 Ponte retificadora não-controlada trifásica	50
2.4.1.3 Regulador de Tensão	51
2.4.3 Vantagens e desvantagens.....	52
2.5 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS POR ÍMÃ PERMANENTE (PMG)	53
2.6 TEMPO DE REGULAGEM DA TENSÃO (TEMPO DE RESPOSTA)	55
3. ESTUDO DE CASO	57
3.1 INTRODUÇÃO	57
3.2 CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO	57
3.2.1 Geradores.....	57
3.3 SISTEMA DE EXCITAÇÃO DA PCH AREIA BRANCA.....	58
3.3.1 Funcionamento	59
3.3.2 Manutenções do Sistema Estático da PCH Areia Branca.	60

3.4 PERDAS DECORRENTES À MANUTENÇÃO PREVENTIVA E CORRETIVA DO SISTEMA ESTÁTICO DA PCH AREIA BRANCA	62
3.5 SOLUÇÃO PROPOSTA.....	66
CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICES	72
ANEXOS	74

INTRODUÇÃO

Este presente estudo se justifica com a obtenção de três ganhos. Tem-se como ganho pessoal, um enriquecimento intelectual muito grande através do conhecimento adquirido sobre a pesquisa, podendo assim futuramente aplicar esse aprendizado em novos projetos e melhorias em equipamentos destinados à geração de energia elétrica.

Como ganho social, pode se dizer que a aplicação deste estudo em futuros projetos, garantirá uma maior confiabilidade e eficácia na geração de energia elétrica, beneficiando assim a população por garantir uma melhor qualidade de energia elétrica.

Como ganho científico, este trabalho traz um aumento do acervo técnico para consulta de profissionais e estudantes da área, que queiram se inteirar do assunto, aumentando o conhecimento e esclarecendo dúvidas sobre o tema abordado.

Na área de geração de energia elétrica, foram observadas que muitas Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) e também Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), utilizam sistema de excitação estática, onde há necessidade de efetuar paradas das unidades para manutenção das escovas e anel coletor. Com isso, este estudo irá apontar o porquê dessa utilização e mostrar que o sistema de excitação tipo Brushless pode ser mais vantajoso que os demais.

O problema desta pesquisa é como demonstrar para os profissionais da área de geração de energia elétrica que trabalham diante desses sistemas de excitação, qual critério utilizado para se escolher o tipo de excitatriz, as vantagens do sistema Brushless têm em comparação com os demais sistemas, e provar que a utilização do sistema Brushless aumenta o índice de disponibilidade e geração das Unidades Geradoras (UG).

Por fim, o objetivo deste estudo será demonstrar para os profissionais da área de geração de energia elétrica, qual critério utilizado para se escolher o tipo de excitatriz, quais grandezas elétricas são levadas em consideração no ato do projeto, e também as vantagens do sistema Brushless têm em comparação com os demais sistemas. Os objetivos específicos deste estudo será descrever o princípio de

funcionamento de cada tipo de sistemas de excitação e suas características, apontar suas vantagens e desvantagens, fazer uma análise dos critérios de escolha de qual tipo de excitatriz se implantar em cada empreendimento e por fim provar que o sistema Brushless, apesar de ter algumas desvantagens, possui maiores vantagens em termos operacionais que os demais e que a sua utilização aumenta o índice de disponibilidade e geração das UG's.

Para elaboração desta pesquisa, será adotada uma metodologia, que no sentido teórico, será selecionado obras pelas quais permitirão a construção de conceitos, tais como: princípios de geração de energia, conceituação de usina hidrelétrica, o que é um gerador, como funciona um sistema de excitação, importantes porque irá embasar os conceitos necessários ao entendimento da pesquisa. Utilizaremos da internet por possuir grande oferta de artigos sobre geração de energia, máquinas elétricas e geradores.

Algumas sínteses irão embasar esta pesquisa, sendo necessário e resultante das análises que serão aplicadas aos seguintes elementos e/ou contextos referentes à Regulador de tensão para Sistemas de Excitação Brushless- Desenvolvimento e aplicação, Ajuste de Parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação recorrendo à resposta em frequência do modelo, Máquinas e acionamentos elétricos.

Tais ações se manifestarão ao longo da pesquisa e que terão como força indutora a presença dos seguintes pressupostos: a falta de material sobre o assunto, o porquê da não utilização de sistemas de excitação Brushless em alguns projetos, aquisição de maior conhecimento em princípios de funcionamentos de diversos tipos de sistemas de excitação.

Esta pesquisa será composta por três capítulos. No primeiro capítulo, intitulada "Geração de Energia Elétrica", serão abordados os seguintes temas: Matriz Energética do Brasil, Como são constituídas as hidrelétricas, Princípios de transformação de energia.

O segundo capítulo, que possui o título "Sistemas de Excitação", a escrita recairá sobre os tipos de sistema de excitação, princípios de funcionamento, equipamentos usados em cada tipo, e suas vantagens e desvantagens.

No terceiro capítulo, nos dedicaremos aos elementos chave da monografia, realizando um estudo de caso voltado para a Pequena Central Hidrelétrica Areia Branca, sintetizando nossa tese de que o Sistema de Excitação Brushless é aplicável na PCH Areia Branca, e de um modo geral em todas as PCH's. O sistema Brushless possui muitas vantagens e economia em custos com manutenções preventivas e corretivas, menos gastos com substituição de equipamentos existentes no sistema Estático e também menor indisponibilidade dos grupos geradores.

CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS

Atualmente, utilizamos a energia elétrica em uma imensa gama de aplicações. O mundo de hoje é repleto de tecnologias, onde o principal combustível é a eletricidade. Essa energia é resultado da transformação de outras formas de energia disponível na natureza. Algumas dessas formas de transformação são através da energia solar, térmica, eólica, nuclear e hidráulica.

O foco desta pesquisa serão as fontes hidráulicas. Essas por sua vez, são classificadas de acordo com o tamanho da instalação, da potência gerada e da área do reservatório, podendo se enquadrar como Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE).

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) adota como CGH, os empreendimentos com potência instalada de até 1.000KW. De acordo com a ANEEL, Resolução Nº 652, de nove de Dezembro de 2003, no Art. 3º será considerado como características de PCH o aproveitamento hidrelétrico com potência superior a 1.000KW e igual ou inferior a 30.000KW, destinada a produção independente, auto produção e produção independente autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 km². Já as UHE's são Usinas com potência instalada maior que 30.000kW.⁽¹⁾

Para produzir energia, esses empreendimentos utilizam o potencial hídrico de um rio, que é armazenado em reservatórios através de barragens, tendo como função interromper o curso natural dos rios. Esta água armazenada é captada por canais de adução ou condutos metálicos, e direcionada para uma turbina. Estas turbinas têm a função de transformar a energia hidráulica em energia mecânica, e posterior em energia cinética (energia do movimento), através da rotação do eixo, que é acoplado ao rotor do gerador, transmitindo um torque, fazendo com que todo o conjunto turbina/gerador gire em uma determinada rotação. O gerador tem o papel de produzir a energia elétrica em seus terminais. Essa energia é transportada através de cabos condutores até a subestação elevadora e transmitida para outra subestação denominada abaixadora, onde é distribuída aos consumidores finais.

¹ **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. Disponível em www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf. Acessado em 20 fev. 2014.

Para que seja obtido um maior conhecimento sobre as usinas hidrelétricas uma explanação mais detalhadas de seus componentes é de suma importância.

“A Turbina é um equipamento formado por uma série de pás ligadas a um eixo, tem como função transformar a energia de um fluxo de água em energia mecânica, seu principio de funcionamento é o mesmo das antigas rodas d’água.”⁽²⁾ Para a elaboração de um projeto e definição de qual o melhor tipo a ser utilizada é preciso basear-se na queda e vazão oferecida pelo rio no qual o empreendimento será implantado. No Brasil atualmente são mais utilizadas os modelos: Francis, Kaplan, Pelton e Bulbo.

As turbinas conforme já citado anteriormente são acopladas através do seu eixo ao eixo do rotor do gerador.

Os geradores são máquinas elétricas compostas basicamente por um rotor e um estator. O rotor é responsável por gerar um campo magnético em seus polos, que podem ser polos lisos ou salientes. Esse campo eletromagnético gerado nos polos do rotor passa a ser variável através do movimento de rotação provocado pela turbina, com isso ele passa a ser induzido aos enrolamentos do estator, gerando assim a energia elétrica, através da indução de tensão nos terminais do gerador.⁽³⁾

Essa energia gerada é transmitida até a subestação elevadora através de condutores, onde a tensão é elevada. A subestação é composta basicamente pelos seguintes componentes: Transformador elevador, disjuntor, seccionadora, transformador de corrente (TC), transformador de potencial (TP) e para-raios.

Após a tensão ser elevada, a energia é transmitida até a subestação abaixadora através da linha de transmissão, onde o nível de tensão é abaixado e essa energia passa a ser distribuída aos consumidores finais, como por exemplo: casas, lojas, shopping centers, hospitais, dentre outros.

Conforme citado anteriormente, toda essa energia elétrica foi produzida por meio do campo eletromagnético gerado através dos polos do rotor do gerador. E a geração deste campo eletromagnético é feita a partir de um sistema conhecido como sistema de excitação.

² **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. Disponível em www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf. Acessado em 26 fev. 2014.

³ **Fundação COGE**, Apostila de Treinamento para Operadores de Usinas, 2007, p.32.

O sistema de excitação tem por função “fornecer e controlar a tensão interna do gerador e também controlar o fator de potência e a magnitude da corrente gerada.”⁽⁴⁾ Esse controle da excitação também “permite manter de forma estável a tensão terminal do gerador em valor constante, mesmo diante de variações de potência da máquina.”⁽⁵⁾

Para realizar esse controle, é utilizado um regulador de tensão, que é um elemento capaz de monitorar a tensão de saída do gerador e atuar diretamente na excitatriz para que aumente ou diminua o fluxo de corrente nos polos do rotor.

“Em sistemas primitivos, o operador desempenhava o papel do regulador de tensão, observando a tensão de saída e ajustando o reostato de campo da excitatriz, de modo a obter as condições de saída desejadas.”⁽⁶⁾

Existem diversos tipos de sistemas de excitação, com diferentes componentes em seu circuito, diversificando de acordo com o tipo de utilização. Podem ser classificadas como sistemas de excitação Estáticos e Rotativos. Os sistemas Estáticos são compostos basicamente por um transformador, regulador de tensão, anel coletor, e um conjunto de escovas. Já os sistemas Rotativos são compostos pelo regulador de tensão, podem ter ou não um transformador e escovas, e são definidos por dois tipos, sendo eles:

Excitatriz com gerador de corrente contínua (CC);

Excitatriz sem escovas (sistema Brushless).

³ **Fundação COGE**, Apostila de Treinamento para Operadores de Usinas, 2007, p.32.

⁴ **COSTA**, Antônio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**, notas de aula, UFSC, 2002, p.105. Disponível em <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/dc-cap5.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

⁵ **Fundação COGE**, Apostila de Treinamento para Operadores de Usinas, 2007, p.32.

⁶ **COSTA**, Antônio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**, notas de aula, UFSC, 2002, p.105. Disponível em <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/dc-cap5.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

“O sistema de excitação Brushless foi desenvolvido com o objetivo de eliminar a necessidade de utilização de anéis coletores e escovas, para alimentação do campo do gerador.”⁽⁷⁾

Tem-se como “marco teórico”, segundo o autor Francisco João Di Mase Galvão Junior, com a citação:

A grande vantagem da excitatriz Brushless é a eliminação definitiva dos anéis coletores e escovas, não havendo necessidade de resfriamento do anel e de se fazer manutenções periódicas nas escovas, o que obriga a interrupção da geração de energia elétrica.⁽⁸⁾

Complementando a citação do Marco teórico, os autores Victor Emanuel Lima Marques, Roberth dos Santos Lima, e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, também defendem as vantagens de utilização do Sistema de Excitação Brushless com as citações.

O sistema de excitação Estático tem a vantagem de se ter uma resposta mais rápida na regulação de tensão em relação ao sistema Brushless. Porém como desvantagem pode-se citar a necessidade do uso de conjuntos anéis e escovas o que exige maior frequência de manutenção.⁽⁹⁾

“O sistema de excitação rotativa CC passou a ser cada vez menos utilizada devido ao elevado número de paradas para manutenção e ao desgaste mecânico de seus elementos, principalmente das escovas.”⁽¹⁰⁾

Por fim, completando a teoria apresentada no marco teórico, o professor Hélio Pinheiro, afirma que os sistemas de excitação composta por escovas possui a “desvantagem de exigir manutenção periódica no conjunto escovas e porta

⁷ **GALVÃO JUNIOR**, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.11. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&coobra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

⁸ **GALVÃO JUNIOR**, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.11. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&coobra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

⁹ **LIMA**, Roberth dos Santos. **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.82. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

¹⁰ **MARQUES**, Victor Emanuel Lima. **Ajuste de parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação, recorrendo a resposta em frequência do modelo**. 2011. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, p.24. Disponível em <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63431/1/000149243.pdf>. Acessado em 5 mar. 2014.

escovas,”⁽¹¹⁾ fator que impacta diretamente nos índices de disponibilidade e geração das hidrelétricas.

¹¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. **Apostila de Geradores CA**. 2007, p.11 Disponível em <http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/apostila-de-geradores-de-ca>. Acessado em 19 mar. 2014.

1. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

1.1 INFORMAÇÕES GERAIS

O Brasil é um país rico em recursos hídricos, “mas aproveita apenas cerca de 30% desse potencial na geração de energia elétrica.”⁽¹²⁾ De certa forma esse valor representa um baixo fator de utilização deste grandioso recurso, e isto com o passar do tempo vem se mostrando prejudicial a expansão energética no país. E esse percentual poderá ser alterado a partir da implantação de novas usinas hidrelétricas, mas o que tem afetado o andamento de alguns empreendimentos é o impacto ambiental causado nas construções, principalmente em usinas hidrelétricas de grande porte. “O principal argumento contrário à construção das hidrelétricas é o impacto provocado sobre o modo de vida da população, flora e fauna local, pela formação de grandes lagos ou reservatórios, aumento do nível dos rios ou alterações em seu curso após o represamento.”⁽¹³⁾ Com isso, iniciou-se investimentos em outras fontes de energia, e neste caso, as Pequenas Centrais Hidrelétricas são uma alternativa para produzir energia limpa e com menores impactos ambientais.

1.2 MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL

1.2.1 Matriz Elétrica Brasileira

As mudanças no comportamento climático tem afetado diretamente a produção de energia elétrica do país. A redução do volume das precipitações pluviométricas foi o principal causador desse déficit. Segundo o relatório Balanço Energético Nacional de 2014, ano base 2013.

¹² ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. Disponível em www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf, p.52. Acessado em 26 fev. 2014.

¹³ ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. Disponível em www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf, p.52. Acessado em 26 fev. 2014.

Houve um decréscimo de 5,4% na oferta de energia hidráulica, fazendo com que o percentual de participação dos recursos renováveis da matriz energética do país reduzisse de 84,5% em 2012 para 79,3% em 2013, apesar do incremento de 1724MW de potência no parque hidrelétrico. A potência eólica atingiu 2.202 MW, o que proporcionou um acréscimo de 30,2% na geração de eletricidade. O aumento do consumo final de eletricidade no país em 2013, de 3,6%, com destaque para os setores residencial e comercial, foi atendido a partir da expansão da geração térmica, especialmente das usinas movidas a carvão mineral (+75,7%), gás natural (+47,6%), bagaço de cana (+19,2%), cujas participações na matriz elétrica, na comparação de 2013 contra 2012, cresceram de 1,6 para 2,6%, de 7,9 para 11,3%, e de 4,2 para 4,9%, respectivamente.⁽¹⁴⁾

Abaixo na *Figura 1*, é mostrado a Matriz Energética brasileira em 2013, sendo comparada com o ano de 2012.

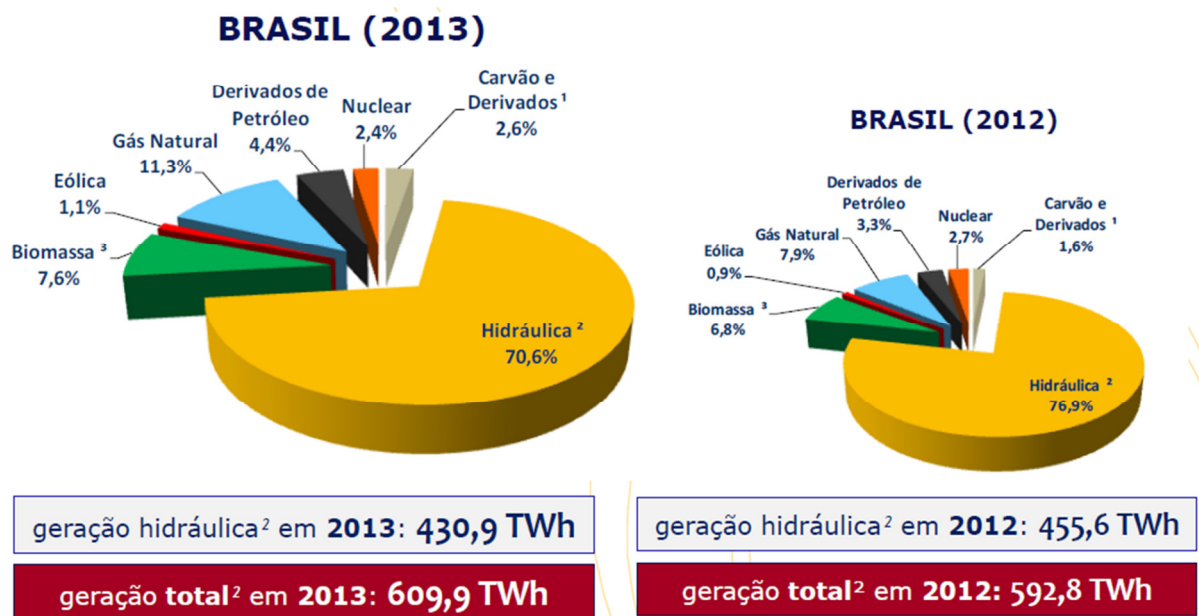


Figura 1: Matriz Elétrica brasileira 2013

Fonte: (MME, 2014, p. 29)⁽¹⁵⁾

Podemos ver que a participação da geração de energia por fontes hidráulicas diminuiu cerca de 6,3%, enquanto a geração total aumentou cerca de 2,9%. Com o aumento do consumo de energia elétrica, houve a necessidade de inserir outras fontes de geração para suprir o déficit causado pela falta de chuvas.

¹⁴ **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA.** Relatório Balanço Energético Nacional 2014-ano base 2013, p.7. Disponível em http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html. Acessado em 12 nov. 2014.

¹⁵ **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA.** Relatório Balanço Energético Nacional 2014-ano base 2013, p.29. Disponível em http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html. Acessado em 12 nov. 2014.

1.2.2 Potencial hidrelétrico do Brasil

O Brasil é um dos maiores produtores de energia hidrelétrica do mundo. Em 2014,

a participação da energia hidráulica vem representando cerca de 66,83% na participação da matriz elétrica do Brasil.” Sendo que 0,22%, é representado por CGH's, com 477 empreendimentos em operação, totalizando 295.461kW de potência fiscalizada. Já as PCH's, contribuem com 3,56% do total gerado por fontes hidráulicas, com 469 empreendimentos em operação, totalizando 4.677.132kW de potência fiscalizada. Por fim, as maiores contribuintes são as UHE's, representado cerca de 63,08%, com 200 empreendimentos em operação, num total de 83.457.368kW de potência fiscalizada.⁽¹⁶⁾

Com os avanços tecnológicos, o Brasil vem buscando outras fontes de energia não convencionais, mas tudo indica que a energia hidráulica se manterá como a principal fonte geradora de energia elétrica, pois é uma energia limpa e renovável.

Pelo fato das implantações de grandes empreendimentos estarem cada vez mais em declínio, devido aos diversos fatores burocráticos relacionados ao meio ambiente, o Brasil tem passado por um processo de reestruturação do setor elétrico, do qual se estimula a geração descentralizada de energia elétrica, de modo que as fontes não convencionais, principalmente as renováveis, tem ocupado maior espaço na matriz energética nacional. Por isso, as PCH's terão um papel extremamente importante para a matriz elétrica.

1.2.3 Capacidade de geração do Brasil

O crescimento econômico que o Brasil apresentou nos últimos anos, ocasionou o aumento no consumo de energia elétrica. Por este fato, foi necessário ampliar a planta de geração de energia para que a demanda fosse suprida e mesmo

¹⁶ **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 13 nov. 2014.

assim, ainda há necessidade de se ampliar cada vez mais para o contínuo avanço do país.

Atualmente, o país conta com um total de “3.493 empreendimentos em operação, totalizando 132.309.745 kW de potência instalada. Estão previsto para os próximos anos uma adição de aproximadamente 36.219.825 kW na capacidade de geração, proveniente da implantação dos 199 empreendimentos atualmente em construção e mais 586 outorgados.”⁽¹⁷⁾

Apesar de se observar um crescimento nos investimentos na área de geração de energia elétrica por hidrelétricas, estes ainda não são suficientes para acompanhar o crescimento da demanda do Brasil.

1.2.4 Pequenas Centrais Hidrelétricas no Brasil

No Brasil, a geração de energia elétrica é composta por grandes empreendimentos. Mas devido aos grandes danos causados nas construções das UHE's, as PCH's vêm ganhando espaço no cenário energético. Apesar da pequena geração que cada uma produz, quando somado, representa uma parcela significativa.

As recentes mudanças institucionais e regulamentares, introduzindo incentivos aos empreendedores interessados e removendo uma série de barreiras à entrada de novos agentes na indústria de energia elétrica, assim como a revisão do conceito de pequenas centrais hidrelétricas têm estimulado a proliferação de aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte e baixo impacto ambiental no Brasil. Esses empreendimentos procuram atender demandas próximas aos centros de carga, em áreas periféricas ao sistema de transmissão e em pontos marcados pela expansão agrícola nacional, promovendo o desenvolvimento de regiões remotas do país.⁽¹⁸⁾

Por isso, as construções de PCH's vêm aumentando cada vez mais como forma alternativa para suprir as demandas de energia elétrica. É um empreendimento com menor impacto ambiental e com menor tempo de implantação.

¹⁷ **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 13 nov. 2014.

¹⁸ **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 2002, p.41. Disponível em http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf. Acessado em 21 ago. 2014.

“Atualmente encontra-se em construção cerca de 41 empreendimentos, totalizando 487.130kW que serão empregados no sistema, e ainda há cerca de 133 empreendimentos outorgados, mas as suas construções ainda não foram iniciadas, totalizando 1.904.403kW de potência outorgada,”⁽¹⁹⁾ contribuindo com o aumento da oferta de energia do país.

1.3 COMO SÃO CONSTITUÍDAS AS HIDRELÉTRICAS

1.3.1 Estrutura de uma hidrelétrica

As hidrelétricas têm o importante papel de transformar a energia hidráulica, em energia mecânica, e posteriormente em energia elétrica.

Para produzir a energia através das hidrelétricas, “é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d’água, ou criados artificialmente.”⁽²⁰⁾

A estrutura de uma usina é composta basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada.

1.3.1.1 Barragem

A barragem tem a função de armazenar a água que será direcionada para a turbina. Ela interrompe o curso normal do rio, formando o reservatório. Existem barragens de diversos tipos e configurações.

¹⁹ **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 13 nov. 2014.

²⁰ **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. Disponível em www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf. Acessado em 26 fev. 2014.

1.3.1.2 Vertedouro

É responsável pelo controle do nível do reservatório. Permitem a passagem da água quando chega aos limites recomendados. Existem vertedouros de soleira livre e com comportas. No vertedouro de soleira livre, quando o nível chega ao valor máximo, a água represada é descarregada para a jusante da barragem, ou seja, o vertimento é livre. E há também os vertedouros com controle de nível por comportas, que podem ser acionadas por motores usando cabos de aço ou por unidades hidráulicas usando servomotores.

1.3.1.3 Sistemas de captação e adução

Os sistemas de captação e adução são formados por túneis, canais ou condutos metálicos que têm a função de levar a água até a casa de força e direcionar através do conduto forçado a água para a turbina.

1.3.1.4 Casa de Força

A casa de força é o local de abrigo das unidades geradoras, é o lugar onde se encontram os componentes que integram um grupo gerador. Este é composto basicamente pela turbina, gerador, mancais e periféricos.

É nesta instalação que estão às turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador. Durante o seu movimento giratório, as turbinas convertem a energia cinética (do movimento da água) em energia elétrica por meio dos geradores que produzirão a eletricidade. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga, como mostra a *Figura 2*. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo.⁽²¹⁾

²¹ ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003, p.50. Disponível em www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf. Acessado em 26 fev. 2014.

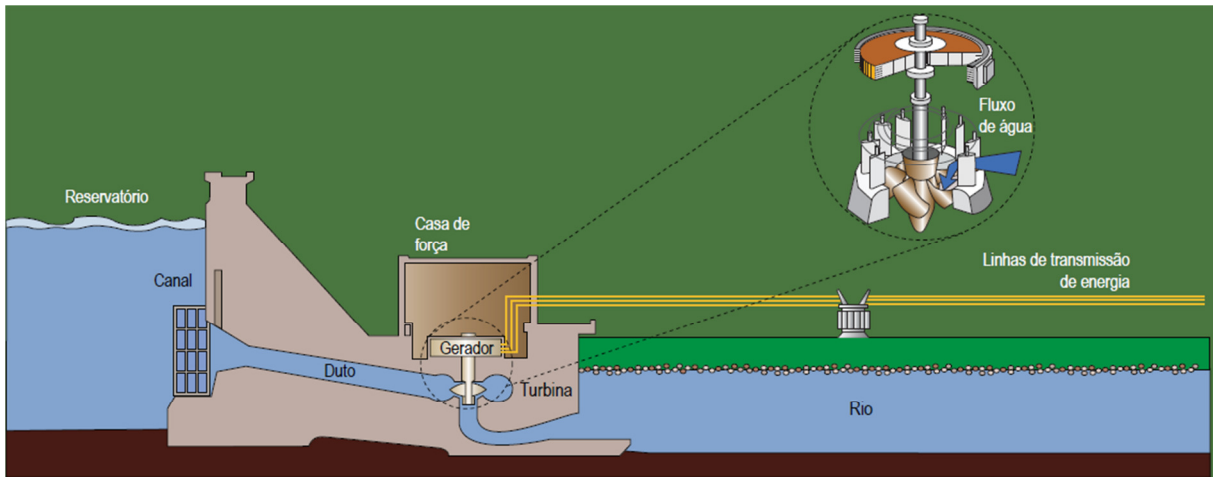


Figura 2: Perfil esquemático de uma Usina Hidrelétrica

Fonte: (ANEEL, 2003, p.50) ⁽²²⁾

Existem diversos layouts da casa de força que variam de um empreendimento para o outro. Além de abrigar os equipamentos eletromecânicos, podem abrigar também à sala de operação, escritórios, oficinas de manutenção, salas técnicas, banheiros e refeitórios.

1.3.2 Componentes de um grupo gerador

Os grupos geradores são formados por diversos equipamentos, cada um desempenhando uma determinada função importante no processo de geração de energia elétrica.

²² ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. p.50 Disponível em www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf. Acessado em 26 fev. 2014.

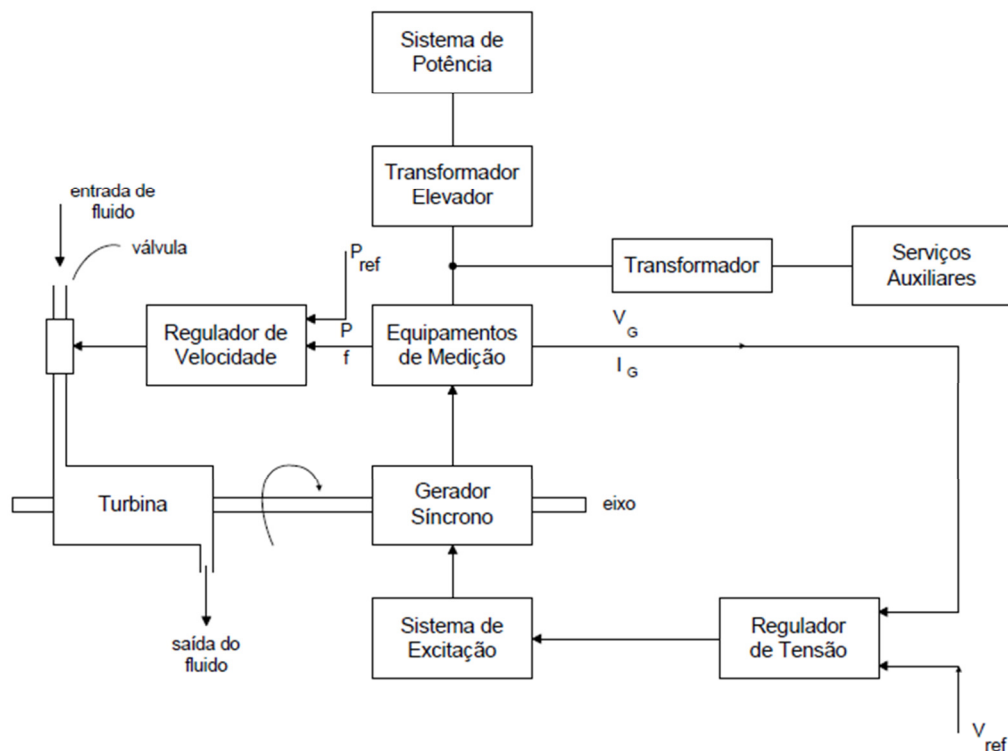


Figura 3: Diagrama esquemático da Unidade Geradora

Fonte: (CALSAN, 2011, p.12)⁽²³⁾

Na *Figura 3*, temos um diagrama de blocos com os equipamentos que compõem uma UG.

1.3.2.1 Gerador

O gerador é o principal componente de um grupo gerador, é ele que irá transformar a energia mecânica da turbina em energia elétrica. É formado por uma parte fixa e outra rotativa. A parte rotativa é denominada rotor, é nele que estão às bobinas que serão alimentadas em corrente contínua através do sistema de excitação, criando um campo eletromagnético. Já a parte fixa, denominada estator,

²³ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.12. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

estará às bobinas de fechamento do gerador, nele será induzida uma tensão alternada devido à variação do campo eletromagnético.

1.3.2.2 Turbina

Equipamento destinado a transformar a energia hidráulica em energia mecânica (energia do movimento). A turbina recebe o fluxo da água vinda do reservatório através da adução, passa pelo pré-distribuidor (pás fixas), pelo distribuidor (pás móveis), sendo o fluxo direcionado ao rotor da turbina. As pás móveis, através dos comandos do regulador de velocidade, irão controlar a vazão da turbina, e conseqüentemente sua potência e rotação, mantendo também a frequência do sistema. O eixo da turbina é acoplado ao gerador, transferindo o torque necessário.

1.3.2.3 Sistema de regulação de velocidade

O sistema de regulação de velocidade permite o controle da rotação dos grupos geradores, e conseqüentemente controlam a potência e a frequência do gerador.

A função original do regulador de velocidade é manter o grupo gerador em rotação constante a fim de que a frequência da tensão gerada seja mantida em seu valor nominal, atuando sobre a vazão da turbina hidráulica. Sendo a potência gerada função direta da vazão da turbina, o regulador de velocidade desempenha também papel fundamental de controle da potência ativa, notadamente quando o grupo gerador está operando em paralelo com a rede ou com outra máquina.⁽²⁴⁾

Os reguladores de velocidade são compostos pelos painéis de comando e controle, contendo os dispositivos elétricos que irão realizar os comandos e por uma

²⁴ **LIMA**, Roberth dos Santos. **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.76. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

central hidráulica, que receberá esses comandos vindos dos painéis e através de equipamentos eletromecânicos, tais como transdutores e bombas, irão atuar na turbina para fazer a devida regulação de velocidade.

1.3.2.4 Sistema de proteção

O sistema de proteção tem a função de proteger os equipamentos, visando à integridade dos mesmos, “desempenha um papel fundamental na detecção e isolamento de faltas, visando à operação normalizada, prevenção contra falhas e limitação de defeitos resultantes das falhas.”⁽²⁵⁾

Para fazer essa proteção, são utilizados os relés, que são responsáveis por monitorar as grandezas elétricas e, caso as mesmas ultrapassem os limites pré-definidos, atuarão sobre o equipamento responsável pela desconexão do sistema.

“A proteção deve funcionar rapidamente, para faltas internas, ser sensível às faltas externas, à zona de proteção estabelecida, assinalar condições anormais e eliminá-las quando perigosas.”⁽²⁶⁾

Antigamente, esses relés eram eletromecânicos e havia a necessidade de se utilizar um relé para cada tipo de proteção desejada, necessitando de um grande número de relés. Atualmente, com o avanço tecnológico na fabricação desses componentes, foram desenvolvidos os relés microprocessados, que executam diversas funções em apenas um equipamento.

²⁵ **LIMA, Roberth dos Santos. Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.36. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

²⁶ **LIMA, Roberth dos Santos. Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.36. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

1.3.2.5 Sistema de medição

O sistema de medição tem a função de fornecer os valores das grandezas a ser monitoradas nos processos industriais. Na geração de energia, o sistema de medição envia as variáveis para o regulador ou um relé, que de acordo com a lógica de cada instrumento, fará as intervenções necessárias para correção de uma falha ou oscilação do sistema. Dentre os dispositivos utilizados para medição, os TP's e TC's são os mais usuais. Os transformadores de potencial são ligados em paralelo com a rede, eles transformam a tensão que entra em seu enrolamento primário em uma tensão com valor reduzido, que através de seu enrolamento secundário, enviará o valor da tensão para outro dispositivo. Os transformadores de corrente possuem o mesmo princípio, porém fazem a transformação da corrente e são ligados em série com a rede. Esses equipamentos auxiliam no controle da potência ativa, reativa, tensão e corrente em um gerador.

1.3.2.6 Sistema de excitação

O sistema de excitação é um importante aliado ao gerador na geração de energia elétrica. Os geradores síncronos necessitam de um campo eletromagnético em seu rotor para induzir uma tensão alternada no seu estator, produzindo a energia elétrica. Os sistemas de excitação tem a função de fornecer essa energia de forma controlada aos polos do rotor.

O sistema de excitação é de fundamental importância para prover a alimentação em corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador síncrono. A ele também são atribuídos os controles da tensão e da potência reativa gerada, além da manutenção da estabilidade em regime transitório, assim como fornecer condições favoráveis para a atuação da proteção. Tais sistemas podem ser classificados em sistemas de excitação Rotativos ou Estáticos.⁽²⁷⁾

²⁷ **LIMA**, Roberth dos Santos. **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.81. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

Para o controle da tensão no sistema de excitação, são utilizados os chamados reguladores de tensão. Antigamente, esse controle era feito manualmente, pelo reostato de campo, e ajustado a partir da medição da tensão de saída do gerador. Mas com os avanços tecnológicos, surgiram os reguladores automáticos de tensão. O comando para excitatriz, que faz variar a corrente de excitação fornecida ao rotor do gerador, é feito automaticamente pelo regulador automático de tensão, que fica localizado no quadro de comando e controle do sistema.

Os reguladores de tensão têm como função principal manter a tensão da armadura em seu valor ajustado, atuando sobre a corrente de excitação do grupo gerador síncrono. São elementos fundamentais no controle da potência reativa gerada, principalmente quando se deseja obter uma repartição apropriada da potência entre grupos geradores conectados a um mesmo barramento, por meio da alteração do ponto de regulagem, ou para controlar a tensão em um ponto distante dos terminais do grupo gerador.⁽²⁸⁾

A seguir na *Figura 4*, temos um modelo de uma malha de um sistema de excitação com o regulador de tensão. “Neste esquema, a tensão terminal do gerador após passar por um processo de medição e retificação é comparada com uma tensão de referência gerando um sinal de erro que alimenta os amplificadores do regulador de tensão.”⁽²⁹⁾ Cada bloco desse controle desempenha uma determinada função importante ao sistema.

O sinal de saída do gerador é levado para o comparador através dos transdutores, que são os TP's e TC's, esse valor é comparado com o valor de referência, gerando um sinal de erro. De acordo com a lógica, esse sinal é enviado para o regulador já com o erro corrigido. O regulador irá enviar o sinal para a excitatriz e realimentado através da malha de estabilização para também ser comparado com o sinal enviado do primeiro comparador, também gerando um sinal de erro e enviando o valor corrigido para o amplificador. Este amplificará o sinal de

²⁸ LIMA, Roberth dos Santos. **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.79. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

²⁹ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Capinas, p.19. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

controle e enviará novamente para excitatriz, esta irá excitar o campo do rotor do gerador, tendo então um controle em malha fechada.

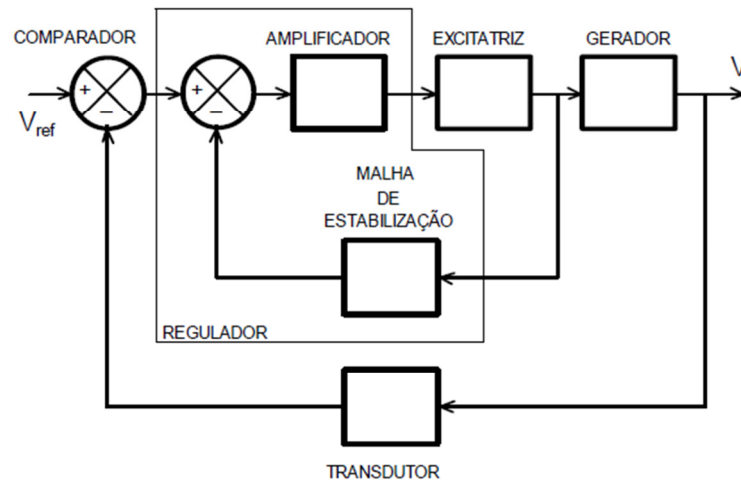


Figura 4: Bloco de controle de um sistema de excitação

Fonte: (CALSAN, 2011, p.20) ⁽³⁰⁾

Existem sistemas em que os painéis de excitação são integrados com os painéis do regulador de velocidade, reduzindo os espaços necessários para implantação dos mesmos.

1.4 PRINCÍPIOS DE TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA

1.4.1 Introdução

Não é muito correto quando se usa o termo geração de energia elétrica, quando o correto seria transformação de outras fontes de energia em energia elétrica. Por exemplo, nas hidrelétricas, o princípio de transformação de energia

³⁰ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.20. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

consiste em transformar a energia hidráulica em mecânica e a energia mecânica em energia elétrica. Para isso são utilizados os geradores.

Os geradores elétricos para centrais hidrelétricas, ou hidrogeradores, em princípio, podem ser síncronos ou assíncronos (indução). Os geradores síncronos são máquinas elétricas que trabalham com velocidade constante e igual à velocidade síncrona, que é uma função da frequência da tensão gerada e do número de pares de polos do rotor do gerador. As máquinas de indução, quando acionadas acima de sua velocidade síncrona, passam a operar como gerador. O gerador de indução não possui excitação própria, que deverá ser fornecida pelo sistema ao qual será ligado ou através de capacitores.⁽³¹⁾

Os geradores síncronos possuem como característica a capacidade de produzir não só energia ativa, mas também energia reativa. Já os geradores assíncronos, possuem a característica de trabalhar com rotações diferentes da rotação síncrona.

1.4.2 Geradores Síncronos

São chamados de geradores síncronos devido à velocidade síncrona ser igual à velocidade rotórica, não possui o efeito chamado de escorregamento, que nada mais é que a diferença destas velocidades.

É o tipo mais utilizado de gerador, para pequenas e grandes potências (hidrelétricas e térmicas). Seu rotor é magnetizado por uma fonte CC (excitatriz) e é levado a girar por um acionador mecânico externo. O enrolamento trifásico do estator recebe a indução de tensões resultante da rotação do campo do rotor em razão do posicionamento geométrico das bobinas das três fases, um sistema equilibrado de tensões é produzido. As correntes de carga fluem do estator para o exterior por conexões rígidas, permanentes.⁽³²⁾

³¹ **LIMA, Roberth dos Santos. Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.3. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

³² **LIMA, Roberth dos Santos. Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.5. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

A tensão induzida pela rotação do campo pode ser calculada através da *Equação 1*:

$$\epsilon = \omega N_i \phi f \cos(\omega t)$$

Equação 1: Tensão induzida

Fonte: (Máquinas Síncronas, 2001, p.9) ⁽³³⁾

Onde:

ϵ - representa a tensão induzida;

ω – velocidade do campo magnético;

N_i – Numero de espiras do gerador por fase;

Φ – fluxo magnético;

f – frequência;

t – tempo.

1.4.3 Geradores de Indução (assíncronos)

Recebem esse nome por possuir o efeito de escorregamento. O campo do rotor tende a acompanhar o campo girante do estator, mas nunca ficará em fase, fato este que origina o nome de motores assíncronos. Devido a este fato, há uma diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor.

A uma velocidade entre 1,5 e 5% acima da velocidade síncrona, aproximadamente, o gerador de indução está fornecendo sua potência nominal. O gerador de indução não possui excitação própria, que deverá ser fornecida pelo sistema ao qual será ligado ou através de capacitores. A principal vantagem do gerador de indução reside no menor custo de aquisição, instalação e manutenção, pela inexistência da excitatriz, regulador de tensão, regulador de velocidade, equipamento de sincronização, requerendo um sistema de controle e proteção relativamente simples.⁽³⁴⁾

³³ **Máquinas Síncronas.** Apostila de Máquinas Elétricas, 2001, p.9. Disponível em <http://www.cpdee.ufmg.br/~gbarbosa/Disciplina%20de%20M%E1quinas%20El%E9tricas/Disciplina%20de%20M%C3%A1quinas%20El%C3%A9tricas/maquinas-sincronas.pdf>. Acessado em 15 nov. 2014.

³⁴ **LIMA, Roberth dos Santos. Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.4. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

As máquinas de indução possuem a vantagem de poder operar em sobrecarga, ou seja, acima de sua capacidade, e quando chega a um determinado valor acima de sua rotação, é rompido o campo do rotor com o estator, e o motor passa a operar como gerador.

2.SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento dos geradores em corrente alternada, como alternativa à transmissão em corrente contínua, obteve-se vantagens em termos técnicos e financeiros, como por exemplo, a transmissão a longas distâncias, “foi desenvolvida a partir do século XX, diferentes sistemas para sua excitação, pelo qual controlam as grandezas de uma máquina síncrona, tais como tensão, corrente, fator de potência e etc.”⁽³⁵⁾

Existem dois tipos básicos de sistema de excitação, os sistemas Rotativos, que são subdivididos pelo sistema de excitação com gerador de corrente contínua, este é um modelo mais antigo, e os sistemas de excitação com gerador de corrente alternada e retificador, usualmente chamada de Brushless, pois não necessitam de escovas. E existem também os sistemas Estáticos, formado por anéis coletores e escovas.

2.2 SISTEMA DE EXCITAÇÃO ROTATIVO COM GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Os sistemas de excitação tiveram uma considerável evolução desde as máquinas primitivas até as atuais, com equipamentos eletrônicos. Mas os primeiros sistemas clássicos consistiam em um “gerador de corrente contínua acoplado no eixo do gerador principal, necessitando, além do comutador da excitatriz, anéis

³⁵ **GOMES**, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.19. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

deslizantes no rotor do gerador principal, pois a tensão gerada se dá por meio de escovas, apesar da excitatriz ser rotativa,”⁽³⁶⁾ como mostra a *Figura 5*.

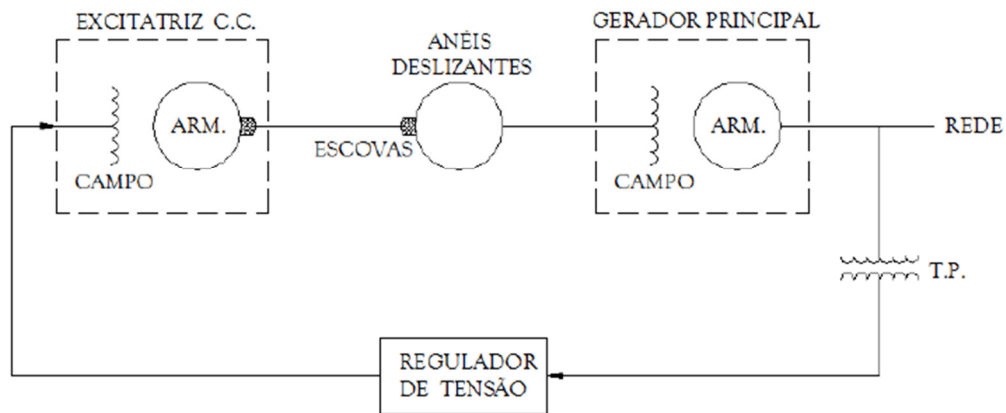


Figura 5: Sistema de excitação com excitatriz cc

Fonte: (GOMES, 2010, p.20)⁽³⁷⁾

Este sistema tem o inconveniente da conexão ser através das escovas e anéis deslizantes. No ANEXO A, temos um exemplo desse sistema.

“O gerador de corrente contínua pode ser dos tipos auto excitado (máquinas de pequeno porte) ou com excitação independente (máquinas de grande porte).”⁽³⁸⁾

Esse sistema por ser de corrente contínua, possui a potência nominal relativamente pequena. “A aplicação em unidades geradoras maiores exige a utilização de sistemas em cascata formados por uma excitatriz auxiliar e por uma excitatriz principal,”⁽³⁹⁾ como mostra a *Figura 6*.

³⁶ GOMES, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.19. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

³⁷ GOMES, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.20. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

³⁸ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.21. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

³⁹ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.21. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

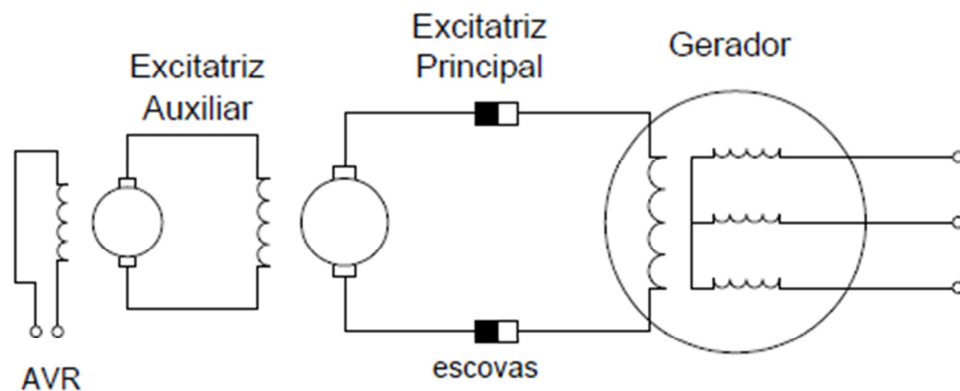


Figura 6: Sistema de excitação com excitatriz cc em cascata

Fonte: (CALSAN, 2011, p.21)⁽⁴⁰⁾

Mas nesta configuração há “problemas de comutação que limitam a aplicação deste tipo de configuração em geradores de porte mais elevado. A aplicação de cascata de geradores de corrente contínua deteriora a característica dinâmica da unidade geradora, devido à elevação da constante de tempo associada ao sistema de excitação.”⁽⁴¹⁾

Com o aumento da capacidade nominal dos geradores síncronos, o uso da excitatriz de corrente contínua passou a revelar algumas inconveniências, tais como:

- a) grandes números de escovas quando a corrente de excitação era muito alta;
- b) centelhamento no comutador em súbitas variações de carga;
- c) dificuldade em acoplar grandes máquinas de corrente contínua ao eixo do gerador, quando se trata de altas rotações;
- d) intensa manutenção de escovas e comutador.⁽⁴²⁾

Com isso, houve uma necessidade de intensificar estudos para a utilização de um sistema de excitação em corrente alternada e retificadores.

⁴⁰ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.21. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁴¹ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.21. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁴² GOMES, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.19. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

Inicialmente, foram utilizados sistemas com diodo de germânio, mas não satisfaziam a necessidade de grandes geradores, devido à baixa tensão reversa suportada pelos semicondutores. Mas com o desenvolvimento dos diodos de silício, os valores máximos de tensão reversa e corrente nominal passaram a ser satisfatórias.⁽⁴³⁾

Com esse avanço, novos modelos puderam ser desenvolvidos, melhorando assim a qualidade da energia e aumentando a abrangência para máquinas de maiores portes.

2.3 SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO UTILIZANDO TIRISTORES

Pelo fato dos geradores estarem interligados as suas cargas, eles sofrem muitas interferências causadas pela variação dessas cargas, e para corrigir essas variações passou a ser necessário utilizar um sistema de excitação que respondesse rapidamente a tais interferências, e isso só foi possível após a implantação dos tiristores para fazer a retificação da onda senoidal. “Com o uso de tiristores, o tempo de resposta do sistema de excitação foi reduzido consideravelmente, devido ao fato de que o único retardo existente está na filtragem da tensão terminal e o único atraso no disparo dos tiristores.”⁽⁴⁴⁾

Outra vantagem que esse sistema trouxe para os projetos é a “redução do comprimento total da unidade geradora, pois não há excitatriz piloto ou principal, diminuindo os problemas de alinhamento de eixos e mancais.”⁽⁴⁵⁾

Uma característica do sistema Estático é que em todas as configurações são “utilizados anéis coletores e escovas para a alimentação do campo do gerador

⁴³ **GOMES, Daniel Ribeiro. Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.20. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

⁴⁴ **GOMES, Daniel Ribeiro. Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.21. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

⁴⁵ **GOMES, Daniel Ribeiro. Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.21. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

através dos retificadores estáticos.”⁽⁴⁶⁾ Um esquema de um gerador que utiliza esse sistema é mostrado na *Figura 7*.

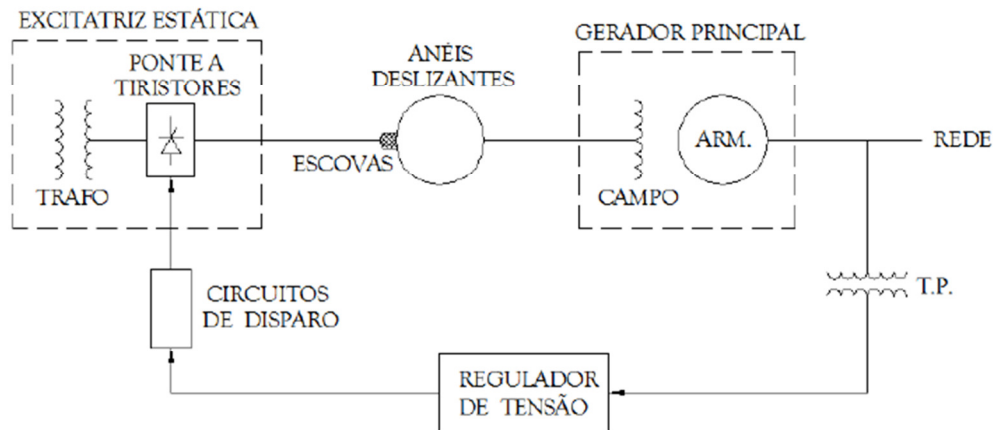


Figura 7: Sistema de Excitação com excitatriz Estática

Fonte: (GOMES, 2010, p.21)⁽⁴⁷⁾

Outra grande característica que esse sistema possui é a “rápida resposta, no caso de oscilações mecânicas de pequena magnitude e baixa frequência, frequentes em máquinas de grande porte.”⁽⁴⁸⁾ Mas pelo fato de ser controlada por tiristores, “haverá injeção de harmônicos na rede, que pode ser prejudicial em certos casos.”⁽⁴⁹⁾

Possui também a desvantagem de constantes paradas para manutenção do sistema, como limpeza de todo o conjunto devido aos desgastes das escovas, medições e controle do desgaste e substituição das escovas quando atingem

⁴⁶ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.23. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁴⁷ GOMES, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.21. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

⁴⁸ GOMES, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.21. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

⁴⁹ ALMEIDA, Alvaro Augusto. **Máquinas Síncronas Trifásicas-Notas de Aula**. 2013. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, p.18. Disponível em [http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos de Maquinas S%C3%ADncronas v2.pdf](http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos%20de%20Maquinas%20S%C3%ADncronas%20v2.pdf). Acessado em 10 mar. 2014.

determinado valor. Essas manutenções afetam diretamente a disponibilidade e geração de energia nas usinas que utilizam esse sistema.

Os sistemas de excitação estática podem ser classificados em três tipos:

- a) sistemas de excitação com retificadores controlados alimentados pelo barramento auxiliar da instalação;
- b) sistemas de excitação com retificadores controlados alimentados por transformador (ligado aos terminais do gerador);
- c) sistemas de excitação com retificadores controlados de alimentação composta (correntes e tensões terminais do gerador).⁽⁵⁰⁾

Cada tipo possui uma configuração com algumas diferenças, mas todas utilizam um transformador de excitação, escovas e anel coletor. O que irá mudar é a fonte utilizada para alimentação do campo da excitatriz. No *ANEXO B*, podemos ver um exemplo de uma excitatriz Estática.

2.3.1 Sistema alimentado por barramento auxiliar

As hidrelétricas possuem um sistema chamado de sistema auxiliar, este tem a função de alimentar todos os equipamentos de sua planta. Neste tipo de configuração “a alimentação do enrolamento de campo do gerador é realizada a partir do barramento auxiliar da usina, sendo a corrente contínua obtida por meio de tiristores estáticos controlados.”⁽⁵¹⁾ A seguir na *Figura 8*, podemos ver um esquema desse sistema.

⁵⁰ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.23. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁵¹ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.23. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

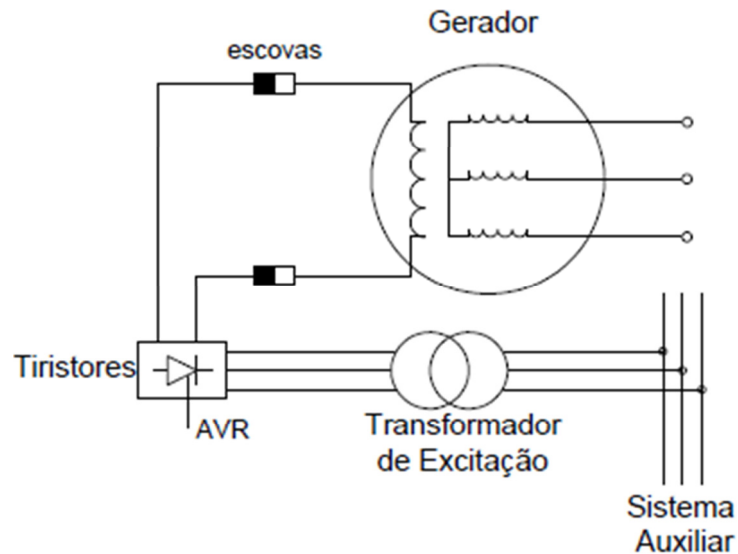


Figura 8: Sistema de Excitação Estático alimentado por barramento auxiliar

Fonte: (CALSAN, 2011, p.23) ⁽⁵²⁾

As tensões dos sistemas auxiliares de cada usina podem variar de acordo com cada sistema. Por isso os transformadores de excitação são empregados com a função de transformar os níveis de tensões dos serviços auxiliares para níveis de tensões aplicáveis em tais sistemas.

2.3.2 Sistema alimentado pelos terminais do gerador

Nesta configuração, utiliza-se a tensão proveniente do próprio gerador. “A alimentação do enrolamento de campo do gerador é feita a partir de um transformador conectado aos terminais do próprio gerador.”⁽⁵³⁾. Também utilizam tiristores estáticos para obter corrente contínua necessária, como mostra a *Figura 9*.

⁵² CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.23. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁵³ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.24. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

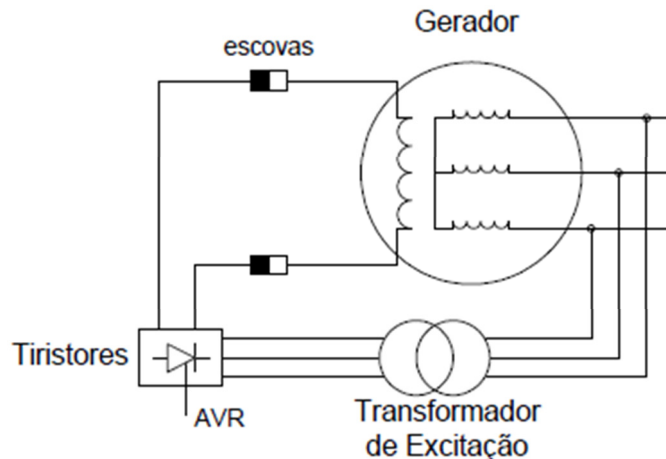


Figura 9: Sistema de excitação Estático alimentado pelos terminais do gerador

Fonte: (CALSAN, 2011, p.24) ⁽⁵⁴⁾

Nesta configuração, há a necessidade de ter uma fonte para criar o campo inicial do gerador denominado de pré-excitação. Geralmente essa fonte é proveniente do sistema de corrente contínua da usina. Esse campo será responsável por induzir uma tensão de saída nos terminais do gerador. Essa tensão por sua vez fará a alimentação do sistema de excitação, tornando assim um sistema auto excitado. A partir de então, a pré-excitação é eliminada do processo.

2.3.3 Sistema alimentado pela corrente e tensão do gerador

Neste tipo de configuração, a alimentação do enrolamento de campo do gerador se dá através de tiristores estáticos controlados, “alimentados simultaneamente pelo transformador de excitação e pelas correntes e tensões terminais do gerador, através do transformador de corrente, chamado de transformador compound (do inglês – composto).”⁽⁵⁵⁾ como mostra a *Figura 10*.

⁵⁴ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.24. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁵⁵ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.25. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

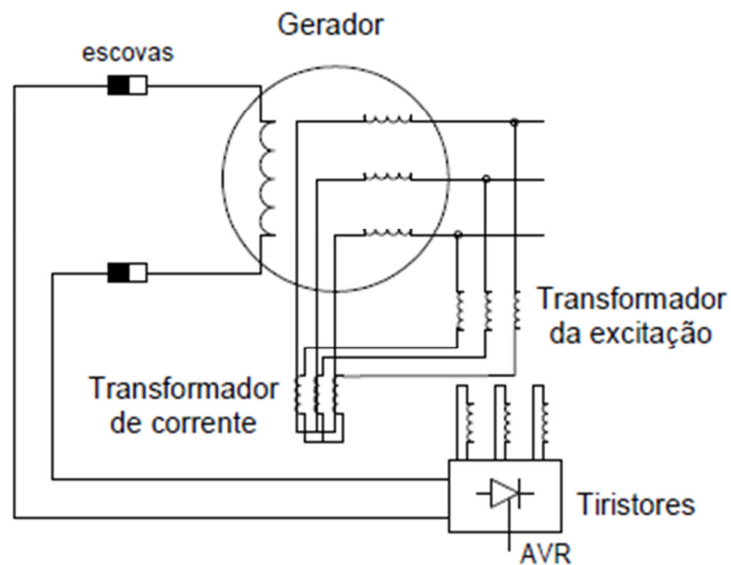


Figura 10: Sistema de excitação Estático com alimentação composta.

Fonte: (CALSAN, 2011, p. 25) ⁽⁵⁶⁾

Esse sistema também utiliza um transformador de excitação e anéis coletores, mas diferem dos demais pelo fato de utilizar como fonte tanto os terminais do gerador quanto o fechamento do estator.

Uma vantagem dessa configuração é que em caso de um curto-circuito próximo aos terminais do gerador, o transformador compound atua no sentido de não haver perda significativa de excitação devido à queda da tensão terminal do gerador, pois também existe uma alimentação pela corrente do gerador vinda deste que cresce durante o curto circuito. ⁽⁵⁷⁾

Essa vantagem pode ser uma alternativa para geradores que contribuem para a regulação do sistema, pois em caso de curtos circuitos transitórios, ele conseguirá manter os níveis de tensões sem grandes oscilações e sem a necessidade de desinterligar a máquina.

⁵⁶ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.25. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁵⁷ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.25. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

2.4 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO ROTATIVO COM GERADOR DE CORRENTE ALTERNADA (BRUSHLESS)

Esse sistema foi desenvolvido com o objetivo de eliminar a necessidade da utilização de anéis coletores e escovas para a alimentação do campo do gerador. “Isto já havia sido feito em aplicações menores, tais como motores para aviões, dando resultados satisfatórios. Em 1960, engenheiros da Westinghouse Electric Corporation introduziram o sistema sem escovas para geradores síncronos.”⁽⁵⁸⁾ No ANEXO C, há um exemplo desse sistema.

“Este é composto por um gerador trifásico de corrente alternada denominada de excitatriz principal”⁽⁵⁹⁾, possui como função alimentar o enrolamento de campo do gerador síncrono “e que pode ou não estar dentro do gerador principal,”⁽⁶⁰⁾ pelo qual irá induzir uma tensão alternada no estator.

2.4.1 Funcionamento

Este tipo de sistema possui o seguinte funcionamento:

O estator da excitatriz, neste caso, possui a função do enrolamento de campo e este, por sua vez, é alimentado por uma fonte de corrente contínua, controlado pelo regulador de tensão.

O campo magnético gerado pelos enrolamentos do estator da excitatriz é induzido no rotor da excitatriz, que possui um enrolamento trifásico ligado em

⁵⁸ COSTA, Antônio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**, notas de aula, UFSC, 2002. p.109. Disponível em <http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/dincont/dc-cap5.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

⁵⁹ CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.22. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁶⁰ WEG, Manual de Instalação, Operação e Manutenção de Geradores Síncronos Linha S. 2010, p.16. Disponível em www.weg.com.br. Acessado em 31 ago. 2014.

estrela, que é o responsável por gerar a corrente alternada e, está interligado ao conjunto de retificadores girantes.

“O conjunto retificador é composto por seis diodos,”⁽⁶¹⁾ que “são responsáveis por retificar em onda completa a tensão alternada gerada e, estes são interligados ao rotor do gerador síncrono.”⁽⁶²⁾ como mostra a *Figura 11*.

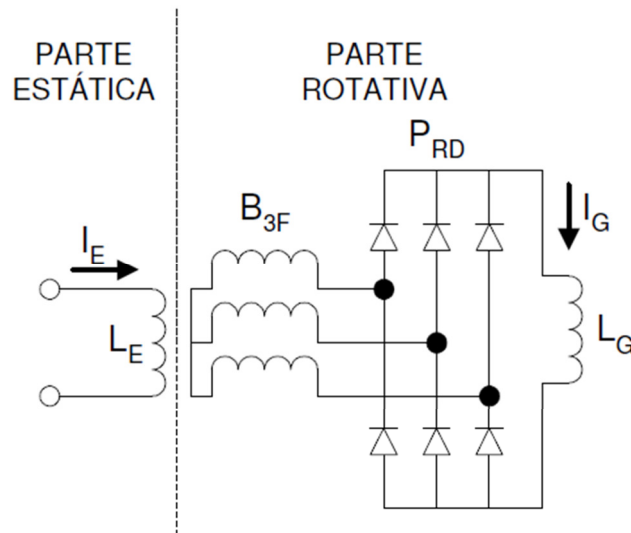


Figura 11: Sistema de excitação Brushless

Fonte: (GALVÃO JUNIOR, 2007, p.12)⁽⁶³⁾

Onde:

I_E : corrente no campo da excitatriz;

L_E : campo da excitatriz (parte estática);

B_{3F} : conjunto trifásico de bobinas (Parte rotativa);

P_{RD} : ponte trifásica rotativa a diodos;

L_G : campo do gerador principal.

⁶¹ WEG, Manual de Instalação, Operação e Manutenção de Geradores Síncronos Linha S. 2010, p.16. Disponível em www.weg.com.br. Acessado em 31 ago. 2014.

⁶² PINHEIRO, Hélio. **Máquinas e Acionamentos Elétricos - Geradores de corrente alternada**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Norte. p.12. Disponível em <http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc/view>. Acessado em 18 mar. 2014.

⁶³ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.12. Disponível em [http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select action=&co obra=89010](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select%20action=&co%20obra=89010). Acessado em 5 mar. 2014.

A utilização deste retificador elimina o uso de anéis e escovas, no entanto, a corrente do enrolamento de campo do gerador principal só pode ser controlada indiretamente, através do controle de campo da máquina CA. Isto introduz uma constante de tempo que em média, está na ordem de 0,5 a 1,0 segundo no sistema de controle da excitação.⁽⁶⁴⁾

Este tipo de sistema de excitação é muito utilizado “em máquinas de pequeno porte de até 100MVA,”⁽⁶⁵⁾. Pelo fato das PCH’s possuírem potência entre 1 a 30MW, “a grande maioria de seus geradores possui excitação Brushless”.⁽⁶⁶⁾ Tornando-se vantajoso “sob o aspecto econômico para geradores com rotação nominal acima de 200 rpm,”⁽⁶⁷⁾ ou seja, para geradores que possuem números de polos igual ou inferior a 36, podendo ser calculado de acordo com a *Equação 2*:

$$v_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Equação 2: Cálculo da velocidade síncrona

Onde:

v_s = velocidade síncrona;

f = frequência;

p = número de polos.

⁶⁴ **CALSAN, Marcelo. Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas, p.22. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

⁶⁵ **ALMEIDA, Alvaro Augusto. Máquinas Síncronas Trifásicas-Notas de Aula.** 2013. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, p.16. Disponível em [http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos de Maquinas S%C3%ADncronas v2.pdf](http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos%20de%20Maquinas%20S%C3%ADncronas%20v2.pdf). Acessado em 10 mar. 2014.

⁶⁶ **GOMES, Daniel Ribeiro. Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.26. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

⁶⁷ **ELETROBRÁS.** Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas-Equipamentos Eletromecânicos. p.18. Disponível em <http://www.eletronbras.com/ELB/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>. Acessado em 10 mar. 2014.

2.4.2 Principais componentes de um Sistema de Excitação Brushless

No sistema de excitação Brushless, pode-se encontrar configurações diferentes, como por exemplo no caso de se utilizar um transformador de excitação ou utilizar uma fonte externa. Usualmente, os principais componentes deste sistema são:

- a) transformador de excitação;
- b) ponte retificadora não-controlada trifásica;
- c) regulador de tensão.⁽⁶⁸⁾

Abaixo será descrito sobre cada um desses componentes do sistema de excitação Brushless. Vale ressaltar que há configurações em que não se utiliza o transformador de excitação.

2.4.2.1 Transformador de Excitação

Os transformadores de excitação são utilizados para transformar a tensão de uma determinada fonte a um valor desejado, para posteriormente ser utilizado na excitação. Geralmente o primário é conectado na saída da máquina ou a um barramento, e o secundário a uma ponte retificadora trifásica não-controlada.

Em sistemas Brushless, quando ocorrer uma falta no sistema elétrico, “a tensão deve atingir entre 150% e 160% do valor da tensão nominal do campo da excitatriz.”⁽⁶⁹⁾

⁶⁸ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.13. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&co_obra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

⁶⁹ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.13. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&co_obra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

Por isso, ao se projetar um transformador, deve levar em consideração essa tensão atingida nos seus terminais secundários.

Este nível de tensão, denominado tensão de ceiling, pode ser aplicado ao campo durante um período de aproximadamente 10 segundos, mediante a ação automática do regulador de tensão empregado. É importante observar que esta condição é válida somente para os sistemas de excitação Brushless.⁽⁷⁰⁾

Os transformadores de excitação são construídos normalmente a seco e podem ou não possuir proteção, isso vai depender do investimento do empreendimento.

2.4.2.2 Ponte retificadora não-controlada trifásica

Diferentemente do sistema Estático, onde os disparos dos tiristores são através da variação do ângulo em uma ponte retificadora controlada, nos sistemas Brushless, “o sinal trifásico do secundário do transformador de excitação é retificado por uma ponte trifásica a diodos, ou seja, não-controlada. Assim, a tensão contínua da saída do retificador é variada de acordo com as necessidades operacionais do sistema de excitação.”⁽⁷¹⁾ como mostra a *Figura 12*.

⁷⁰ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.13. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&co_obra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

⁷¹ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.14. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&co_obra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

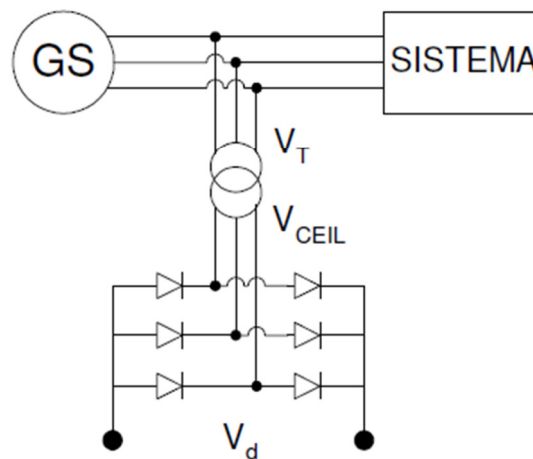


Figura 12: Sistema de alimentação do campo da excitatriz

Fonte: (GALVÃO JUNIOR, 2007, p.14)⁽⁷²⁾

- a) V_T : tensão terminal do gerador;
- b) V_{CEIL} : tensão ceiling;
- c) V_d : tensão CC na saída da ponte retificadora.

2.4.1.3 Regulador de Tensão

O regulador de tensão tem por finalidade manter os valores de tensão a níveis desejados no campo do gerador principal.

Quando a unidade geradora está conectada a um sistema isolado, o regulador de tensão regula a tensão a valores estabelecidos dentro de uma tolerância. “O tempo de resposta do sistema de regulação deve ser suficientemente curto, para que as cargas supridas pelo sistema não sofram danos provocados pelas oscilações de tensões. Estas oscilações são, na maioria dos casos, ocasionadas pela aleatoriedade própria das cargas de um sistema.”⁽⁷³⁾

⁷² GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.14. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&coobra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

⁷³ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.17. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&coobra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

Basicamente, o controle da tensão é feita pelo seguinte modo:

o valor da tensão do secundário do TP é condicionado para um valor de projeto, para então ser comparado a um valor de referência definido durante a configuração do regulador. A partir do resultado desta comparação, a atuação se faz através da técnica inerente à tecnologia matemática de controle PID, associado à tecnologia do microcontrolador programável empregado.⁽⁷⁴⁾

Mas, se a unidade geradora estiver conectada em paralelo com a rede,

o regulador tem por finalidade atuar no controle da potência reativa trocada entre o gerador e a rede. Sendo assim, a diferença preponderante existente entre estes dois modos operacionais está na realimentação e na configuração do valor de referência. No entanto, as ações da malha de controle, do microcontrolador e do circuito eletrônico são semelhantes,⁽⁷⁵⁾

Em consequência, o regulador irá manter a estabilidade e a qualidade da energia do sistema em que está inserido.

2.4.3 Vantagens e desvantagens

O sistema de excitação Brushless ao ser desenvolvido, apresentou algumas vantagens significativas, que são:

- a) não necessita de escovas e anéis coletores;
- b) não ocorrem interferências geradas por mau contato;
- c) tem manutenção reduzida, precisando apenas de lubrificar os rolamentos;
- d) permite fácil controle manual;⁽⁷⁶⁾

⁷⁴ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.17. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&coobra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

⁷⁵ GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.17. Disponível em http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detalhe_ObraForm.do?select_action=&coobra=89010. Acessado em 5 mar. 2014.

⁷⁶ MARQUES, Victor Emanuel Lima. **Ajuste de parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação, recorrendo a resposta em frequência do modelo**. 2011. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, p.26. Disponível em <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63431/1/000149243.pdf>. Acessado em 5 mar. 2014.

e) possui uma tensão CC injetada no campo do gerador mais limpa, pois é apenas retificada em onda completa e com menor conteúdo de harmônico em relação à tensão de uma excitatriz estática.⁽⁷⁷⁾

Mas este sistema também apresenta algumas desvantagens que precisam ser levadas em consideração ao se optar pela utilização, que são:

- a) conjunto retificador fica submetido a grandes forças centrífugas;
- b) tempo de resposta na elevação da tensão de excitação baixa.⁽⁷⁸⁾

A diminuição desse tempo causa menor desempenho nas retomadas em casos de queda de tensão.

2.5 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS POR ÍMÃ PERMANENTE (PMG)

Há também outra configuração de sistema Brushless que não utiliza os enrolamentos de campo, mas sim se utiliza ímãs para criação do campo magnético.

“Em máquinas de pequena potência é possível substituir os enrolamentos de excitação por ímãs permanentes. Perde-se assim um grau de liberdade (a possibilidade de controlar a corrente de campo), mas ganhasse em compacticidade e simplicidade.”⁽⁷⁹⁾ Nesse tipo de configuração torna ainda mais lenta as retomadas de tensão, haja vista que não é possível controlar a corrente de campo pelo fato dos ímãs serem pré-dimensionados.

“Trata-se de um sistema de excitação onde uma excitatriz auxiliar, constituída por um campo magnético constante produzido por uma peça magnetizada antes da montagem (ímã permanente), a qual funciona como indutor girando no interior de um

⁷⁷ ALMEIDA, Alvaro Augusto. **Máquinas Síncronas Trifásicas-Notas de Aula**. 2013. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, p.19. Disponível em [http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos de Maquinas S%C3%ADncronas v2.pdf](http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos%20de%20Maquinas%20S%C3%ADncronas%20v2.pdf). Acessado em 10 mar. 2014.

⁷⁸ MARQUES, Victor Emanuel Lima. **Ajuste de parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação, recorrendo a resposta em frequência do modelo**. 2011. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, p.26. Disponível em <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63431/1/000149243.pdf>. Acessado em 5 mar. 2014.

⁷⁹ MARQUES, Gil. **Máquinas Síncronas**, 2011. p.5. Disponível em <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasco/CEE-CAP%202.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

enrolamento fixo (armadura do PMG), este trabalhando como induzido.”⁽⁸⁰⁾ Neste sistema, a energia não depende da energia fornecida à carga. Pode-se dizer que é um sistema de excitação independente.

O sistema mostrado consiste de uma excitatriz de corrente alternada e um retificador rotativo montado no mesmo eixo do turbo-gerador. Também montado no mesmo eixo está um gerador a ímã permanente, cujo sinal de saída é retificado e comparado, no regulador de tensão, com o sinal retificado da tensão terminal. O erro resultante alimenta o campo da excitatriz de corrente alternada, a qual se assemelha a uma máquina de corrente contínua sem comutador, com enrolamento de campo no estator e armadura no rotor. A saída da armadura rotativa da excitatriz de corrente alternada é conduzida ao longo do eixo para o retificador rotativo, a saída do qual, por sua vez, alimenta o campo do gerador, ainda ao longo do eixo.⁽⁸¹⁾

Abaixo na *Figura 13*, é mostrado um esquema representativo da configuração do sistema PMG.

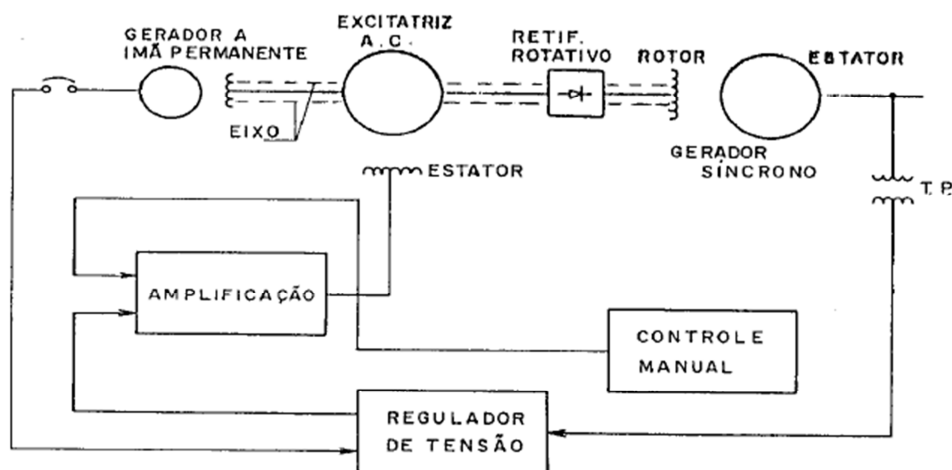


Figura 13: Sistema de Excitação Brushless por ímã permanente (PMG)

Fonte: (COSTA, 2002, p.109)⁽⁸²⁾

No ANEXO D, temos uma imagem do sistema PMG.

⁸⁰ ENERGISA, Treinamento em Operação de Usinas, p.38.

⁸¹ COSTA, Antônio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**, notas de aula, UFSC, 2002. p.109. Disponível em <http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/dincont/dc-cap5.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

⁸² COSTA, Antônio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**, notas de aula, UFSC, 2002. p.109. Disponível em <http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/dincont/dc-cap5.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

2.6 TEMPO DE REGULAGEM DA TENSÃO (TEMPO DE RESPOSTA)

Pode-se dizer que o tempo de resposta de um sistema de excitação compreende-se como “o tempo transcorrido desde o início de uma queda de tensão até o momento em que a tensão volta ao intervalo de tolerância estacionária (por exemplo + ou - 0,5%) e permanece na mesma,”⁽⁸³⁾ como mostra a *Figura 14*.

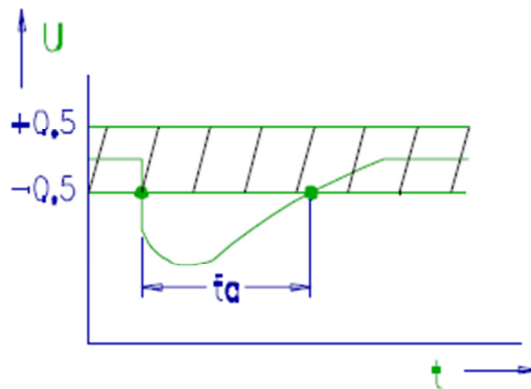


Figura 14: Tempo de regulagem da tensão

Fonte: (WEG, p.23)⁽⁸⁴⁾

Como podemos observar, o (t_a) representa todo o tempo de resposta que um sistema levou para se recompor.

“O tempo exato de regulagem depende na prática de inúmeros fatores. Portanto só pode ser indicado aproximadamente.”⁽⁸⁵⁾ Na *Figura 15*, podemos ter uma indicação aproximada da comparação dos tempos de resposta do sistema com escovas em relação do sistema sem escova “para os degraus de cargas nominais. Em condições diferentes da acima, os tempos podem ser calculados

⁸³ WEG, Características e Especificações de Geradores, p.23. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acessado em 12 nov. 2014.

⁸⁴ WEG, Características e Especificações de Geradores, p.23. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acessado em 12 nov. 2014.

⁸⁵ WEG, Características e Especificações de Geradores, p.23. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acessado em 12 nov. 2014.

proporcionalmente a queda de tensão,⁽⁸⁶⁾ variando de acordo com nível de afundamento da tensão.

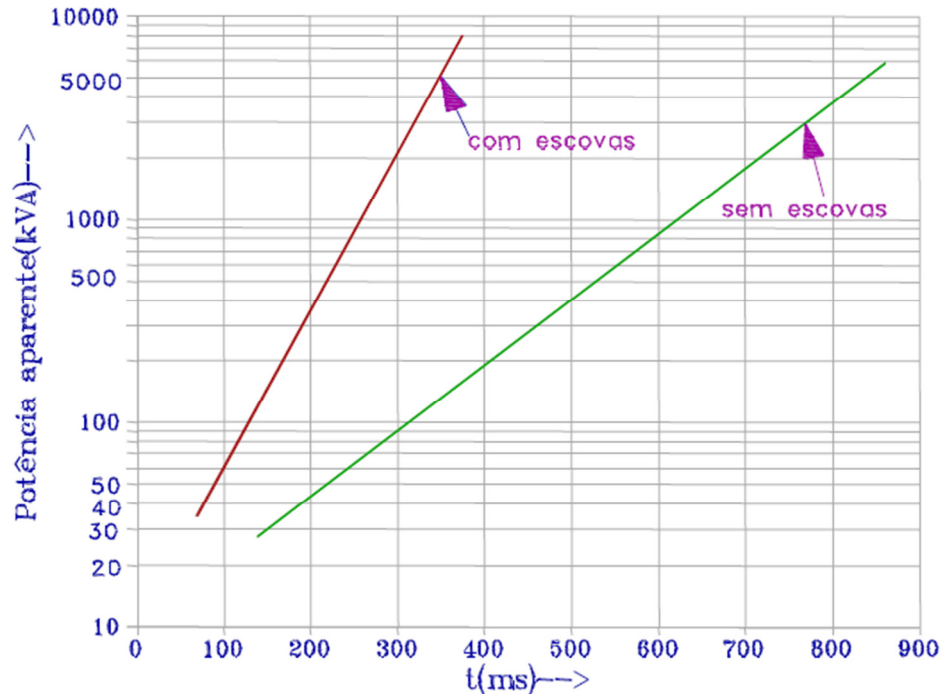


Figura 15: Tempo de resposta

Fonte: (WEG, p.24)⁽⁸⁷⁾

Como demonstrado e já citado, o sistema Estático que faz uso de escovas atingiu o mesmo patamar de carga que o sistema sem escovas (brushless) em um período de tempo menor, o que comprova a vantagem que esse sistema possui quando levado em consideração esse fator.

⁸⁶ WEG, Características e Especificações de Geradores, p.23. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acessado em 12 nov. 2014.

⁸⁷ WEG, Características e Especificações de Geradores, p.24. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acessado em 12 nov. 2014.

3. ESTUDO DE CASO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será realizada uma análise dos problemas encontrados no sistema de excitação Estático da Pequena Central Hidrelétrica Areia Branca.

Serão levantadas e descritas todas as ocorrências deste sistema de excitação, também serão demonstrados todos os gastos que envolvem a manutenção do mesmo e as perdas de receitas devido à parada das unidades geradoras, a partir de então, será apresentado uma sugestão técnica que poderá ser aplicada na PCH Areia Branca e em geral, em todas as PCH's, diminuindo as manutenções e aumentando a disponibilidade.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO

A PCH Areia Branca está localizada no município de Caratinga – Minas Gerais. Utiliza o potencial hídrico do Rio Manhuaçu, rio este que compõem a bacia hidrográfica do Rio Doce. Sua instalação é composta por duas unidades geradoras com turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical e geradores síncronos de potência de 9,9MW, totalizando uma potência instalada de 19,8MW, de propriedade da empresa Tractebel Energia S.A.

A PCH Areia Branca iniciou suas atividades comerciais no dia 10/03/2010, quando suas Unidades Geradoras 1 e 2 foram sincronizadas e inseridas no sistema da CEMIG através de uma linha de transmissão de 69kV.

3.2.1 Geradores

Os geradores da PCH Areia Branca possuem as seguintes grandezas elétricas:

- a) Potência Nominal – 11MVA
- b) Fator de Potência – 0,9
- c) Tensão Nominal – 13800V
- d) Corrente Nominal – 460 A
- e) Rotação nominal – 360RPM
- f) Rotação de Disparo – 972RPM
- g) Frequência – 60hz
- h) Conexão do Estator – Estrela
- i) Ano de fabricação – 2008
- j) Tensão nominal de excitação – 125vcc
- k) Corrente Nominal de excitação – 721A
- l) Norma de fabricação – ABNT / ANSI / IEC

3.3 SISTEMA DE EXCITAÇÃO DA PCH AREIA BRANCA

Os geradores síncronos da PCH Areia Branca possuem um sistema de excitação do tipo Estático, e este é composto pelos seguintes componentes por UG:

- a) 2 anéis coletores;
- b) 1 contator de campo;
- c) 1 contator de pré-excitação;
- d) 20 escovas;
- e) 1 ponte de Tiristores;
- f) 1 regulador automático de tensão;
- g) 1 transformador de excitação;

Na *Figura 16*, é mostrado o layout da excitatriz Estática da usina, podemos identificar o anel coletor e as escovas.

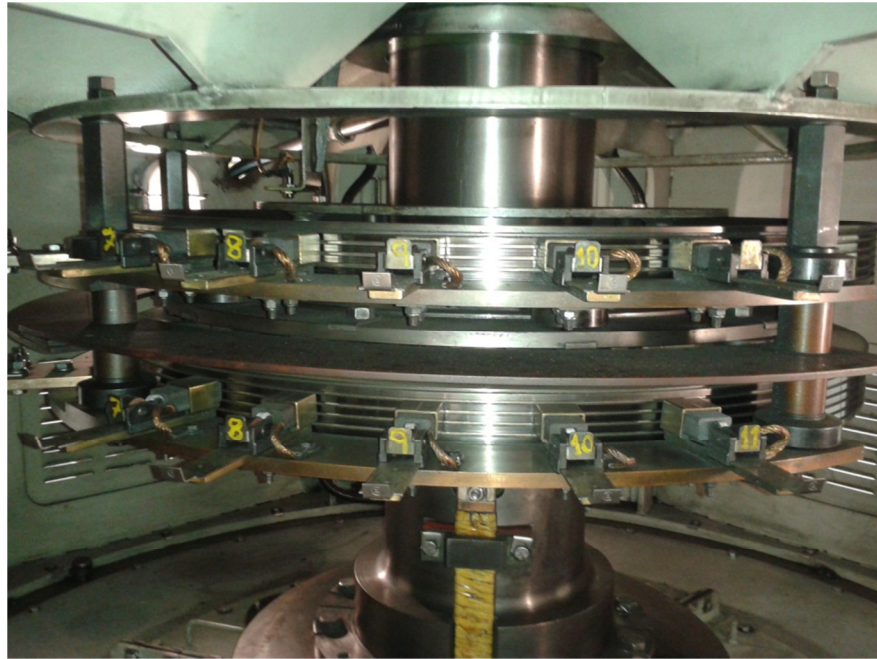


Figura 16: Excitatriz Estática da PCH Areia Branca

Fonte: (Autoria Própria)

3.3.1 Funcionamento

O funcionamento do sistema de excitação do empreendimento se dá do seguinte modo:

Após a UG entrar em giro mecânico e atingir sua velocidade nominal de 360 RPM, o contator de pré-excitação é fechado automaticamente pelo PLC, com isso uma tensão de 125Vcc proveniente do QDGCC é aplicada nas escovas, que pelo fato de estarem em contato mecânico com o anel coletor transmitem essa tensão até os polos do rotor do gerador criando um campo magnético nesses polos, estes, pelo fato de estarem em movimento fazem com que este campo varie no tempo e consequentemente essa variação causa uma indução de tensão alternada no estator do gerador, tensão esta de valor nominal igual 13,8kV. A partir deste momento esta tensão de 13,8kV é transformada através do transformador de excitação para 145V, que por sua vez, é transmitida a ponte de tiristores, onde ela é retificada. Em seguida ocorre o fechamento do contator de excitação e a abertura do contator de pré-excitação, com isso a tensão da própria máquina passa a alimentar a excitação. Abaixo na *Figura 17* é mostrado o diagrama das UG's.

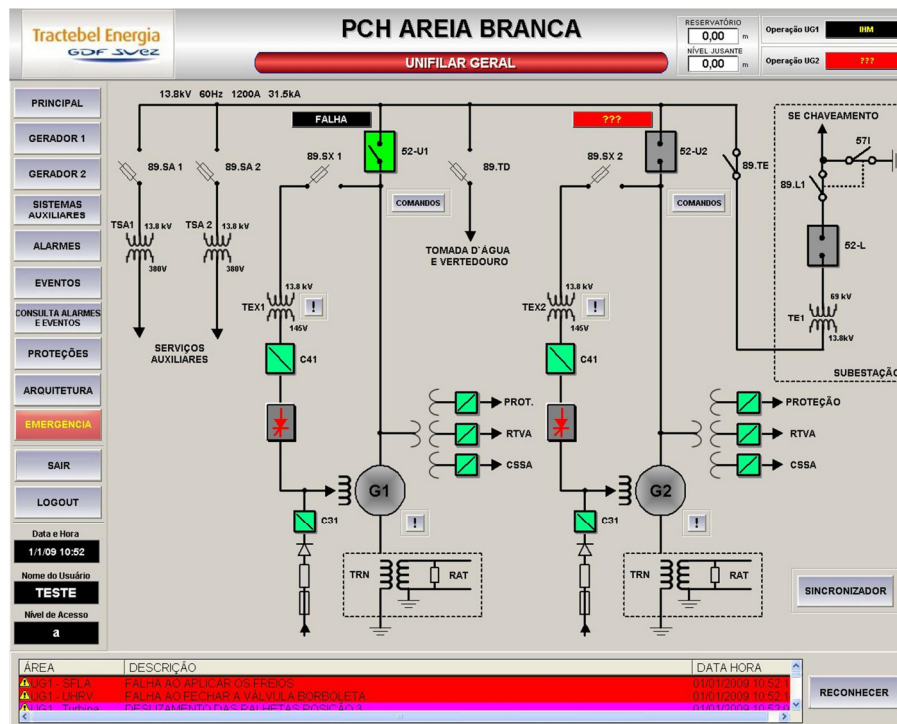


Figura 17: Diagrama Unifilar das UG's

Fonte: (Acervo técnico da PCH Areia Branca)

Na figura anterior, temos a representação do diagrama unifilar da usina, onde estão representadas as duas unidades geradoras G1 e G2, o C31 representa o contator de pré-excitação, a 89SX1 representa a seccionadora de excitação, que em casos de manutenção irá isolar o transformador de excitação representado como TEX1 e por fim o C41 representando o contator de campo juntamente com a ponte de tiristores.

3.3.2 Manutenções do Sistema Estático da PCH Areia Branca.

Devido ao fato de se utilizar escovas como forma de contato entre a parte girante (anel coletor) e fixa (alimentação CC provenientes dos tiristores), há necessidade de realizar manutenções periódicas neste sistema. Essas escovas são de material eletrográfica, com as dimensões 2cm x 3,2cm x 7,6cm e devido ao atrito mecânico entre a parte fixa e a rotativa, ocorre um desgaste natural,

desprendendo limalhas de grafite. O acúmulo excessivo dessas limalhas ocasiona a diminuição da resistência elétrica entre o rotor e o eixo do gerador, partes essas que são isoladas uma da outra, o que conseqüentemente causa a atuação de uma proteção denominada “Terra Rotor”. Quando ocorre tal atuação, há a necessidade de parar a UG para realizar a limpeza das escovas e anel coletor, mas como planejamento preventivo, essa limpeza é realizada muitas das vezes antes da atuação dessa proteção, aumentando ainda mais as paradas. Na *Figura 18*, podemos ver as escovas com excesso de limalhas, tendo a necessidade de realizar limpeza.

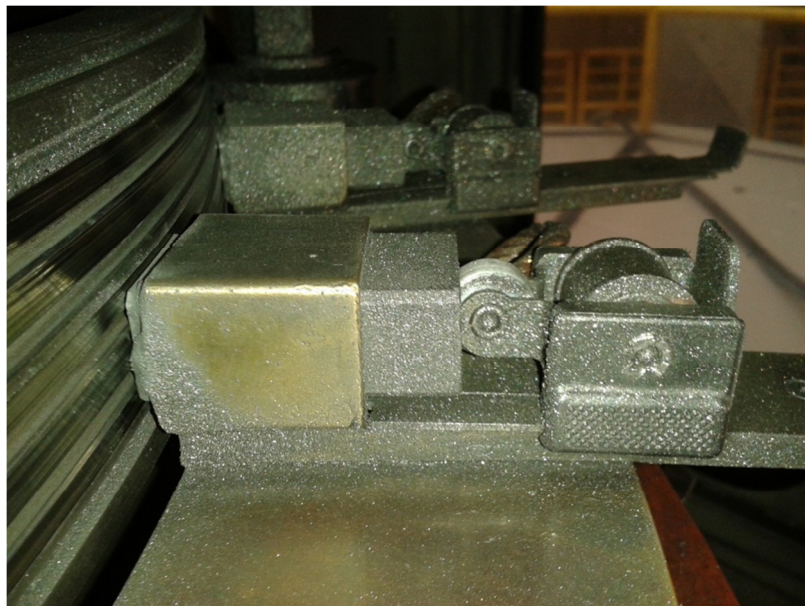


Figura 18: Desgaste das escovas

Fonte: (Autoria Própria)

Quando é possível conciliar a parada da UG por outros motivos, seja por manutenção ou por baixa afluência, é aproveitado à parada e realizado a limpeza. Mas nos períodos chuvosos é a época em que a UG mais trabalha, e conseqüentemente haverá um maior desgaste. Então quando atua a proteção “Terra Rotor”, é necessário desligar a máquina e realizar a limpeza de todo o conjunto.

Esse sistema utilizado na PCH também apresenta a inconveniência da necessidade de se fazer um acompanhamento constante quanto ao desgaste dessas escovas, pois há um limite de utilização, que quando alcançado, é necessário sua substituição, isso tudo causa uma perda de geração e disponibilidade das UG's.

Outra manutenção necessária neste sistema da PCH Areia Branca são as alterações dos números de escovas. Quando a UG está operando na potência nominal de 9,9MW, a corrente de excitação é de aproximadamente 520A. Nesta magnitude de corrente, com a utilização de 10 escovas por anel, a densidade de corrente nas escovas é de 8,12A/cm². Nestas proporções a densidade está dentro da especificação estipulada pelo fabricante (8 a 12A/cm²), conforme destacado na tabela do ANEXO E.

Sendo assim, de acordo com a *Equação 3*, podemos determinar a densidade de corrente nas escovas.

$$d = \frac{IE}{s \times n}$$

Equação 3: Densidade de corrente

Fonte: (Acervo técnico da PCH Areia Branca)

Onde:

d = densidade de corrente;

I_E = corrente no campo da excitação;

s = área de contato da escova;

n = número de escovas por anel.

Mas quando se prevê um longo período no qual a UG permanecerá operando com a carga inferior ao valor nominal, o número de escovas deverá ser reduzido, como por exemplo, operando com 5MW, o número de escovas deverá ser reduzido para apenas 6 escovas por anel, devendo a manutenção retirá-las, mantendo assim a densidade de corrente nas escovas dentro da faixa recomendada.

3.4 PERDAS DECORRENTES À MANUTENÇÃO PREVENTIVA E CORRETIVA DO SISTEMA ESTÁTICO DA PCH AREIA BRANCA

Além dos problemas comuns que todo o sistema de excitação Estático apresenta, como limpeza e troca das escovas, na PCH Areia Branca ainda ocorreu

um mais grave que impactou de grande forma na disponibilidade de geração da usina, foi à queima de dois transformadores de excitação.

Este defeito fez com que as unidades geradoras permanecessem paradas por muitos dias, na primeira queima, a UG permaneceu indisponível por 60 dias e na segunda queima, ficou indisponível por 45 dias, o que ocasionou uma perda na geração muito grande, pois devido ao custo do equipamento, não havia um reserva. Abaixo na *Tabela 1*, podemos ver as perdas que essa queima originou, considerando a potência nominal de 9,9MW e que o valor médio do MW/h no período “estava em torno de R\$159,00.”⁽⁸⁸⁾

	Horas de indisponibilidade (H)	Perda geração (MW)	Perda Monetária (R\$)
1ª queima	1.430,00	14.177,00	2.250.963,00
2ª queima	1.088,00	10.771,20	1.712.620,80
Total	2.518,00	24.928,20	3.963.583,80

Tabela 1: Perdas pela queima dos transformadores

Fonte: (Autoria Própria)

Foi necessário adquirir dois novos transformadores para realizar a substituição, custando cerca de R\$ 25.360,00 cada um. Além destes dois gastos descritos anteriormente, este problema ocasionou outro gasto considerável, pois foi necessário contratar uma empresa especializada com um custo de R\$ 6.892,96 para fazer a análise do regulador de tensão e das pontes de tiristores, com intuito de detectar se a queima era proveniente de alguma falha desses equipamentos.

Abaixo na *Tabela 2*, podemos ver os custos com a compra dos transformadores e a contratação da empresa especializada.

⁸⁸ **MME.** Ministério de minas e energia - PROINFA, 2014, p.31. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/PROINFA-ANEXO1-InstitucionalMME.pdf>. Acessado em 14 nov. 2014.

Gastos	Valor (R\$)
Aquisição dos transformadores	50.720,00
Empresa contratada	6.892,96
Total	57.612,96

Tabela 2: Gastos devido à queima dos transformadores de excitação

Fonte: (Autoria Própria)

Durante esses quase cinco anos em que o empreendimento se encontra em operação, foram registradas 35 Permissões de Trabalho (PT) para realização de manutenções no sistema de excitação. Destas 35 manutenções, 12 foi necessária realizar a troca de escovas, totalizando até então 44 escovas trocadas.

Até o presente momento, foram adquiridas 44 novas escovas para peças sobressalentes, custando cerca de R\$ 84,97 cada uma, totalizando um custo de R\$ 3.738,68 na compra dessas escovas.

O homem – hora (HH) empregado nestas manutenções soma-se um total de 200 horas, cerca de 25 dias trabalhados em prol deste sistema, considerando o valor médio do HH em torno de R\$ 51,79, obteve-se um custo total de R\$ 10.358,00. Na *Tabela 3* podemos ver os gastos com a manutenção e compra das escovas.

Gastos	Valor (R\$)
Manutenção preventiva das escovas	10.358,00
Aquisição de escovas	3.738,68
Total	14.096,68

Tabela 3: Gastos com manutenção e aquisição de escovas

Fonte: (Autoria própria)

Devido a essas manutenções, houve uma perda de geração de 93 horas, deixando de gerar 920,70MW, e uma perda monetária de R\$ 146.391,30, como mostra a *Tabela 4*.

Perdas	Valor
Indisponibilidade por manutenção das escovas (H)	93,00
Perdas de geração (MW)	920,70
Perdas monetárias (R\$)	146.391,30

Tabela 4: Prejuízo devido manutenção das escovas

Fonte: (Autoria própria)

O total de horas contabilizadas de máquina parada devido à queima dos transformadores de excitação e as paradas para manutenção das escovas e anel coletor soma-se 2611 horas, o que representa 108,79 dias de indisponibilidade de geração.

Em termos de geração, como uma unidade geradora tem a capacidade de gerar 9,9 MW/h, foram deixados de gerar cerca de 25.848,9MW, considerando que o valor médio do MW/h no período “estava em torno de R\$ 159,00”⁽⁸⁹⁾, foram deixados de serem faturados cerca de R\$ 4.109.975,10.

Somando o que foi deixado de gerar mais os custos com a manutenção, até o momento a PCH Areia Branca obteve um prejuízo em torno de R\$ 4.181.684,74, como mostra a *Tabela 5*, por estar utilizando um sistema de excitação Estático.

Indisponibilidade (H)	2611
Perda Geração (MW)	25.848,90
Perda Geração (R\$)	4.109.975,10
Gastos com manutenção (R\$)	10.358,00
Aquisição dos transformadores (R\$)	50.720,00
Aquisição de escovas (R\$)	3.738,68
Empresa contratada (R\$)	6.892,96
Prejuízo total (R\$)	4.181.684,74

Tabela 5: Perdas totais na PCH Areia Branca

Fonte: (Autoria Própria)

⁸⁹ **MME.** Ministério de minas e energia - PROINFA, 2014, p.31. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/PROINFA-ANEXO1-InstitucionalMME.pdf>. Acessado em 14 nov. 2014.

Abaixo no *Gráfico 1*, nos mostra todos os gastos que envolveram o sistema de excitação Estático da PCH Areia Branca.

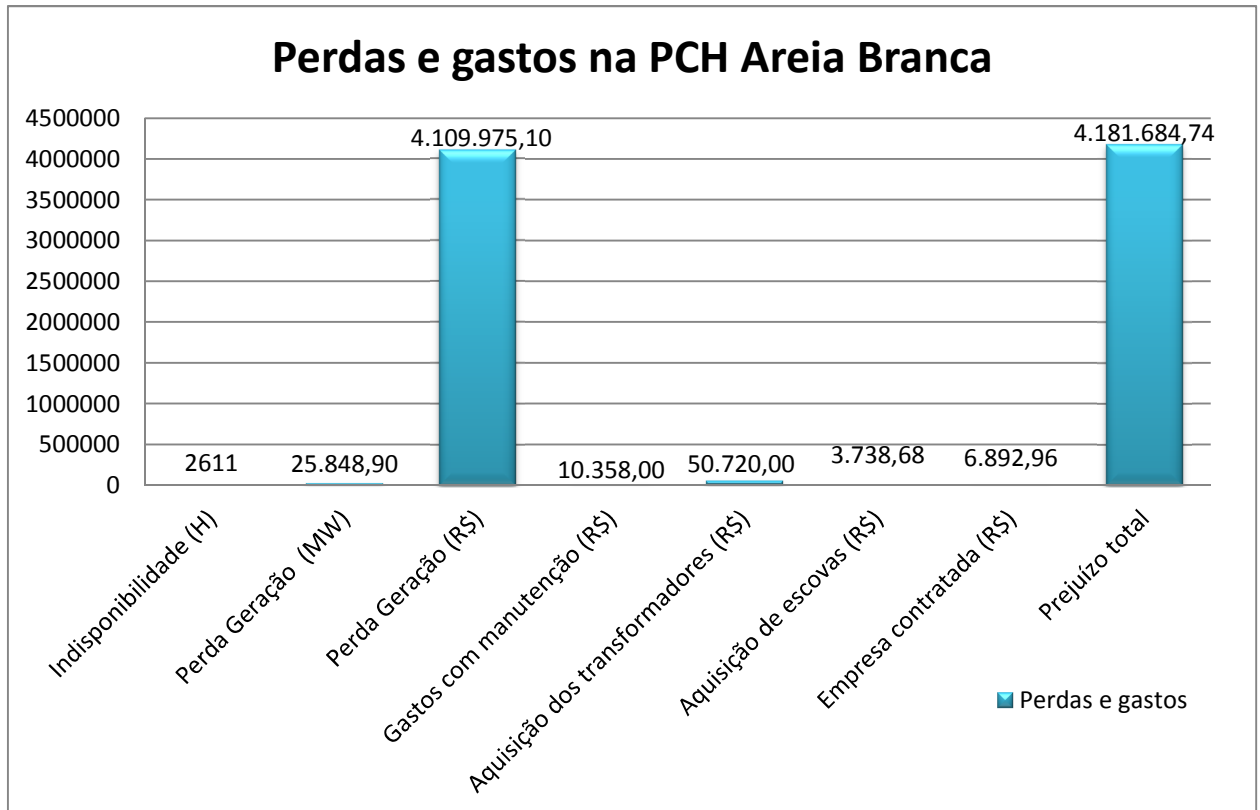


Gráfico 1: Perdas e gastos na PCH Areia Branca

Fonte: (Autoria Própria)

3.5 SOLUÇÃO PROPOSTA

Em decorrência de todos os problemas que o sistema de excitação da PCH Areia Branca vem apresentando nesses quase cinco anos de operação, pode-se dizer em pouco tempo que está em funcionamento e, também pelos altos valores que foram deixados de faturar, iniciou-se a indagação do por que não modificar tal sistema.

Com base nos estudos realizados sobre os tipos de sistemas de excitação e suas aplicações, concluímos que o sistema Brushless, para aplicação em PCH's, foi o que apresentou maiores benefícios, levando em conta seu baixo índice de parada para manutenção. Com isso podemos observar que com a substituição do sistema

de excitação Estático que é atualmente utilizado na PCH, por um sistema Brushless que não utilize transformador de excitação, estaríamos eliminando todos os problemas que foram descritos anteriormente.

Apesar de o sistema Brushless apresentar uma resposta mais lenta na elevação de tensão em decorrência de distúrbios, este fator não traria nenhum empecilho de aplicação neste empreendimento, pois pelo fato de se tratar de uma PCH, esta não trabalha em rede isolada, ou seja, mantendo a alimentação de uma determinada carga por si só, ela sempre trabalhará em paralelo com outra fonte primária que será a responsável pela estabilidade do sistema, e também pelo fato de ser uma usina de pequeno porte. Como fator comprovador desta afirmação, é a existência de outras PCH's interligadas na mesma linha de transmissão que utilizam o sistema de excitação Brushless em seus geradores. Outro fator é que a UG se enquadra tecnicamente nas características de utilização deste sistema, pois os geradores utilizados no empreendimento apresentam potência inferior a 100MVA e rotação acima de 200 rpm, fatores que devem ser observados para viabilizar a implantação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando-se em conta o que foi observado, a utilização do sistema de excitação Estático, apesar de ter uma resposta mais rápida, possui a inconveniência da necessidade de realizar manutenções periódicas devido ao desgaste das escovas, trazendo indisponibilidade das unidades geradoras. Na maioria das PCH's é utilizado o sistema de excitação Brushless, pelo fato de estas não regularem o sistema, pois são usinas de pequeno porte, de até 30MW. Com isso podemos dizer que o sistema Brushless torna-se uma solução muito atrativa para ser aplicada em PCH's, pois apresentam a grande vantagem de se ter baixo o índice de manutenção. Portanto a aplicação desta tecnologia trará uma diminuição significativa de índices de indisponibilidade e um aumento na produção de energia deste empreendimento, ajudando assim a suprir a grande demanda existente no setor elétrico.

Para futuros estudos, sugerimos fazer uma análise quanto à implantação do sistema de excitação Brushless na PCH Areia Branca em termos físicos, mecânicos e financeiros. Para isso, caso o cliente demonstre interesse, deverá contatar uma empresa especializada para fazer o projeto mecânico para acoplar a excitatriz nas UG's.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Alvaro Augusto. **Máquinas Síncronas Trifásicas-Notas de Aula**. 2013. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná. Disponível em [http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos de Maquinas S%C3%ADncronas_v2.pdf](http://daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/Rabiscos%20de%20Maquinas%20S%C3%ADncronas_v2.pdf). Acessado em 10 mar. 2014.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. Disponível em www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf. Acessado em 20 fev. 2014.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2003. Disponível em www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf. Acessado em 26 fev. 2014.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 2002. Disponível em http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf. Acessado em 21 ago. 2014.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 13 nov. 2014.

CALSAN, Marcelo. **Análise de Desempenho Dinâmico de Sistemas de Excitação para Geradores Síncronos em Plantas de Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Concentração Energia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP, Campinas. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?cod=000837426&fd=y>. Acessado em 3 mai. 2014.

COSTA, Antônio Simões. **Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos**, notas de aula, UFSC, 2002. Disponível em <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/dc-cap5.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

ELETROBRÁS. Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas- Equipamentos Eletromecânicos. Disponível em <https://www.elektrobras.com/ELB/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>.

Acessado em_10 mar. 2014.

ENERGISA, Treinamento em Operação de Usinas.

Fundação COGE, Apostila de Treinamento para Operadores de Usinas, 2007.

GALVÃO JUNIOR, Francisco Di Mase. **Regulador de tensão para sistemas de excitação Brushless- Desenvolvimento e Aplicação.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Disponível em <http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detailhe>

[ObraForm.do?select_action=&co obra=89010](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/Detailhe). Acessado em 5 mar. 2014.

GOMES, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes Brushless.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétricas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/.../TextoFinalRevisado.pdf. Acessado em 6 mar. 2014.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. **Apostila de Geradores CA.** 2007. Disponível em <http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/apostila-de-geradores-de-ca>. Acessado em 19 mar. 2014.

LIMA, Roberth dos Santos. **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/dissertacoes/padronizacao-de-projetos-eletricos-de-pequenas-centrais-hidreletricas.pdf>. Acessado em 6 mar. 2014.

Máquinas Síncronas. Apostila de Máquinas Elétricas, 2001. Disponível em <http://www.cpdee.ufmg.br/~gbarbosa/Disciplina%20de%20M%E1quinas%20EI%E9tricas/Disciplina%20de%20M%C3%A1quinas%20EI%C3%A9tricas/maquinas-sincronas.pdf>. Acessado em 15 nov. 2014.

MARQUES, Gil. Máquinas Síncronas, 2011. Disponível em <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasco/CEE-CAP%202.pdf>. Acessado em 10 mar. 2014.

MARQUES, Victor Emanuel Lima. Ajuste de parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação, recorrendo a resposta em frequência do modelo. 2011. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. Disponível em <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63431/1/000149243.pdf>. Acessado em 5 mar. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Relatório Balanço Energético Nacional 2014-ano base 2013. Disponível em http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html. Acessado em 12 nov. 2014.

MME. Ministério de minas e energia - PROINFA, 2014. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/PROINFA-ANEXO1-InstitucionalMME.pdf>. Acessado em 14 nov. 2014.

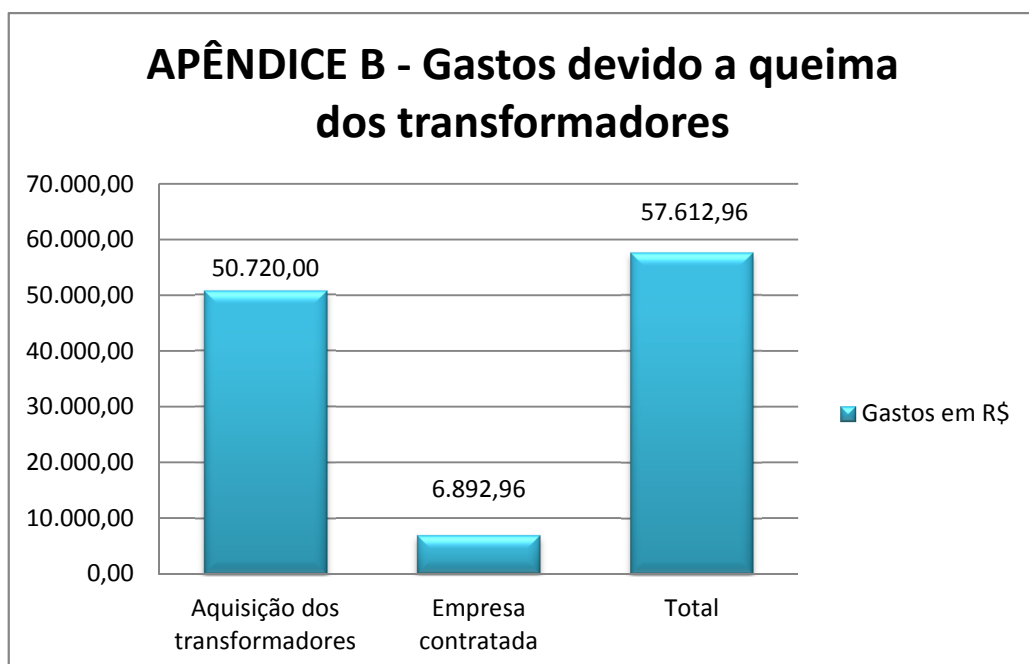
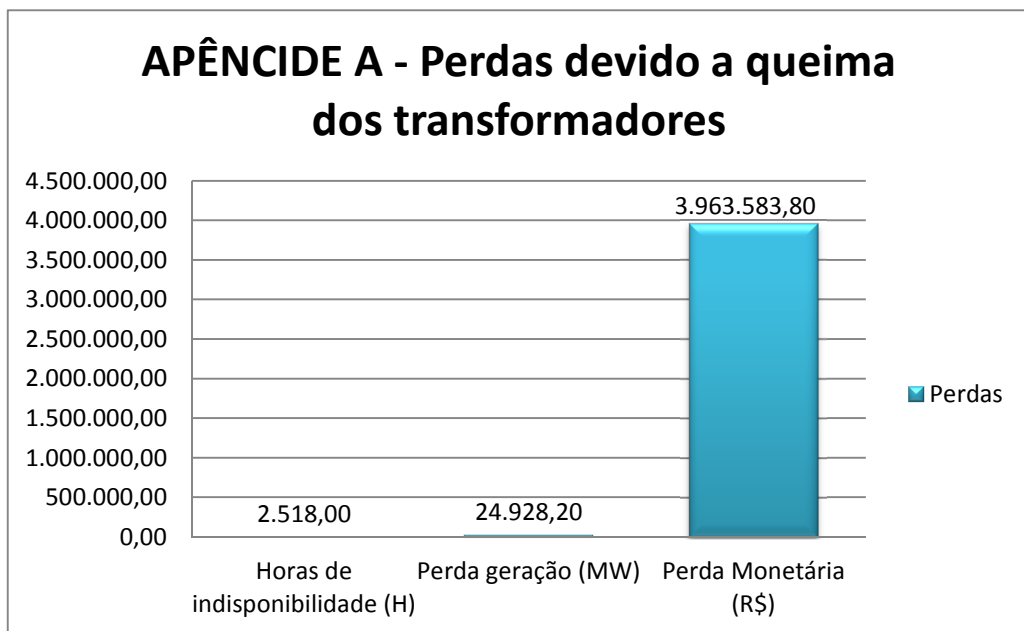
PINHEIRO, Hélio. Máquinas e Acionamentos Elétricos - Geradores de corrente alternada. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Norte. Disponível em <http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc/view>. Acessado em 18 mar. 2014.

WEG, Características e Especificações de Geradores. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acessado em 12 nov. 2014.

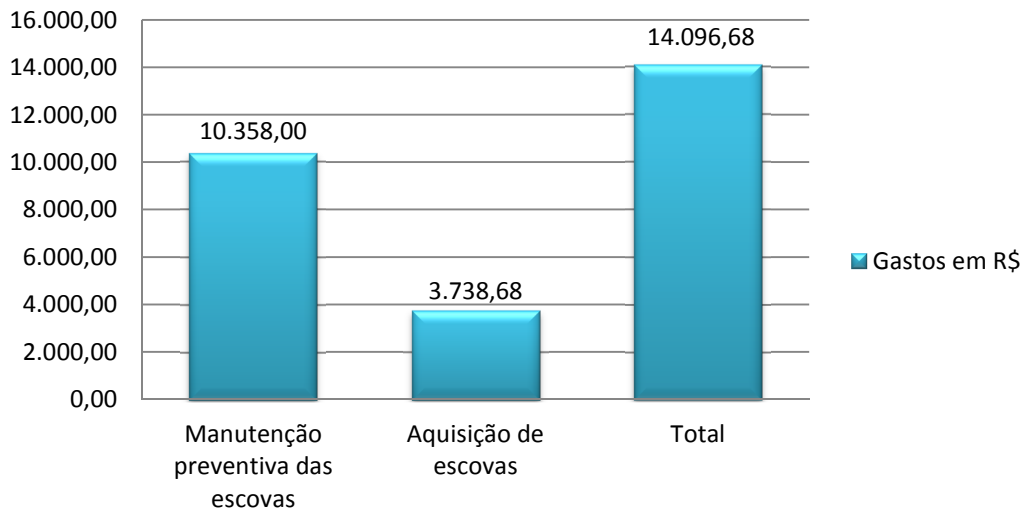
WEG, Manual de Instalação, Operação e Manutenção de Geradores Síncronos Linha S. 2010. Disponível em www.weg.com.br. Acessado em 31 ago. 2014.

APÊNDICES

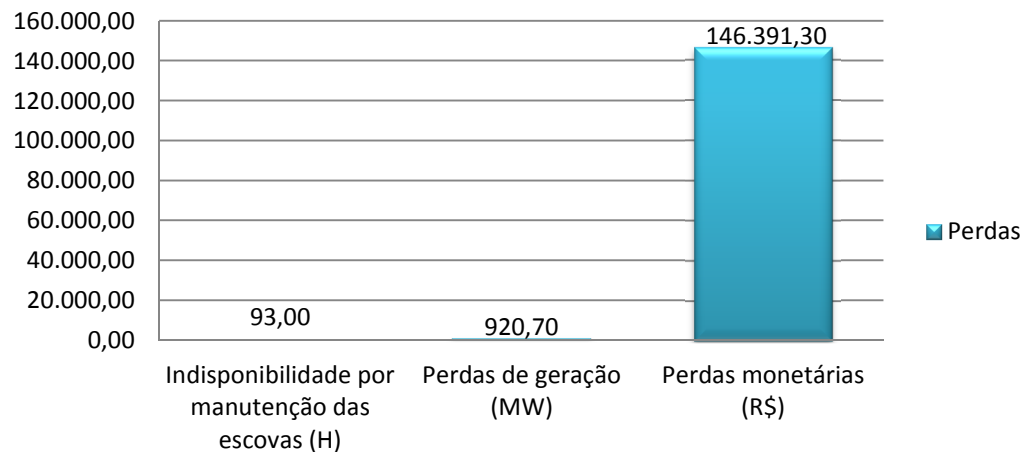
Abaixo, segue as relações de paradas das UG's devido às várias ocorrências de manutenções pelo sistema que é utilizado na PCH Areia Branca. Como podemos ver, são números consideráveis, visto ao pequeno tempo de operação das UG's.

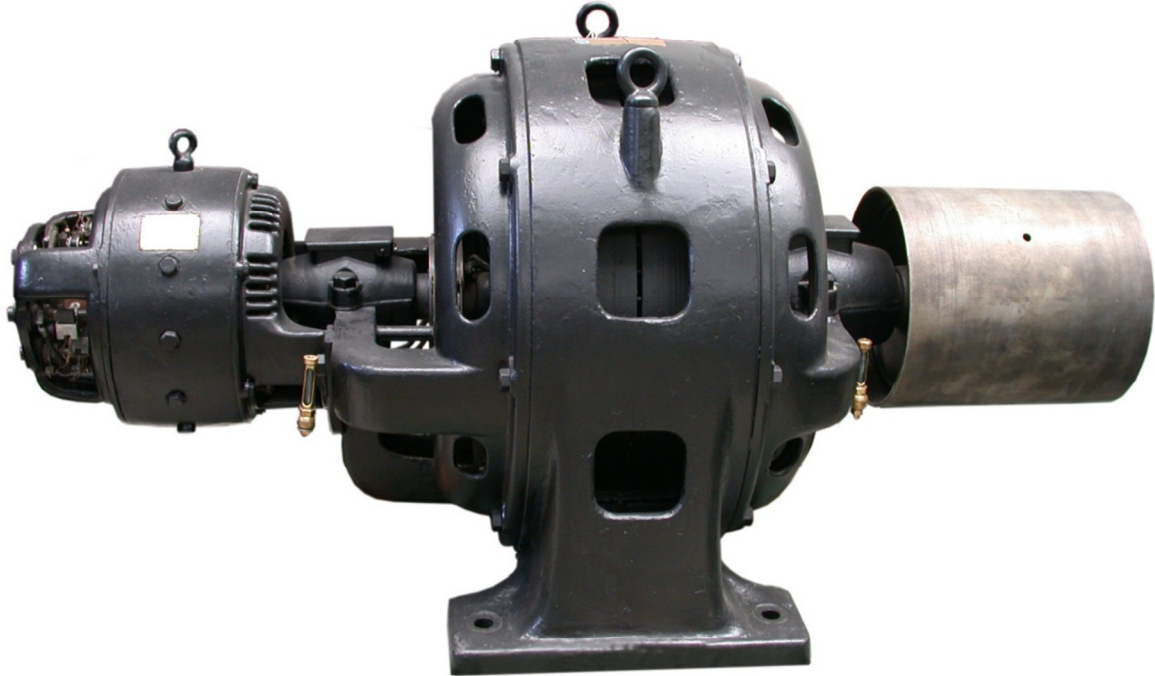


APÊNDICE C - Gastos com manutenção das escovas

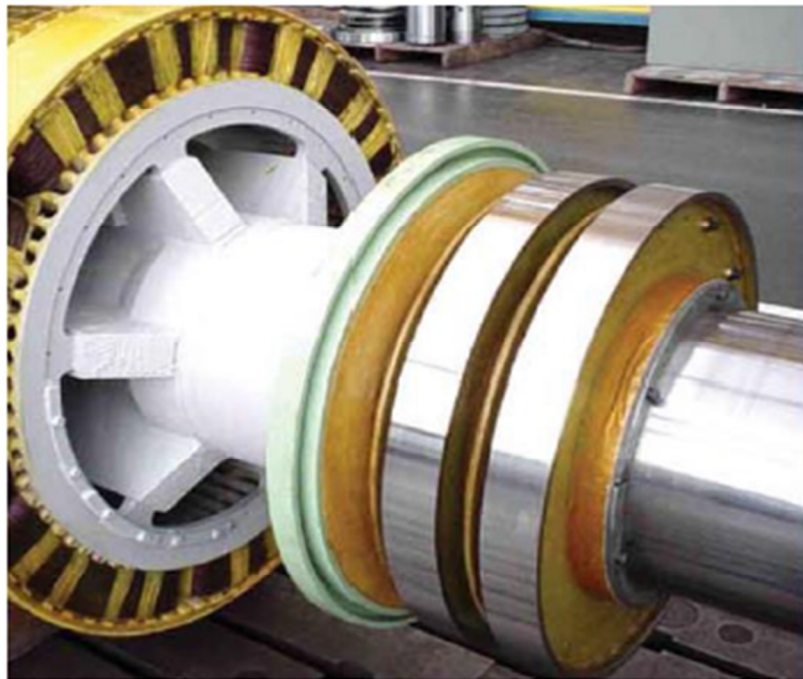


APÊNDICE D - Gastos devido a queima dos transformadores



ANEXOS

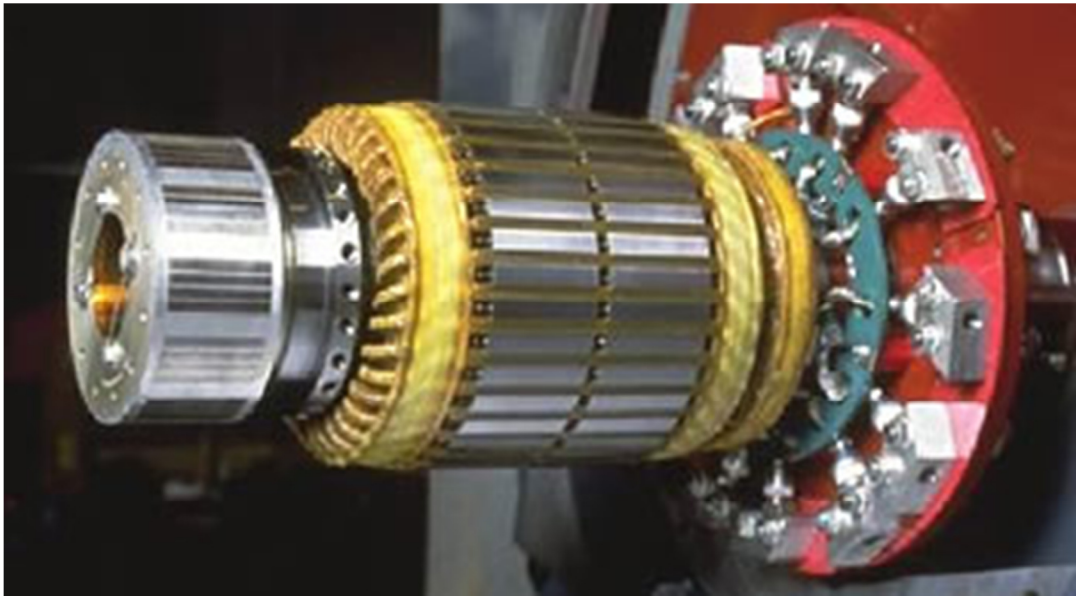
ANEXO A: Exemplo de Excitatriz cc



ANEXO B: Exemplo de Excitatriz Estática



ANEXO C: Exemplo de Excitatriz Brushless



ANEXO D: Exemplo de Excitatriz Brushless (PMG)

Slip ring machines

Type of current / Application	Slip ring material	Current density A/cm ² (A/in ²)	Speed m/s (ft/s)	Pressure kPa (PSI)	Brush grades
Earth Return Current Units (ERCU)					
All	Steel-Bronze	0 - 30 (0 - 194)	3 - 8 (10 - 26)	35 - 40 (5 - 5.8)	MC877 - MC79P
DIRECT CURRENT					
Pickling / Tinning rolls	Bronze	20 - 30 (125 - 194)	3 (10)	18 - 40 (2.6 - 5.8)	MC79P - CG957
Syn-chronous machines (grooved or plain slip rings)	Stainless steel	11 - 13 (62 - 85)	≤ 100 (≤ 328)	13 - 18 (1.9 - 2.6)	LFC554
	Steel	6 - 10 (39 - 65)	≤ 70 - 80 (≤ 230 - 262)	15 - 18 (2.2 - 2.6)	LFC501
	Steel-Bronze	8 - 12 (51 - 77)	≤ 40 (≤ 131)	18 (2.6)	CG651 - CG657 (Bronze) EG34D - EG389P L1 (Steel)
	Cast iron	6 - 10 (39 - 65)	≤ 20 (≤ 66)	18 (2.6)	EG34D - EG389P - L1
Equalizers in hydrogen	Steel-Bronze	5 - 8 (33 - 52)	25 (82)	18 (2.6)	EG34D - EG9599 - M9426

ANEXO E: Tabela de especificação de escovas

Tractebel Energia
GDF SUEZ

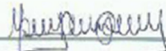
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins, que a Tractebel Energia SA, autoriza o uso e a divulgação dos dados necessários para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso dos alunos Webert Jaques Cerqueira e Diego Ferreira de Souza, matriculados no 10º período do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Doctum de Educação e Tecnologia, intitulado "UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO BRUSHLESS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS", orientado pelo professor Joildo Fernandes Costa Júnior.

Dados constantes:

- Horas de indisponibilidade por manutenção do anel coletor;
- Horas de indisponibilidade para troca de escovas;
- Horas de indisponibilidade para troca do trafo de excitação;
- H.H. das manutenções;
- Valores gastos com a compra do Trafo;
- Valores gastos com contratação de mão-de-obra especializada;
- Custos com a compra das escovas;
- Perdas de geração;
- Fotos do empreendimento;
- Dados técnicos.

Atenciosamente,


 Marcos Damiani Terra
 Coordenador de PCH

ANEXO F: Autorização da empresa