



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

BRUNO HIDEKI YOSHIDA

Sistemas de excitação em usinas hidrelétricas: Aspectos teóricos e práticos

Guaratinguetá

2023

Bruno Hideki Yoshida

Sistemas de excitação em usinas hidrelétricas: Aspectos teóricos e práticos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio

Guaratinguetá

2023

Y65s	<p>Yoshida, Bruno Hideki</p> <p>Sistemas de excitação em usinas hidrelétricas: aspectos teóricos e práticos / Bruno Hideki Yoshida. Guaratinguetá, 2023.</p> <p>60 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 59-60</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio</p> <p>1. Usinas hidrelétricas. 2. Geradores hidrelétricos. 4. Sistemas de controle inteligente. I. Título.</p> <p>CDU 621.311.21</p>
------	--

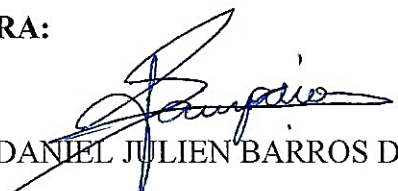
BRUNO HIDEKI YOSHIDA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Orientador/UNESP-FEG


Prof.^a. Dra. RAPHAELA CARVALHO MACHADO
UNESP-FEG


Prof. MSc. THIAGO JOSÉ MICHELIN
UNESP-FEG

Fevereiro de 2023

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar os diferentes tipos de sistemas de excitação existentes, bem como demonstrar a importância deles, indicando e detalhando os principais equipamentos que compõem o modelo aplicado atualmente nas usinas e pequenas centrais hidrelétricas, principais fontes renováveis de energia elétrica no Brasil, as quais representam 60% da matriz elétrica nacional. Além disso, são apresentados os parâmetros indispensáveis do gerador síncrono considerados no projeto de um sistema de excitação e a forma como são realizados o dimensionamento e a especificação dos componentes, com base em normas nacionais e internacionais. Também são abordados os diferentes tipos de malha de controle, o controlador que é amplamente utilizado nos sistemas de excitação das plantas hidrelétricas, e a maneira como o regulador digital atua na regulação da tensão dos terminais de saída da máquina síncrona. Por fim, também são analisadas neste trabalho algumas divergências entre os dados do dimensionamento, os dados nominais dos componentes disponíveis no mercado e a execução no campo.

PALAVRAS-CHAVE: sistemas de excitação; hidrelétricas; dimensionamento; regulação de tensão.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present the different types of the existing excitation systems, as well as to demonstrate their importance, indicating and detailing the main equipment that compose the model applied at the large and small hydroelectric power plants, the main renewable sources of electricity in Brazil, representing 60% of the national electricity matrix. In addition, it presents the synchronous generator's indispensable parameters considered in the design of an excitation system and how the components are sized and specified, based on national and international standards. The different types of control loop, the controller that is widely used in excitation systems of hydroelectric plants, and the way in which the digital regulator acts in regulating the voltage of the output terminals of the synchronous machine are also discussed. Finally, this paper analyzes as well some divergences between the sizing data, the nominal data of the components available on the market and the execution at site.

KEYWORDS: excitation systems; hydro power plants; sizing; voltage regulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado de uma central hidrelétrica.....	11
Figura 2 - Diagrama simplificado dos sistemas de controle de um gerador síncrono.	12
Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira - setembro/2022.....	14
Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira - previsão para 2026.....	15
Figura 5 - UHE Salto Osório 1078 MW (Quedas do Iguazu - PR, Brasil).....	16
Figura 6 - Diagrama de um sistema de controle em malha aberta.....	18
Figura 7 - Diagrama de um sistema de controle em malha fechada.....	20
Figura 8 - Classificação dos sistemas de excitação conforme a fonte de energia primária.	23
Figura 9 - Diagrama unifilar - Excitação Independente Direta.	24
Figura 10 - Diagrama unifilar - Excitação Independente Indireta.....	25
Figura 11 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Direta Simples.....	26
Figura 12 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Direta Composta.....	28
Figura 13 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Indireta Simples com excitatriz CA.	29
Figura 14 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Indireta Simples com excitatriz CC.....	30
Figura 15 - Diagrama esquemático - Auto Excitação Direta Simples.....	33
Figura 16 - Transformador de Excitação a seco.....	35
Figura 17 - Disjuntor de campo trifásico CA.....	36
Figura 18 - Retificador Controlado de Silício.....	37
Figura 19 - Esquemático de uma ponte de tiristores.....	38
Figura 20 - Cubículos das pontes de tiristores.....	38
Figura 21 - Resistor de Descarga.....	39
Figura 22 - Carcaça dos anéis coletores - UHE São Simão.....	40
Figura 23 - Anéis coletores e escovas - UHE São Simão.....	41
Figura 24 - Rotor de polos salientes.....	42
Figura 25 - Ferramenta de dimensionamento.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos sistemas de excitação.....	31
Tabela 2 - Dados do gerador fictício.....	43
Tabela 3 - Normas aplicáveis.	44
Tabela 4 - Resultados - Transformador de Excitação.	54
Tabela 5 - Resultados - Disjuntor de Campo.....	54
Tabela 6 - Resultados - Ponte de Tiristores.....	54
Tabela 7 - Resultados - Dispositivo <i>Crowbar</i>	55
Tabela 8 - Resultados - Resistor de Descarga.	55
Tabela 9 - Exemplo de especificação com componentes comerciais.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i> – Regulador de Tensão Automático
CA/AC	Corrente Alternada (<i>Alternating Current</i>)
CC/DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
GCB	<i>Generator Circuit Breaker</i> – Disjuntor de Campo do Gerador
GIP	Gerador de Ímã Permanente
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PI	Proporcional-Integral
RT	Regulador de Tensão
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i> – Retificador Controlado de Silício
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TCE	Transformador de Corrente com Entreferro
TEX	Transformador de Excitação
TP	Transformador de Potencial
UG	Unidade Geradora
UHE	Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

E_{campo}	Tensão de campo
$E_{\text{campo}(T_2)}$	Tensão de campo corrigida a T_2 °C
I_{campo}	Corrente de campo nominal
I_{disj}	Corrente nominal do disjuntor de campo
I_{ponte}	Corrente nominal da ponte de tiristores
I_{SC}	Corrente de campo em sobrecarga
k_{teto}	Multiplicador da tensão de teto
N_{pontes}	Número de pontes em paralelo
$R_{\text{campo}(T_1)}$	Resistência de campo a T_1 °C
$R_{\text{campo}(T_2)}$	Resistência de campo corrigida a T_2 °C
R_D	Resistência do resistor de descarga
S_N	Potência nominal do transformador de excitação
T_1	Temperatura da resistência de campo conhecida
T_2	Temperatura de campo nominal
T'_{d0}	Constante de tempo transitória do eixo direto
V_{crowbar}	Tensão nominal de disparo do dispositivo <i>crowbar</i>
V_{RRM}	Tensão de pico reversa repetitiva
V_{sec}	Tensão nominal do secundário do transformador de excitação
$V_{\text{teto-neg}}$	Tensão de teto negativa
$V_{\text{teto-pos}}$	Tensão de teto positiva
W_{RD}	Dissipação de energia do resistor de descarga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
1.3	A MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	14
1.3.1	A importância das hidrelétricas no Brasil	15
2	ASPECTOS CONCEITUAIS	17
2.1	O CONTROLE CLÁSSICO	17
2.1.1	Controle em Malha Aberta	17
2.1.2	Controle em Malha Fechada.....	19
2.1.3	Aplicação nos Reguladores de Tensão	21
2.1.3.1	Ação Proporcional.....	22
2.1.3.2	Ação Integral.....	22
2.2	TIPOS DE EXCITAÇÃO.....	23
2.2.1	Excitação Independente Direta.....	24
2.2.2	Excitação Independente Indireta.....	25
2.2.3	Auto Excitação Direta Simples	26
2.2.4	Auto Excitação Direta Composta.....	28
2.2.5	Auto Excitação Indireta	29
2.2.6	Resumo	31
3	A EXCITAÇÃO DE GERADORES NAS HIDRELÉTRICAS	32
3.1	A LIGAÇÃO DOS COMPONENTES.....	33
3.2	COMPONENTES DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO	34
3.2.1	Circuito de Pré-Excitação	34
3.2.2	Transformador de Excitação	35
3.2.3	Disjuntor de Campo	36
3.2.4	Ponte de Tiristores.....	37
3.2.5	Dispositivo <i>Crowbar</i>.....	39
3.2.6	Resistor de Descarga	39
3.2.7	Anéis Coletores e Escovas	40
3.2.8	Rotor do Gerador	42
3.3	DIMENSIONAMENTO.....	43
3.3.1	Dados de Entrada.....	43

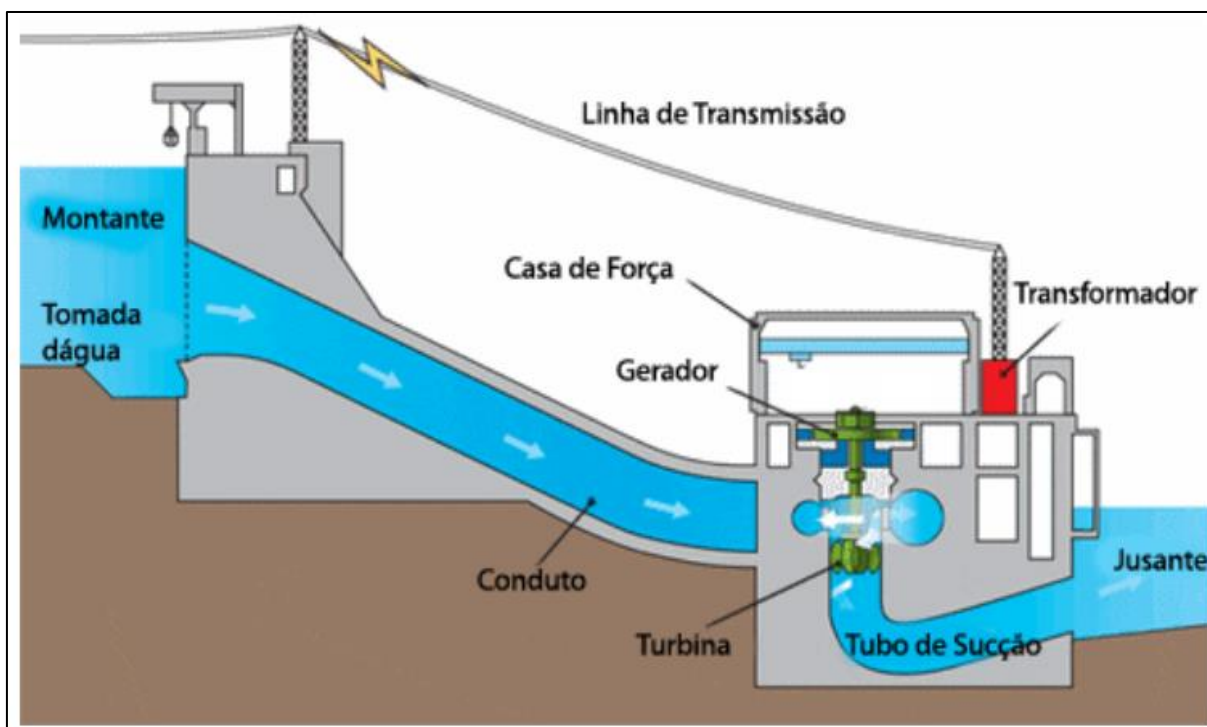
3.3.2	Normas Aplicáveis.....	44
3.3.3	Dimensionamento do Transformador de Excitação.....	45
3.3.3.1	Cálculo da Resistência e Tensão de Campo	45
3.3.3.2	Cálculo da Tensão do Secundário	45
3.3.3.3	Cálculo da Potência Nominal.....	46
3.3.4	Verificação da Tensão de Teto.....	47
3.3.4.1	Tensão de Teto Positiva.....	47
3.3.4.2	Tensão de Teto Negativa	48
3.3.5	Dimensionamento do Disjuntor de Campo	49
3.3.6	Dimensionamento da Ponte de Tiristores.....	50
3.3.6.1	Cálculo da Corrente Nominal	50
3.3.6.2	Cálculo da Tensão de Pico Reversa Repetitiva.....	50
3.3.7	Dimensionamento do Dispositivo <i>Crowbar</i>	51
3.3.8	Dimensionamento do Resistor de Descarga.....	52
3.3.8.1	Resistência	52
3.3.8.2	Dissipação de Energia	53
3.3.9	Resultados do Dimensionamento	54
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade de um sistema de potência é obtida não só pelo fornecimento ininterrupto de energia, mas também pela qualidade de tal energia, isto é, tensão e frequência constantes, uma vez que os aparelhos consumidores em sua maioria são projetados para operar com estes parâmetros fixos, suportando uma leve variação em torno dos valores nominais.

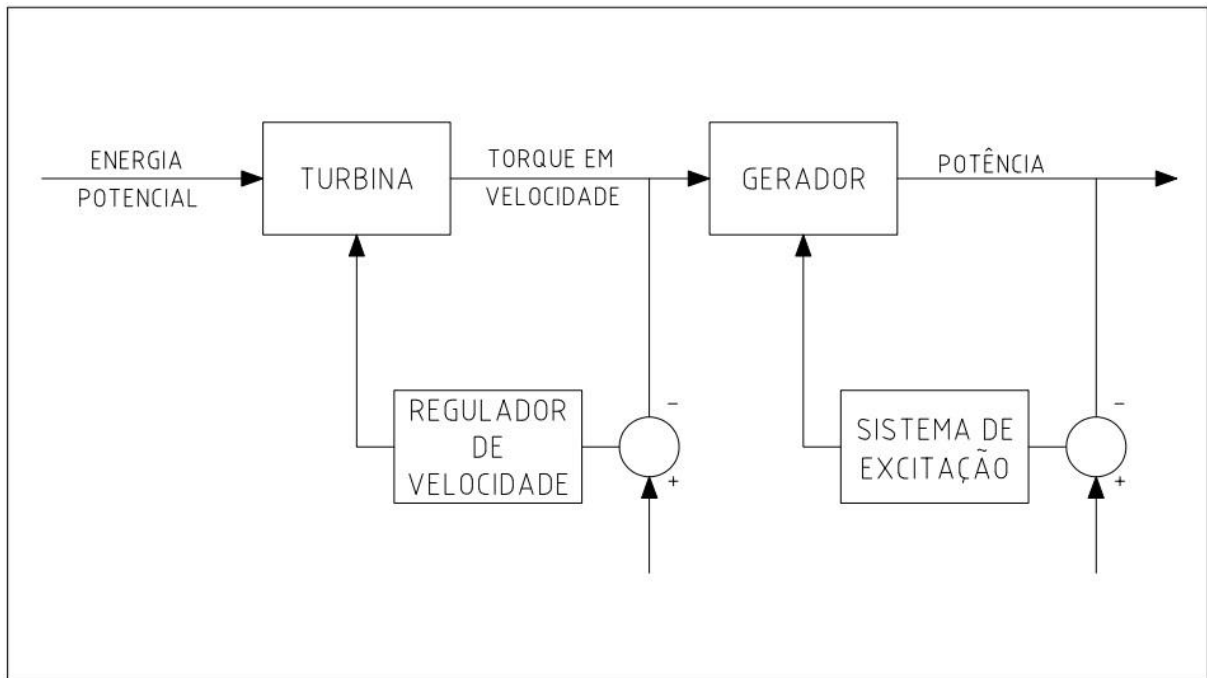
A regulação destas grandezas nas plantas hidrelétricas, representadas pela Figura 1, é realizada basicamente por dois sistemas de controle: o regulador de velocidade (atuando na turbina, para a frequência) e o sistema de excitação (atuando no gerador, para a tensão), como pode ser visto na Figura 2.

Figura 1 - Esquema simplificado de uma central hidrelétrica.



Fonte: Autor desconhecido.

Figura 2 - Diagrama simplificado dos sistemas de controle de um gerador síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este trabalho tratará do sistema de controle da excitação, o qual tem como função controlar a tensão terminal de um gerador síncrono através do ajuste contínuo na força eletromotriz induzida no enrolamento do rotor da máquina.

O regulador de tensão desempenha o papel principal no sistema de excitação, controlando a saída da excitatriz, de tal maneira que a tensão e a potência reativa do gerador estejam em uma faixa esperada. O regulador de tensão automático, AVR (*Automatic Voltage Regulator*), é um controlador que detecta a tensão nos barramentos de saída do gerador, e caso necessário, atua no controle da excitação.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é apresentar o conceito básico, o funcionamento e a importância de sistemas de excitação confiáveis para a regulação da tensão dos geradores síncronos em plantas hidrelétricas, considerando os dispositivos e equipamentos que os constituem. Além disso, tem como propósito dimensionar um sistema para um gerador fictício, e avaliar as eventuais divergências entre os dados de projeto e os componentes disponíveis comercialmente.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos, dentre os quais o capítulo 1 mostra a composição da matriz elétrica brasileira, o objetivo do trabalho e sua organização.

O capítulo 2, por sua vez, apresenta tanto uma revisão da literatura sobre os sistemas de controle e suas aplicações na regulação de tensão de máquinas síncronas, quanto os diferentes sistemas de excitação existentes.

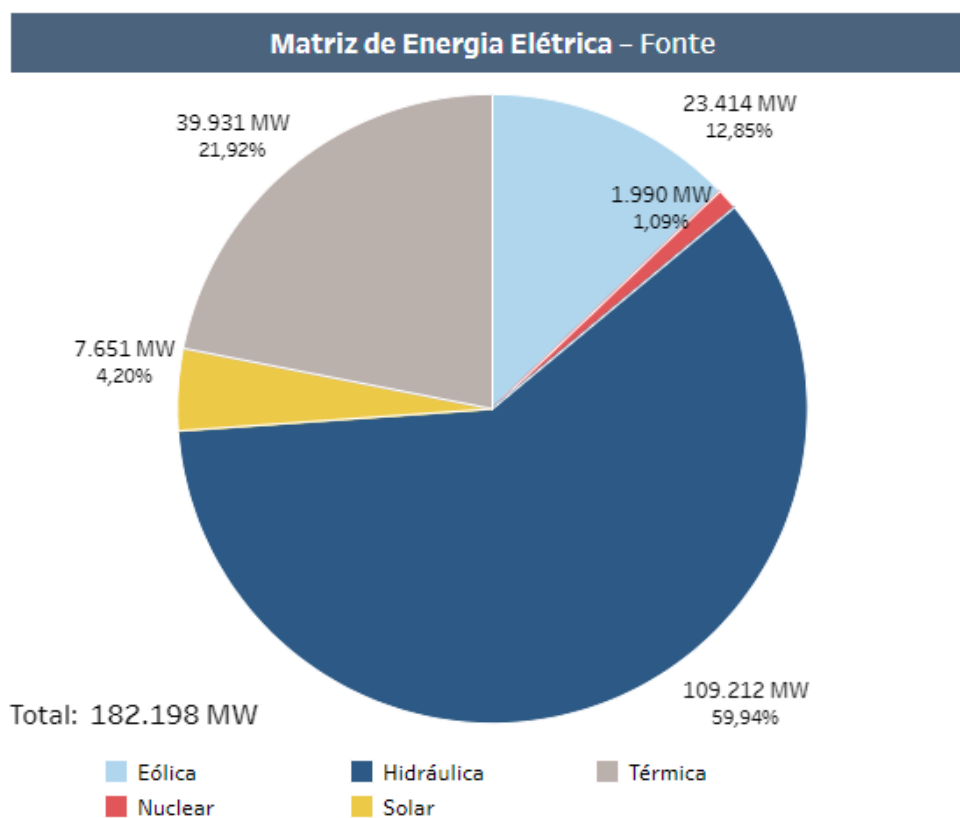
Já o capítulo 3 aborda os principais componentes de um sistema de excitação convencional nas plantas hidrelétricas brasileiras, a função de cada um e a maneira como são conectados. Após, é desenvolvido um procedimento para o dimensionamento de tais componentes, com base em normas nacionais e internacionais.

Por fim, o capítulo 4 traz as considerações finais, referentes à presente importância das hidrelétricas no Brasil e às divergências entre os dados do dimensionamento e os componentes disponíveis no mercado e a execução no campo.

1.3 A MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

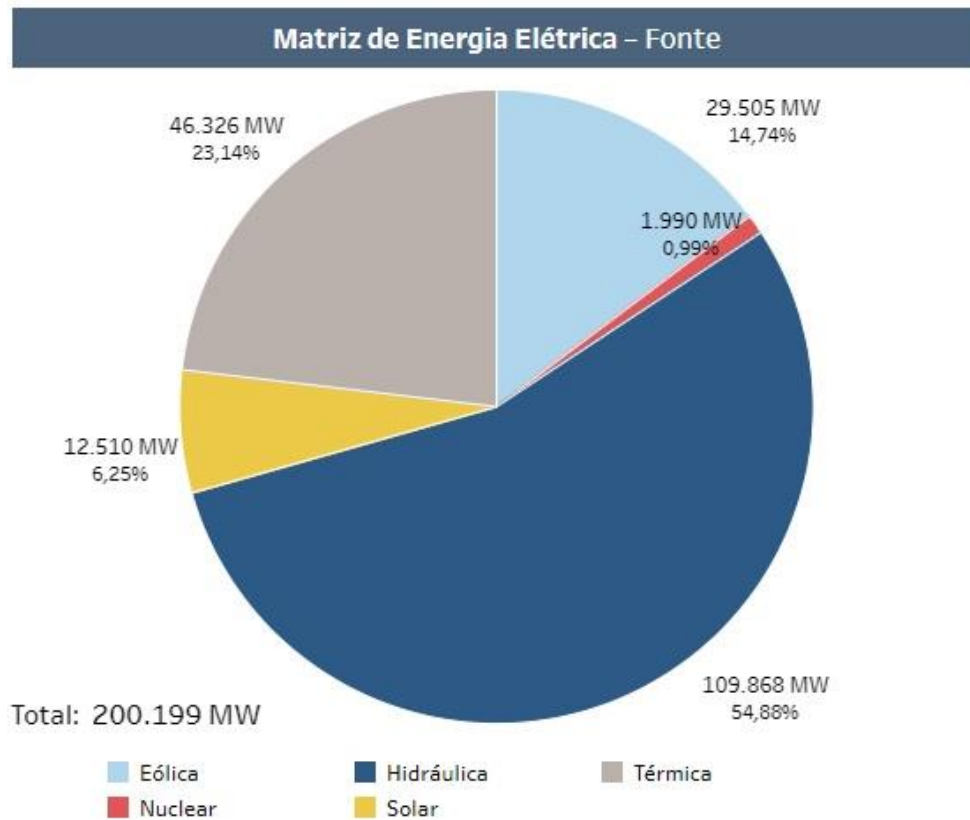
O Brasil é um país que possui o segmento de produção de energia a partir de fontes renováveis bastante consolidado. De acordo com dados obtidos no site do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), dentre tais fontes, as hidrelétricas representam cerca de 60% da matriz elétrica brasileira, o que equivale a 109.212 MW de capacidade instalada (dados de setembro/2022), com previsão de aumento de 656 MW até o ano de 2026.

Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira - setembro/2022.



Fonte: ONS (2022).

Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira - previsão para 2026.



1.3.1 A importância das hidrelétricas no Brasil

Esta grande participação na produção de energia associada ao aumento na demanda esperada para os próximos anos, envolvendo por exemplo, a transição para automóveis com motores elétricos e o crescente consumo de tecnologia pela população, evidenciam a importância de projetos de modernização das usinas e pequenas centrais hidrelétricas, melhorando sua eficiência e confiabilidade, uma vez que são a maior fonte de energia limpa no país.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil tem em operação 219 usinas hidrelétricas de grande porte, as UHEs, além de 425 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) [...]. Três das usinas no país estão entre as dez maiores do planeta. São elas Itaipu Binacional, Belo Monte e Tucuruí. A perspectiva do Ministério de Minas e Energia é que a energia hidrelétrica continuará a dominar a geração de eletricidade no país até 2030. (ENGIE, 2022).

Além do fornecimento de energia, as hidrelétricas proporcionam vantagens como a regulação do nível dos rios, principalmente quando se trata das centrais hidrelétricas com reservatório, o que contribui para a navegabilidade e a captação de água para irrigação e uso doméstico pelas cidades e comunidades próximas.

Segundo a ENGIE (2022), uma das principais empresas privadas de energia do Brasil, as hidrelétricas ainda podem trazer benefícios como a geração de empregos indiretos, relacionados à manutenção da fauna e da flora das áreas ao redor, como a realocação dos animais e proteções para evitar entrada de peixes nas máquinas, e até mesmo o incentivo a outros setores, como o turismo na região.

Figura 5 - UHE Salto Osório 1078 MW (Quedas do Iguaçu - PR, Brasil).



Fonte: Do próprio autor.

2 ASPECTOS CONCEITUAIS

Os processos de controle são fundamentais neste tipo de aplicação. Os parâmetros de saída da unidade geradora, neste caso a tensão nos barramentos de saída do estator e conseqüentemente a potência fornecida, estão diretamente associados aos valores de entrada estabelecidos para determinada máquina síncrona, por meio da realimentação dos sensores, transdutores e instrumentos de medição presentes no sistema.

Deste modo, é de grande importância abordar os conceitos de excitação dos geradores e das malhas de controle envolvidas nesta aplicação.

2.1 O CONTROLE CLÁSSICO

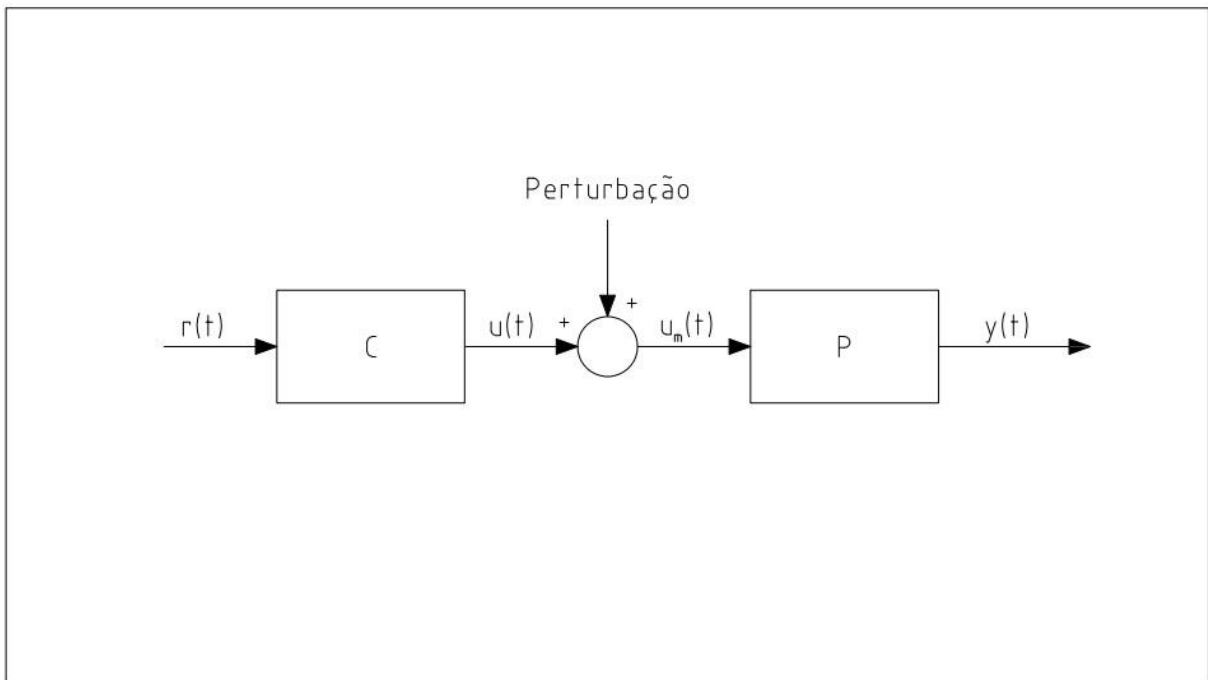
Segundo Dorf (2018), o controle está relacionado ao comportamento dos sistemas dinâmicos. Quando uma ou mais variáveis de saída devem se direcionar a um determinado valor de referência ao longo do tempo, um controlador utiliza as entradas e perturbações do sistema para conseguir o efeito desejado nas saídas deste sistema.

Na teoria de controle clássica, os sistemas são divididos em dois tipos: o de malha aberta e o de malha fechada, os quais serão detalhados nas subseções 2.1.1 e 2.1.2, respectivamente. Também será apresentado um exemplo relacionando os dois tipos de sistema (malha aberta e malha fechada), aplicados em uma mesma finalidade.

2.1.1 Controle em Malha Aberta

Nesta configuração mais básica, o sistema não tem qualquer tipo de realimentação. Aplica-se um sinal de controle na entrada deste sistema, e espera-se que a saída atinja um comportamento desejado. Sendo assim, a entrada não depende da saída, e quaisquer perturbações entre estas duas não são percebidas pelo controlador. A Figura 6 contém o diagrama básico que representa um sistema de controle em malha aberta.

Figura 6 - Diagrama de um sistema de controle em malha aberta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- C é o bloco controlador do processo;
- P é o processo em si, também chamado de planta.

Já para os valores envolvidos na malha de controle, tem-se:

- **r(t)**: valor de referência, ou *set point*. Este é o valor inserido por um usuário e tem relação direta com o valor esperado de saída do processo.
- **u(t)**: sinal de controle. O controlador C recebe o sinal de referência r(t) em determinado instante e gera este sinal de controle u(t), para ser aplicado ao processo.
- **u_m(t)**: sinal de controle u(t) impactado por uma perturbação externa.
- **y(t)**: valor de saída desejado no processo.

Um exemplo desta configuração é o de um motorista conduzindo um determinado veículo que, ao pisar no seu acelerador em 30% do curso total, mantém uma velocidade constante de 100 km/h. Porém, caso o trajeto que este veículo percorre se torne uma subida, a velocidade irá diminuir, para uma mesma pressão no pedal. O oposto ocorre caso o trajeto se torne uma descida.

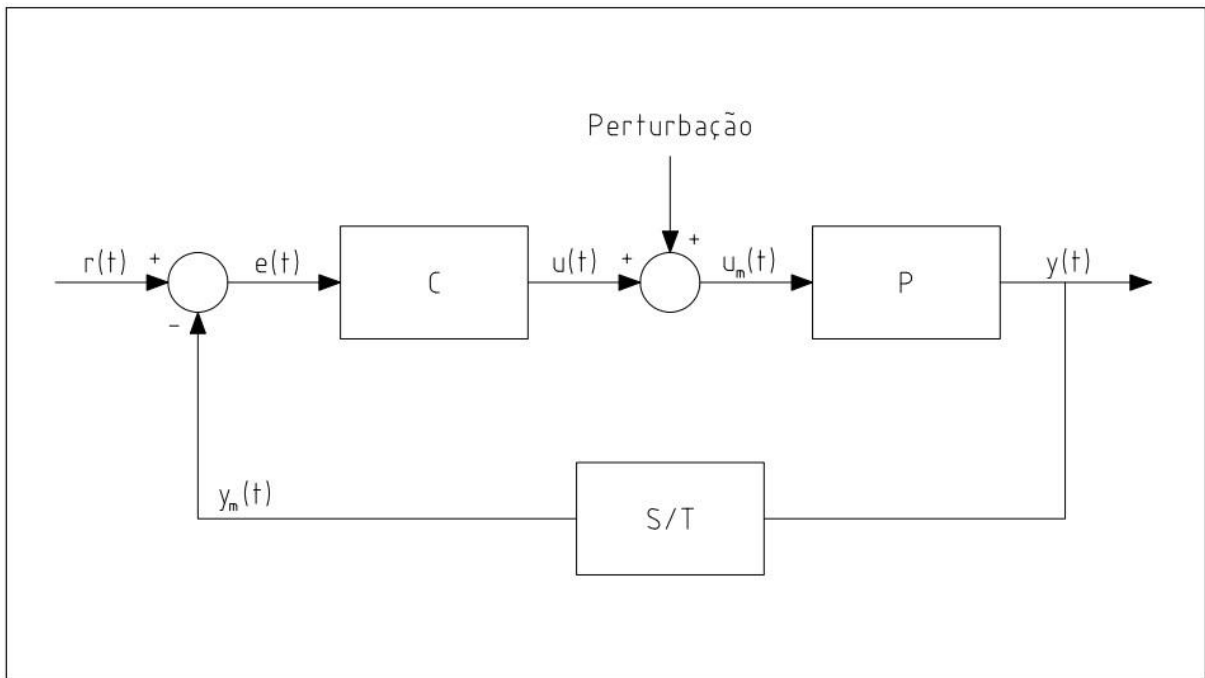
Portanto, as subidas e descidas atuam como perturbações deste “sistema” do veículo. Como a entrada (pressão no pedal) não sofre influência da saída (velocidade), os mesmos 30% podem resultar em saídas diferentes – menores que 100 km/h em subidas e maiores que 100 km/h em descidas.

Este exemplo demonstra a imprecisão do controle em malha aberta, o qual apresenta dependência de uma estimativa humana e não se adapta às perturbações externas.

2.1.2 Controle em Malha Fechada

Neste tipo de sistema, o monitoramento da evolução da saída é utilizado para determinar o sinal de controle a ser empregado ao processo em um determinado instante. Tal monitoramento é obtido por meio da realimentação da saída para a entrada. A Figura 7 contém o diagrama básico que representa um sistema de controle em malha fechada.

Figura 7 - Diagrama de um sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- C é o bloco controlador do processo;
- P é o processo em si, também chamado de planta;
- S/T é um sensor instalado na planta, ou um transdutor que compatibiliza o sinal recebido com o sinal a ser transmitido ao controlador.

Já para os valores envolvidos na malha de controle, tem-se:

- **r(t)**: valor de referência, ou *set point*. Este valor pode ser inserido por um usuário ou é preestabelecido para o sistema, e tem relação direta com o valor esperado de saída do processo.
- **y_m(t)**: valor de saída do sensor/transdutor. No caso de os parâmetros r(t) e y(t) não serem da mesma grandeza (ex. kV e V) ou serem de unidades de medida diferentes (ex. V e Hz), o transdutor T recebe o valor y(t) obtido e o converte para y_m(t), compatibilizando as grandezas/unidades.

- **$e(t)$** : erro. Diferença entre o sinal de referência $r(t)$ e o sinal de realimentação devidamente convertido $y_m(t)$. O objetivo da malha de controle é aproximar ou até mesmo igualar este valor a zero.
- **$u(t)$** : sinal de controle. O controlador C recebe o sinal de erro $e(t)$ em determinado instante e gera este sinal de controle $u(t)$, para ser aplicado ao processo.
- **$u_m(t)$** : sinal de controle $u(t)$ impactado por uma perturbação externa.
- **$y(t)$** : valor de saída desejado no processo.

Para efeito de comparação, tratando-se ainda do exemplo da subseção 2.1.1 (Controle em Malha Aberta), o sistema em malha fechada está presente no controle de cruzeiro do veículo (mais conhecido como “piloto automático”).

Neste caso, o motorista não atua no pedal do acelerador. Em vez disso, programa a velocidade desejada no painel do veículo e o próprio sistema fará o monitoramento da velocidade e atuação da injeção eletrônica. Com a realimentação da saída (velocidade), o sistema consegue se adaptar às perturbações (subidas e descidas), modificando a injeção de combustível no motor e, conseqüentemente, a velocidade do veículo em direção ao *set point*.

2.1.3 Aplicação nos Reguladores de Tensão

O principal sistema de controle em malha fechada e mais comumente encontrado nos reguladores de tensão é o controlador Proporcional-Integral (PI). A finalidade deste controlador é associar as vantagens individuais das ações proporcional e integral para aprimorar o comportamento do sistema controlado. Desta forma, quando há uma grande diferença entre a tensão de campo nominal e o valor lido pelo transformador de potencial (TP) instalado no barramento de saída da máquina síncrona, o controlador digital atua de forma a corrigir rapidamente, porém sempre de maneira estável.

Sendo $u(t)$ o sinal de saída do controlador e $e(t)$ o sinal de erro entre o *set point* $r(t)$ e a saída $y(t)$, conforme definidos anteriormente, a lógica do controlador PI pode ser determinada segundo a equação (1):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) dt \quad (1)$$

Onde:

- K_p – ganho proporcional;
- K_i – ganho integral;
- t – tempo (instantâneo);
- τ – tempo de integração.

2.1.3.1 Ação Proporcional

A ação proporcional, com o nome mais intuitivo dos dois, produz um sinal de saída correspondente à amplitude do erro $e(t)$. Quanto maior esta última, maior a ação do controlador. Este processo tem a vantagem de suprimir as variações na saída. Um ganho proporcional muito alto, entretanto, acarreta em um grande sinal de saída, o que pode afetar a estabilidade do sistema. Por outro lado, se o ganho proporcional é muito pequeno, o sistema não é capaz de corrigir as perturbações corretamente.

2.1.3.2 Ação Integral

A ação integral produz um sinal de saída correspondente à duração e à amplitude do erro $e(t)$, isto é, ao erro acumulado. Sendo assim, este termo apresenta uma opção para melhorar o erro gerado pelo termo proporcional e torna a resposta do sistema mais rápida, possibilitando a chegada ao *setpoint* $r(t)$ mais depressa.

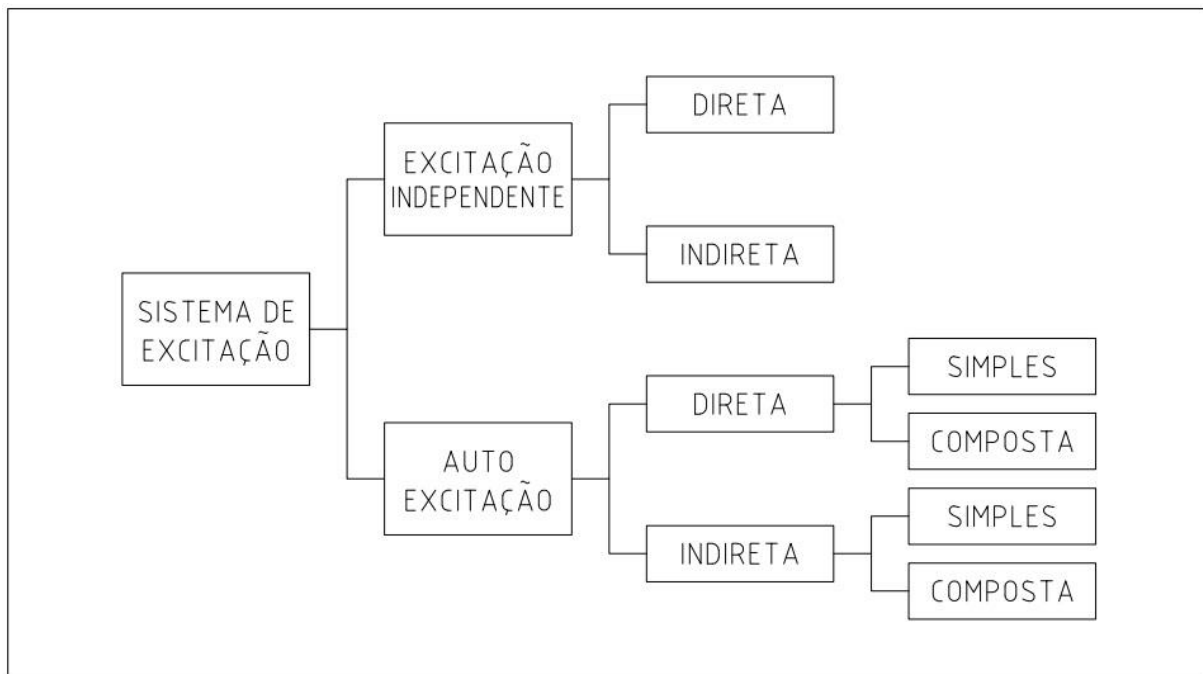
O termo integral corrige o valor da variável controlada em períodos iguais, chamados de tempo de integração. Se K_i é baixo, o sistema pode demorar bastante para atingir o *setpoint* $r(t)$. Entretanto, se K_i for muito alto, pode levar o sistema à instabilidade.

2.2 TIPOS DE EXCITAÇÃO

O tipo de excitação a ser aplicado é definido com base nas demandas impostas ao sistema de geração, tanto em relação ao controle da excitação quanto à manutenção do conjunto. Tais demandas ocasionaram a padronização de alguns circuitos básicos divididos conforme a fonte da energia para fornecimento do sistema de excitação. Basicamente, a divisão é feita em dois tipos: independente (a corrente de campo é proveniente de um sistema externo) e auto excitação (a corrente de campo é proveniente da própria máquina síncrona).

Esta divisão se deve ao fato de que quase toda instalação geradora de energia exige uma excitação que seja independente de uma fonte de energia externa (salvos os períodos de partida da máquina), ou seja, o suprimento de energia deve estar à disposição assim que a máquina atingir a velocidade nominal e/ou um valor de tensão mínimo nos seus barramentos. Tais classificações estão ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Classificação dos sistemas de excitação conforme a fonte de energia primária.

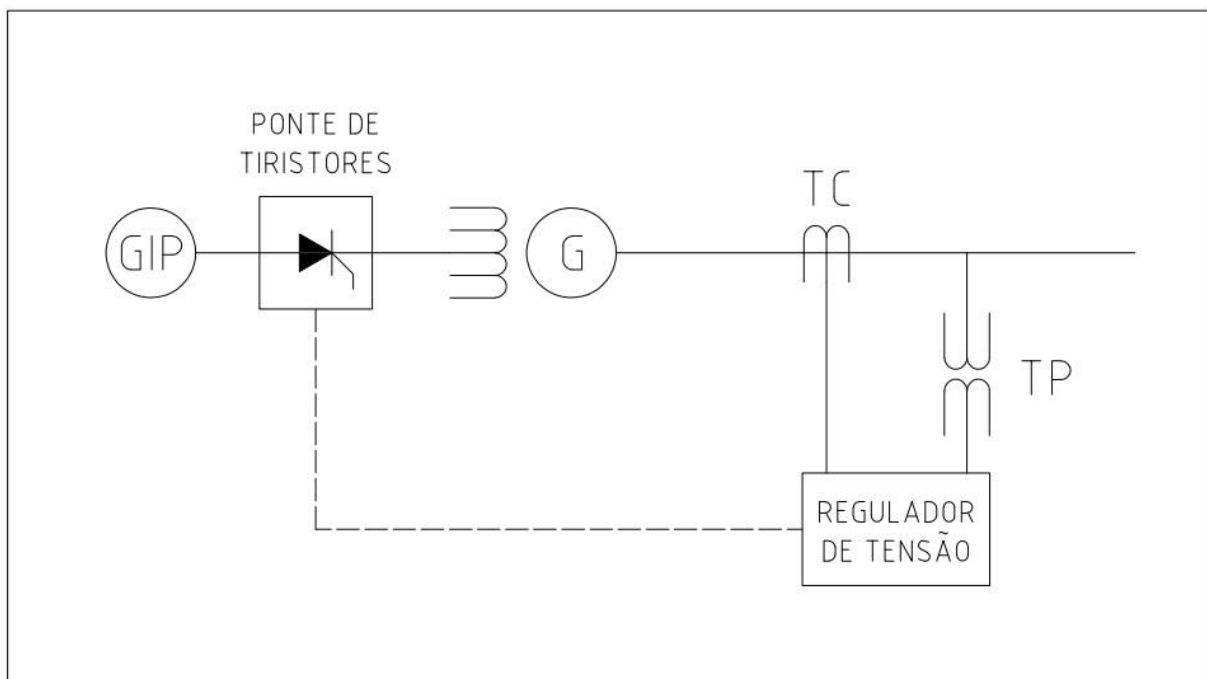


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1 Excitação Independente Direta

A fim de se obter uma máquina autossuficiente, utiliza-se uma excitatriz rotativa acoplada ao eixo. Tal excitatriz pode ser um gerador de ímã permanente ou um gerador auto excitado. Na primeira alternativa, representada na Figura 9, obtém-se uma grande confiabilidade com um desempenho não influenciado por curtos-circuitos na rede elétrica, já que o gerador de ímã permanente (GIP) é bastante resistente e não necessita de equipamentos de excitação. Em contrapartida, produz uma tensão de saída que varia com a velocidade e com a carga na máquina.

Figura 9 - Diagrama unifilar - Excitação Independente Direta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

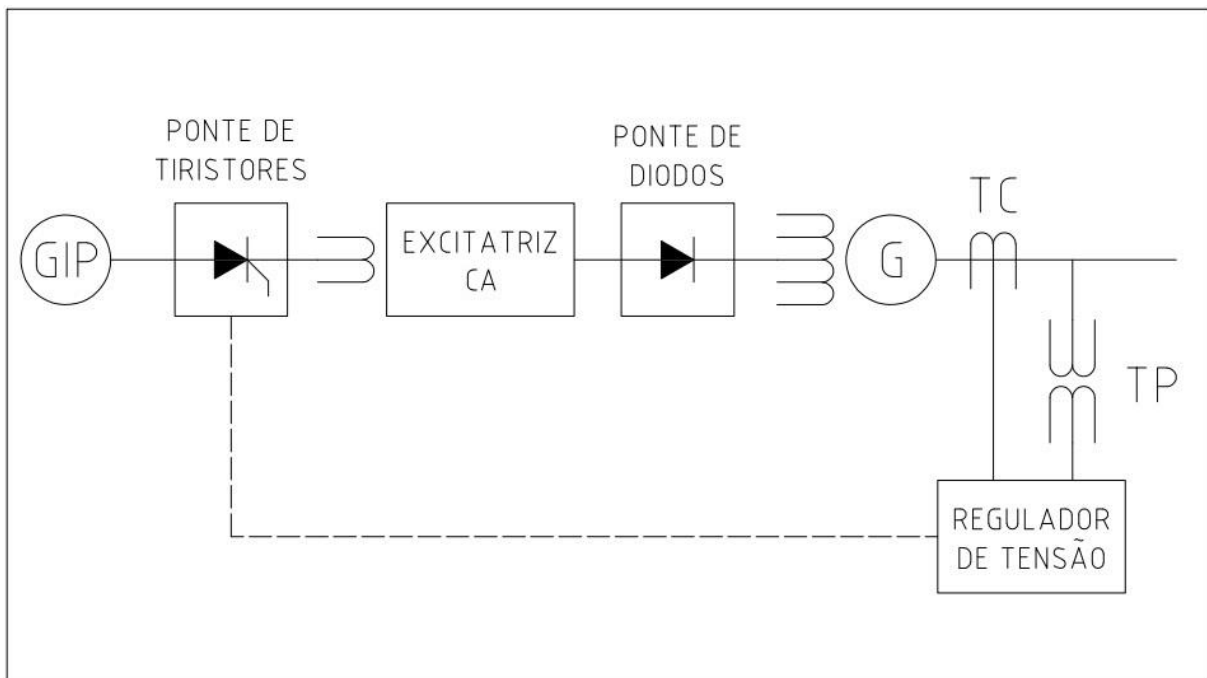
2.2.2 Excitação Independente Indireta

Com a aplicação da excitação indireta, consegue-se um arranjo robusto, com a tensão de excitação do enrolamento de campo do gerador independente da tensão nos terminais, sendo uma opção mais econômica que a independente direta.

Embora possua mais componentes nesta configuração, o dimensionamento dos componentes de excitação neste caso é direcionado à excitatriz, e não à máquina síncrona em si (esta última exigindo componentes de maior capacidade). Dessa forma, os componentes apresentam um custo menor individualmente, e os geradores de alta potência podem ser controlados utilizando um regulador de porte pequeno.

A resposta deste sistema é aprimorada ao projetar a excitatriz principal para operar em frequência superior à do gerador. A velocidade de resposta do sistema de excitação é lenta em relação a excitação independente direta. A Figura 10 contém o diagrama deste sistema.

Figura 10 - Diagrama unifilar - Excitação Independente Indireta.



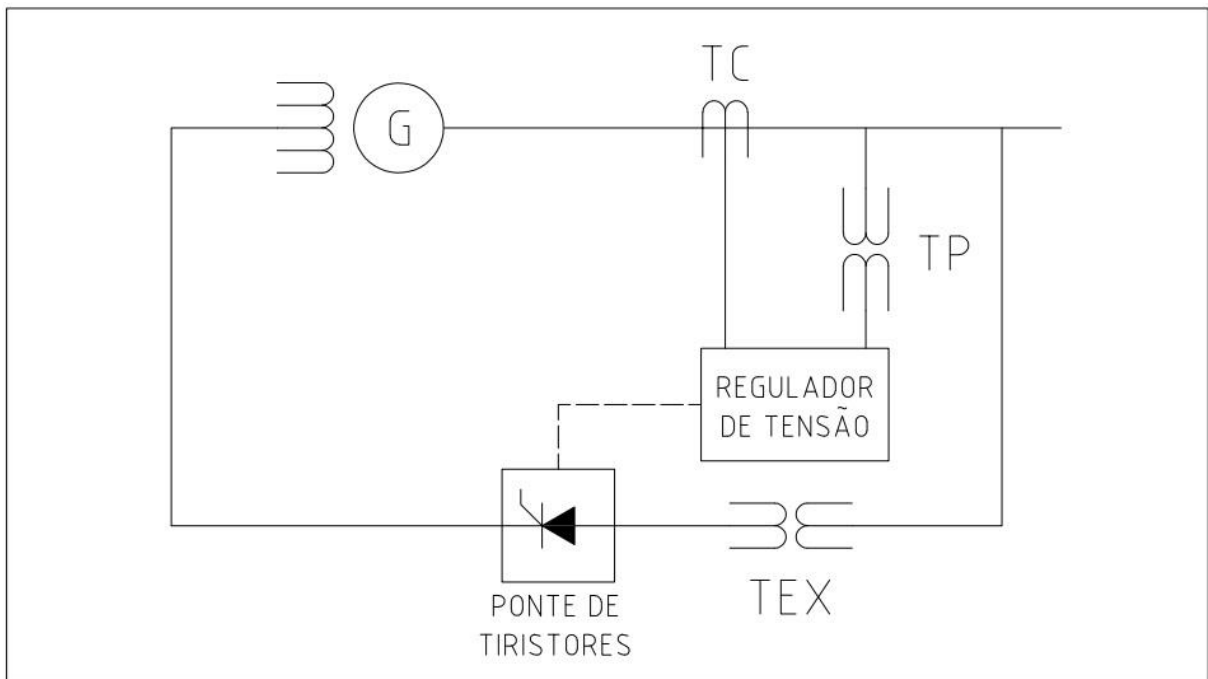
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.3 Auto Excitação Direta Simples

Nesta configuração, a energia para realizar a excitação do campo é derivada dos terminais do próprio gerador através de um transformador de excitação (TEX), retificada por uma ponte de tiristores e alimentada ao campo. Sendo assim, este arranjo, que está representado na Figura 11, é bastante simples.

Como a fonte de alimentação para os circuitos de controle do Regulador de Tensão (RT) não tem a capacidade de funcionar com o valor reduzido de tensão terminal no gerador, utiliza-se uma fonte de tensão externa (banco de baterias ou alimentação auxiliar), conectada em paralelo com a ponte de tiristores. Este arranjo é destinado à pré-excitação (ou *field flashing*). A fonte externa é removida assim que a tensão nos terminais do gerador tenha atingido um valor suficientemente alto para que a fonte de alimentação do circuito de controle possa operar.

Figura 11 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Direta Simples.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O controle é muito rápido, uma vez que o conversor tem resposta instantânea. O grande problema da auto excitação é o curto-circuito na rede elétrica, pois a tensão de excitação diminui ou desaparece totalmente, de acordo com a impedância entre o gerador e o local da falta. Levando em conta, por exemplo, um sistema isolado de um gerador fornecendo energia a uma barra com três consumidores conectados, ocorrendo um curto-circuito em um dos consumidores, este deve ser isolado através de um disjuntor ou fusível, de modo que o fornecimento aos restantes não seja interrompido. Em contrapartida, a corrente de curto-circuito do gerador tende rapidamente a zero (devido à perda de excitação).

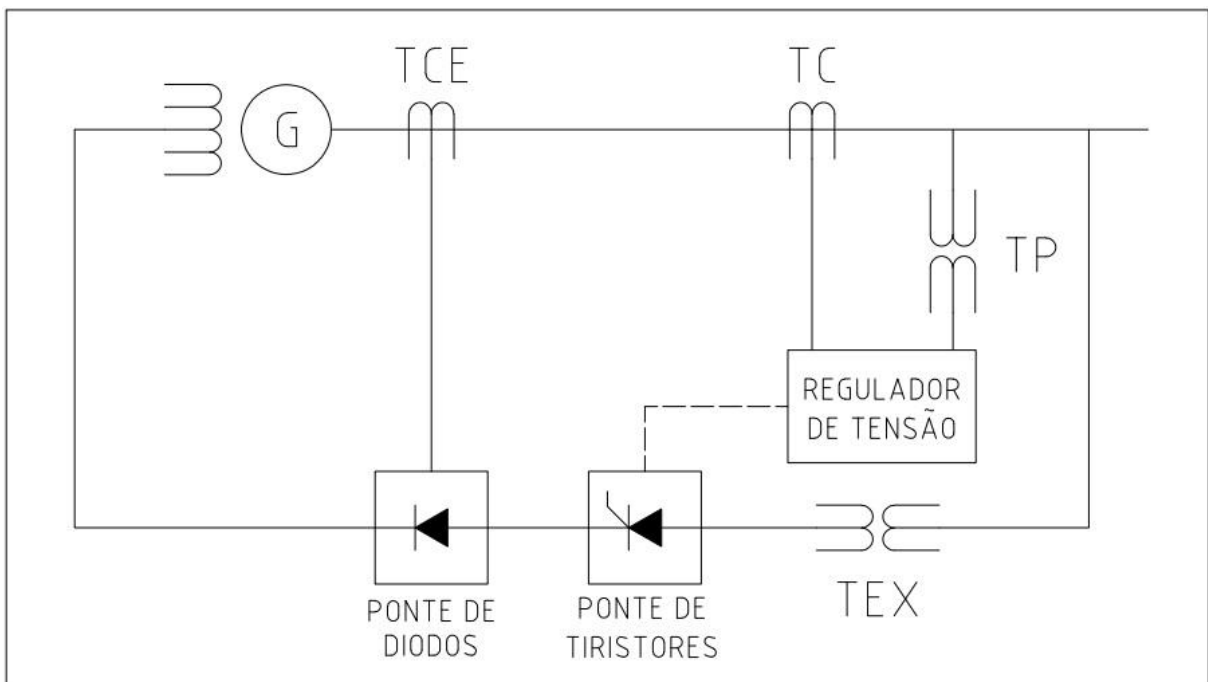
As circunstâncias são diferentes para um sistema com vários geradores. Nesta situação, a proteção deve desconectar a máquina de imediato, caso ocorra uma falta em seus terminais ou na barra de alta tensão. Na grande maioria das redes de alta tensão, os relés de proteção de linha operam tão rápido que raramente se tem incerteza quanto à abertura da linha com defeito.

2.2.4 Auto Excitação Direta Composta

Neste tipo de circuito, ilustrado pela Figura 12, uma ponte de diodos alimentada por um transformador de corrente com entreferro (TCE) é adicionada ao sistema de excitação. A corrente do gerador circula no primário, o que produz no secundário uma tensão proporcional. A tensão retificada pelos diodos é somada à tensão de saída da ponte tiristorizada. Isto é feito ao conectar as duas pontes do lado de corrente contínua (CC) em série.

O objetivo de tal composição é garantir que, no acontecimento de um curto-circuito, a excitação seja mantida durante a falta, assegurando a atuação da respectiva proteção. A contribuição do TCE é limitada pela saturação do entreferro. Esta saturação deve definir uma relação entre o custo do TCE e o desempenho em caso de um curto-circuito.

Figura 12 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Direta Composta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

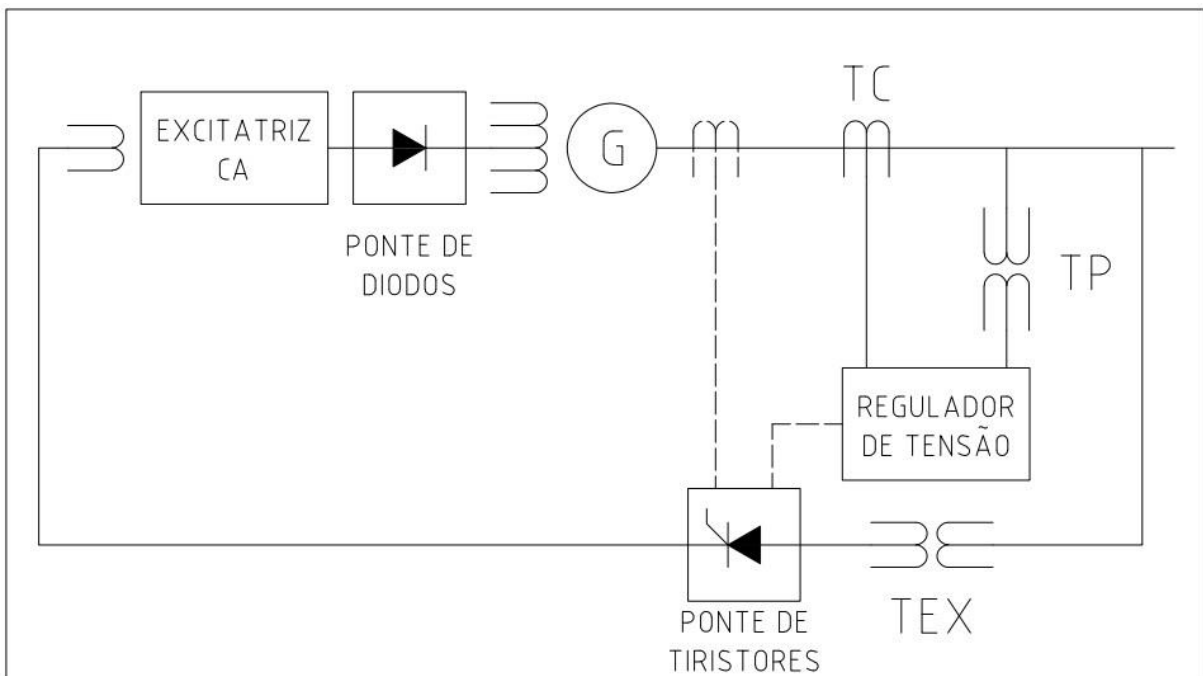
2.2.5 Auto Excitação Indireta

Nesta alternativa, uma excitatriz separada é acoplada ao rotor do gerador. Desta forma, o conversor é dimensionado para a excitatriz e, portanto, de potência menor. Esta excitatriz pode ser em corrente alternada (CA), conforme mostrado na Figura 13, ou contínua (CC), conforme mostrado na Figura 14.

Para o caso da excitatriz CA, pode-se obter um sistema sem escovas (também conhecido como *brushless*, tradução literal), montando-se os diodos retificadores, da excitatriz principal, no eixo do rotor. Sendo assim, a manutenção em anéis coletores e escovas não é necessária.

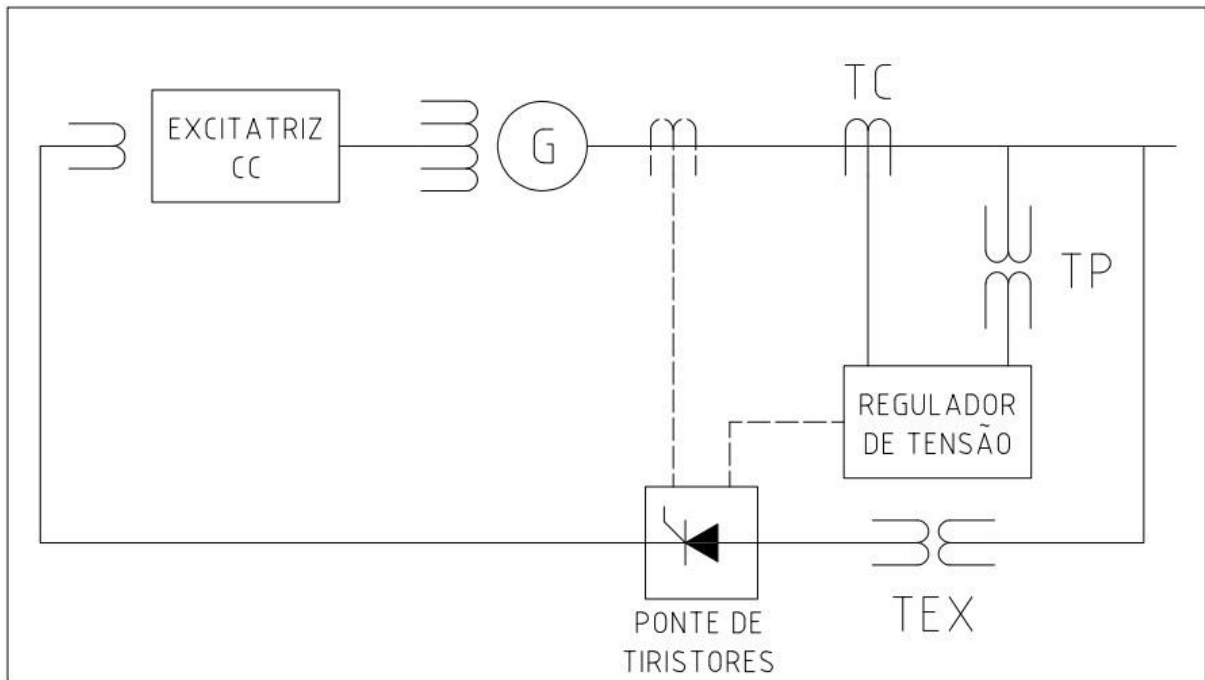
Em relação ao comportamento transitório, os sistemas indiretos são mais lentos do que os sistemas diretos. As considerações da subseção 2.2.3 (Auto Excitação Direta Simples), em relação ao curto-circuito na rede, também são aplicáveis ao sistema de excitação indireta, quanto aos tipos simples e composto.

Figura 13 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Indireta Simples com excitatriz CA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Diagrama unifilar - Auto Excitação Indireta Simples com excitatriz CC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.6 Resumo

De todos os tipos apresentados, dois deles têm sido os mais utilizados: o sistema de excitação independente indireta (*brushless*) para turbo-geradores de grande porte (usinas térmicas e nucleares), devido à não necessidade de resposta rápida destes conjuntos, e o sistema de auto excitação direta simples, em razão do bom desempenho e do menor custo. No Brasil, as UHEs mais recentes têm seus geradores equipados com este último.

A Tabela 1 apresenta um quadro geral, com um resumo das características mencionadas.

Tabela 1 - Resumo dos sistemas de excitação.

TIPO DE SISTEMA DE EXCITAÇÃO		EXCITATRIZ ROTATIVA	COMPONENTES QUE EXIGEM MANUTENÇÃO	RESPOSTA DO SISTEMA
EXCITAÇÃO INDEPENDENTE	DIRETA	CA	ANÉIS COLETORES E ESCOVAS	MUITO BOA
	INDIRETA	CA	-	BOA
AUTO EXCITAÇÃO	DIRETA SIMPLES	-	ANÉIS COLETORES E ESCOVAS	MUITO BOA
	DIRETA COMPOSTA	-	ANÉIS COLETORES E ESCOVAS	MUITO BOA
	INDIRETA SIMPLES	CC	ANÉIS COLETORES, ESCOVAS E COMUTADORES	REGULAR
		CA	-	BOA
	INDIRETA COMPOSTA	CC	ANÉIS COLETORES, ESCOVAS E COMUTADORES	REGULAR
		CA	-	BOA

Fonte: Elaborada pelo autor.

3 A EXCITAÇÃO DE GERADORES NAS HIDRELÉTRICAS

Conforme visto anteriormente, o sistema de excitação mais utilizado nas UHEs brasileiras é a Auto Excitação Direta Simples, abordada brevemente na subseção 2.2.3 (Auto Excitação Direta Simples). Sendo assim, o capítulo 3 deste trabalho apresentará os principais componentes deste sistema, suas funções individuais e em seguida um exemplo de dimensionamento para uma máquina fictícia.

A excitação dos geradores funciona da seguinte maneira: a tensão trifásica nos terminais do gerador síncrono é medida com TPs nas três fases, retificada pela ponte de tiristores e filtrada nos circuitos de entrada. O valor resultante é comparado com o valor de referência ajustado e a diferença é fornecida ao amplificador conectado em série. Desta forma, é possível ajustar a característica de controle do circuito através da variação do ganho. O comportamento dinâmico do gerador sofre a influência de tais ajustes.

[...] o regulador da tensão de excitação [...] é importante pois deve estabelecer a tensão interna do gerador síncrono. Em consequência, o sistema de excitação é responsável não somente pela tensão de saída da máquina, mas também pelo fator de potência e pela magnitude da corrente gerada. (ALVES, 2018).

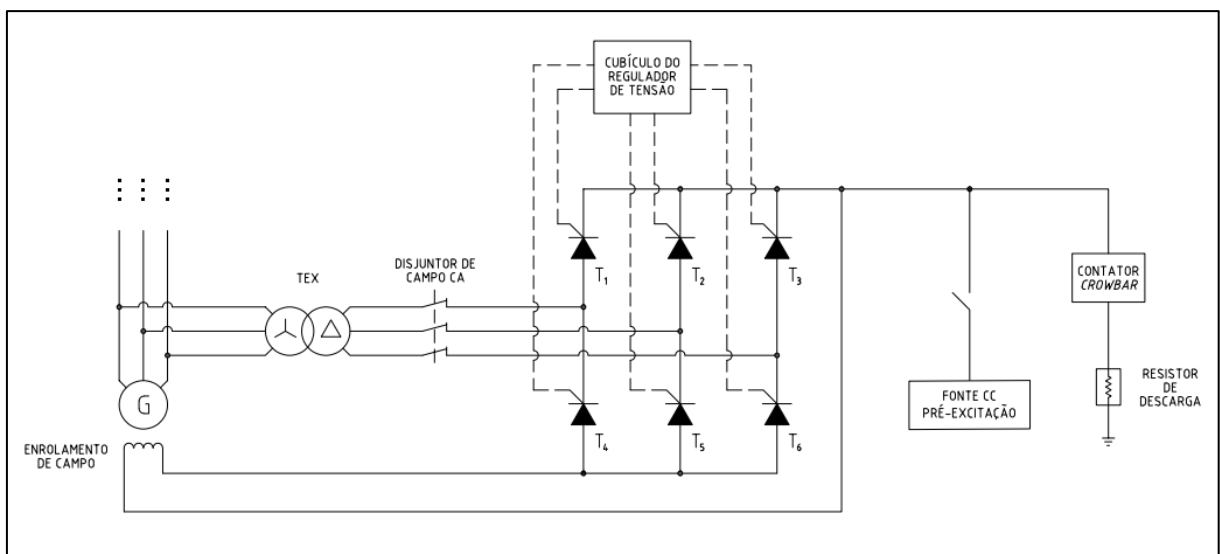
O sistema de excitação é o grupo de componentes que têm a função de alimentar o campo do gerador, com o intuito de realizar todas as ações de controle. O RT é parte integrante do sistema de excitação e está diretamente ligado a este.

Na maioria das vezes, o sistema de excitação e o RT estão tão relacionados no ponto de vista construtivo, que fisicamente se torna difícil determinar os limites entre um e outro. O RT consiste na parte inteligente do sistema, uma vez que produz o controle desejado da tensão terminal do gerador.

3.1 A LIGAÇÃO DOS COMPONENTES

Antes de identificar individualmente os componentes do sistema de excitação, é importante verificar o arranjo geral, desta vez apresentando uma visão mais detalhada da Figura 11 da subsecção 2.2.3 (Auto Excitação Direta Simples). A Figura 15 apresenta um diagrama esquemático convencional para a Auto Excitação Direta Simples.

Figura 15 - Diagrama esquemático - Auto Excitação Direta Simples.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 COMPONENTES DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

3.2.1 Circuito de Pré-Excitação

Nas situações de partida da máquina síncrona, naturalmente a tensão contínua nos barramentos do gerador é ausente, ou seja, não é possível a auto excitação neste momento. Sendo assim, a corrente contínua que alimenta os anéis coletores é proveniente de um circuito externo. Nas centrais hidrelétricas, a fonte de energia mais comum são os bancos de baterias.

Conforme a rotação da máquina aumenta, a tensão produzida na saída do gerador também aumenta. Quando esta tensão, detectada pelo RT através dos TPs, é suficientemente alta, a alimentação externa é desligada e o disjuntor de campo CA é fechado, caracterizando a auto excitação.

3.2.2 Transformador de Excitação

O TEX é um transformador do tipo abaixador, conectado aos terminais de fase da máquina síncrona, reduzindo a média tensão do gerador (geralmente 13,8 kV, 14,4 kV ou 16,5 kV) para a grandeza requerida pelo sistema. Sendo um dos principais componentes do sistema, o TEX promove também a isolamento galvânica entre a fonte de alimentação e o campo da máquina síncrona, limitando a potência de curto-circuito no lado CC.

A potência do transformador de excitação é dada pela tensão de teto e corrente de excitação contínua máxima do gerador. As sobrecargas devem estar dentro da margem de cálculo para elevação de temperatura nas condições nominais. Contudo, as condições do local de instalação, como a temperatura ambiente e altitude em relação ao nível do mar interferem consideravelmente no projeto. Nestas circunstâncias, são aplicados fatores para a redução da potência.

Figura 16 - Transformador de Excitação a seco.



Fonte: Blutrafos (2022).

3.2.3 Disjuntor de Campo

O ramal de alimentação de potência CA, oriundo do transformador de excitação, é operado através de um interruptor seccionador trifásico: o disjuntor de campo. Este dispositivo, que fica localizado entre o secundário do TEX e a entrada das pontes de tiristores, atua basicamente como um elemento de manobra.

Figura 17 - Disjuntor de campo trifásico CA.

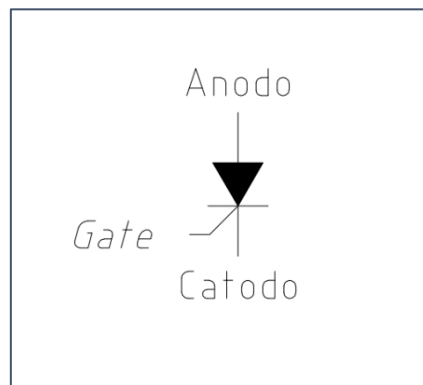


Fonte: ABB (2022).

3.2.4 Ponte de Tiristores

A ponte de tiristores (ou ponte tiristorizada) é o componente responsável pela conversão da tensão alternada trifásica, proveniente do TEX, em tensão contínua, a qual será posteriormente aplicada ao campo da máquina. Os tiristores, que são do tipo SCR (*Silicon Controlled Rectifier* – Retificador Controlado de Silício), são disparados por pulsos de corrente aplicados pelo RT nos respectivos terminais de “*gate*”.

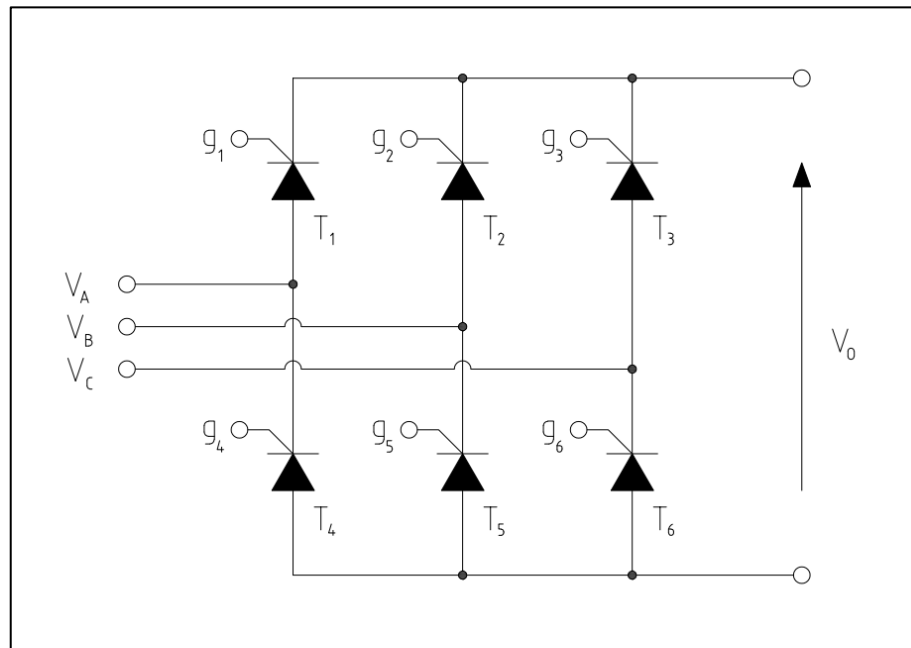
Figura 18 - Retificador Controlado de Silício.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor médio da tensão CC de saída pode ser controlado através do deslocamento do ângulo dos pulsos de disparo. Tais pulsos são gerados no circuito de controle do RT. Para isto utiliza-se um sinal senoidal como referência, o qual deve estar em fase com a tensão na ponte de tiristores. A Figura 19 apresenta o esquemático de uma ponte de tiristores convencional, e a Figura 20 é uma fotografia de cubículos comerciais de pontes tiristorizadas.

Figura 19 - Esquemático de uma ponte de tiristores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Cubículos das pontes de tiristores.



Fonte: Do próprio autor.

3.2.5 Dispositivo *Crowbar*

Dispositivo *crowbar* é o nome dado ao circuito elétrico que tem a função de proteger a máquina síncrona e a(s) ponte(s) de tiristores contra uma sobretensão no campo. Quando o *crowbar* detecta uma sobretensão CC, insere o resistor de descarga em paralelo com o campo, através do acionamento de um entre dois dos tiristores em antiparalelo presentes no dispositivo.

3.2.6 Resistor de Descarga

O resistor de descarga tem a finalidade de garantir que a energia armazenada no campo seja descarregada em forma de calor, tanto em uma desexcitação normal, quanto na ocorrência de *trips* (paradas mecânicas da máquina com frenagem de emergência) provenientes do sistema de excitação ou do sistema de proteção.

O resistor de descarga, do tipo linear, é dimensionado para suportar a abertura do disjuntor de campo do gerador (GCB - *Generator Circuit Breaker*) na condição mais crítica, isto é, um *trip* com a unidade geradora em situações de aplicação de corrente de sobrecarga, minimizando os danos ao estator. A instalação do resistor de descarga é feita paralela ao campo.

Figura 21 - Resistor de Descarga.



Fonte: OHMIC (2022).

3.2.7 Anéis Coletores e Escovas

Os anéis coletores estão na porção final do sistema de excitação, e permitem a transmissão da corrente de excitação proveniente das escovas de carvão estáticas para o enrolamento do rotor. O conjunto é instalado no topo do barril do gerador, dentro de uma carcaça, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Carcaça dos anéis coletores - UHE São Simão.



Fonte: Do próprio autor.

O conjunto de escovas consiste em escovas de carvão e porta-escovas fixos em placas com parafusos. Os barramentos da corrente de excitação são parafusados nas placas, que são ligadas às escovas de carvão via conexões flexíveis. As escovas deslizam livremente na direção radial nos porta-escovas e são pressionadas no anel coletor por molas.

A Figura 23 apresenta o interior da carcaça do anel coletor. Nesta ocasião, as escovas de carvão estão fora de posição devido ao período de manutenção. Com a máquina em operação, as escovas permanecem em contato com os respectivos anéis coletores, fornecendo a corrente contínua oriunda das pontes de tiristores.

Figura 23 - Anéis coletores e escovas - UHE São Simão.



Fonte: Do próprio autor.

3.2.8 Rotor do Gerador

Os barramentos de excitação conduzem a corrente de campo vinda dos anéis coletores para os polos do rotor. Os polos do rotor constituem o que é chamado de enrolamento de campo. Ao circular a corrente contínua de excitação por este enrolamento, é produzido um campo magnético constante, caracterizando o rotor como um eletroímã. Este campo magnético girante interage com o enrolamento do estator, resultando na indução de corrente elétrica neste último. Portanto, o campo magnético do rotor está diretamente ligado à regulação da tensão de saída no barramento trifásico do estator do gerador, objetivo final do sistema de excitação.

Nas hidrelétricas, geralmente são utilizados rotores de grande diâmetro e baixa velocidade. Desta forma, a construção destes rotores é com um grande número de polos, do tipo saliente, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 - Rotor de polos salientes.



Fonte: Seattle City Light (2021).

3.3 DIMENSIONAMENTO

Esta seção tratará de um exemplo de dimensionamento para uma máquina síncrona fictícia, visando explorar os parâmetros essenciais no projeto de um sistema de excitação, bem como apresentar as normas nacionais e internacionais aplicáveis. Os valores obtidos dos cálculos são os utilizados como base pelos fabricantes para especificar os componentes descritos na seção 3.2 (Componentes do Sistema de Excitação), com base em suas opções comerciais.

3.3.1 Dados de Entrada

A Tabela 2 contém parte dos dados de um gerador fictício, os quais são os mais relevantes e indispensáveis na realização do dimensionamento do sistema de excitação.

Tabela 2 - Dados do gerador fictício.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente	-	200,0	MVA
Tensão Nominal	-	13,8	kV
Frequência	-	60	Hz
Fator de Potência	-	0,9	-
Tensão de Campo a 130 °C	E_{campo}	250	V
Corrente de Campo Nominal	I_{campo}	2000	A
Corrente de Campo em Sobrecarga	I_{SC}	2100	A
Resistência de Campo a 75 °C	R_{campo}	0,105	Ω
Temperatura de Campo Nominal	T_2	100	°C
Constante de Tempo Transitória do Eixo Direto	T'_{d0}	8,5	s
Número de Pontes em Paralelo	N_{pontes}	2	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2 Normas Aplicáveis

Para a realização do dimensionamento dos componentes do sistema de excitação, são seguidas algumas importantes normas nacionais e internacionais, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Normas aplicáveis.

Norma	Descrição
IEEE 115-2009	<i>Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Including Acceptance and Performance Testing and Parameter Determination for Dynamic Analysis</i> – Guia para Procedimentos de Teste para Máquinas Síncronas, Incluindo Testes de Aceitação e Desempenho e Determinação de Parâmetros para Análise Dinâmica.
IEEE 421.1	<i>Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines</i> – Definições Padrão para Sistemas de Excitação para Máquinas Síncronas.
Procedimentos de Rede ONS - Submódulo 2.10	Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.3 Dimensionamento do Transformador de Excitação

3.3.3.1 Cálculo da Resistência e Tensão de Campo

De acordo com as normas IEEE 115-2009 e IEEE 421.1, para fins de definição do transformador de excitação, aplicam-se correções para os valores de resistência e tensão de campo do gerador, conforme a temperatura que a máquina atinge em regime nominal. Dessa forma, o valor de T_2 varia entre máquinas diferentes.

Para este exemplo, será considerada uma temperatura de 100 °C. Sendo assim, são utilizadas as equações (2) e (3) a seguir, onde $T_2 = 100$ °C e T_1 é a temperatura para o valor de resistência de campo conhecido, que neste caso é 75 °C, conforme a Tabela 2.

$$R_{campo(T_2)} = R_{campo(T_1)} \cdot \frac{234,5 + T_2}{234,5 + T_1} \quad (2)$$

$$R_{campo(100)} = 0,105 \cdot \frac{234,5 + 100}{234,5 + 75}$$

$$R_{campo(100)} = 0,1135 \Omega$$

$$E_{campo(T_2)} = R_{campo(T_2)} \cdot I_{campo} \quad (3)$$

$$E_{campo(100)} = 0,1135 \cdot 2000$$

$$E_{campo(100)} = 226,96 V$$

3.3.3.2 Cálculo da Tensão do Secundário

Um dos parâmetros principais na definição de um TEX é a tensão de teto. Este valor se refere à tensão direta máxima que o sistema será capaz de proporcionar nos seus terminais. Por definição do ONS, no Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede, a tensão de teto positiva deve ser “não menor que 2,5 vezes a tensão de campo nominal” (ONS, 2022, p. 11).

Portanto, a tensão do secundário do TEX, seguindo as definições da IEEE 421.1 e do ONS é calculada conforme a equação (4).

$$V_{sec} = \frac{(k_{teto} \cdot E_{campo(100)}) + 5,7}{1,25} \quad (4)$$

$$V_{sec} = \frac{(2,5 \cdot 226,96) + 5,7}{1,25}$$

$$V_{sec} = 458,49 V$$

3.3.3.3 Cálculo da Potência Nominal

Conforme norma, a potência nominal do TEX deve ser calculada considerando a máxima corrente de campo do gerador (sobrecarga) e um fator de 10% de sobredimensionamento. Para a obtenção da corrente nominal no secundário do TEX, utiliza-se a relação entre as correntes dos lados CA e CC em uma ponte de tiristores, dada pela equação (5).

$$I_{lado-CA} = 0,82 \cdot I_{lado-CC} \quad (5)$$

O valor da corrente do lado CC ($I_{lado-CC}$) é a própria corrente de campo do gerador, no regime de sobrecarga (I_{sc}). A potência trifásica nominal do TEX, levando em conta o fator de 10% é calculada conforme a equação (6).

$$S_N = 1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot V_{sec} \cdot I_{lado-CA} \quad (6)$$

Por fim, substituindo (5) em (6), tem-se a potência nominal do TEX em termos da tensão do secundário e da corrente de campo máxima, conforme a equação (7).

$$S_N = 0,902 \cdot \sqrt{3} \cdot V_{sec} \cdot I_{SC} \quad (7)$$

$$S_N = 0,902 \cdot \sqrt{3} \cdot 458,49 \cdot 2100$$

$$S_N = 1504,22 \text{ kVA}$$

3.3.4 Verificação da Tensão de Teto

Após encontrada a tensão do secundário do TEX (V_{sec}), são calculados os valores das tensões de teto positiva e negativa, para verificar se atendem aos critérios do ONS.

3.3.4.1 Tensão de Teto Positiva

A limitação para o valor da tensão de teto positiva é através do ângulo mínimo de disparo da ponte de tiristores, que é de 10° . O valor para o teto positivo deve atender ao critério descrito na subseção 3.3.3.2 (Cálculo da Tensão do Secundário).

$$V_{teto-pos} = 1,35 \cdot V_{sec} \cdot \cos(10^\circ) \quad (8)$$

$$V_{teto-pos} = 1,35 \cdot 458,49 \cdot \cos(10^\circ)$$

$$V_{teto-pos} = 609,55 \text{ V}$$

Verificação do critério:

$$V_{teto-pos} \geq 2,5 \cdot E_{campo(100)} \quad (9)$$

$$609,55 \text{ V} \geq 2,5 \cdot 226,96 \text{ V}$$

$$609,55 \text{ V} \geq 567,4 \text{ V}$$

3.3.4.2 Tensão de Teto Negativa

A limitação para o valor da tensão de teto negativa é através do ângulo máximo de disparo da ponte de tiristores, que é de 150° . O valor para o teto negativo deve ser, em módulo, “não menor que 80% do teto positivo” (ONS, 2022, p. 12).

$$V_{teto-neg} = 1,35 \cdot V_{sec} \cdot \cos(150^\circ) \quad (10)$$

$$V_{teto-neg} = 1,35 \cdot 458,49 \cdot \cos(150^\circ)$$

$$V_{teto-neg} = -536,03 \text{ V}$$

Verificação do critério:

$$|V_{teto-neg}| \geq 0,8 \cdot V_{teto-pos} \quad (11)$$

$$|-536,03 \text{ V}| \geq 0,8 \cdot 609,55 \text{ V}$$

$$536,03 \text{ V} \geq 487,64 \text{ V}$$

3.3.5 Dimensionamento do Disjuntor de Campo

O disjuntor de campo, que fica localizado no lado CA, entre o TEX e a ponte de tiristores, é dimensionado considerando uma margem de sobrecarga de 15%, conforme a equação (12).

$$I_{disj} \geq 1,15 \cdot I_{lado-CA} \quad (12)$$

Ao fazer a relação entre as correntes dos lados de CA e CC do retificador, sendo $I_{lado-CC}$ a corrente de campo do gerador no regime de sobrecarga (I_{SC}), substitui-se a equação (5) em (12), obtendo-se a equação (13).

$$I_{disj} \geq 0,943 \cdot I_{SC} \quad (13)$$

$$I_{disj} \geq 0,943 \cdot 2100$$

$$I_{disj} \geq 1980,3 A$$

3.3.6 Dimensionamento da Ponte de Tiristores

3.3.6.1 Cálculo da Corrente Nominal

A ponte de tiristores é dimensionada para atender às demandas do gerador síncrono, nos regimes nominal e transitório. Para a realização da excitação da máquina, “a capacidade de condução de corrente contínua (CC) não deve ser inferior a 110% da corrente de excitação necessária para manter o gerador operando com potência máxima e 105% de tensão nominal” (ONS, 2022, p. 11).

Deste modo, a corrente nominal da ponte de tiristores é calculada pela equação (14), onde N_{pontes} é o número de pontes em paralelo exigidas para um determinado sistema. Para este exemplo foi considerada a redundância de duas pontes (Tabela 2).

$$I_{ponte} \geq \frac{1,1 \cdot I_{SC}}{N_{pontes}} \quad (14)$$

$$I_{ponte} \geq \frac{1,1 \cdot 2100}{2}$$

$$I_{ponte} \geq 1155 \text{ A}$$

3.3.6.2 Cálculo da Tensão de Pico Reversa Repetitiva

Este parâmetro, obtido pela equação (15), é utilizado para determinar o valor máximo admissível dos picos repetitivos de tensões de bloqueio direto e reverso aplicados ao tiristor, visando evitar que ocorram disparos indesejados. Em outros termos, é a máxima tensão que pode estar nos terminais do tiristor, quando este não está conduzindo.

$$V_{RRM} \geq 2,5 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{sec} \quad (15)$$

$$V_{RRM} \geq 2,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 458,49$$

$$V_{RRM} \geq 1621 \text{ V}$$

3.3.7 Dimensionamento do Dispositivo *Crowbar*

Para determinar o dispositivo *crowbar*, duas condições são levadas em consideração:

1) A tensão de disparo do dispositivo não deve atingir 80% da tensão reversa dos tiristores, ou seja:

$$V_{crowbar} < 0,8 \cdot V_{RRM} \quad (16)$$

2) O dispositivo não deve disparar indevidamente, isto é, deve garantir que o sistema de excitação irá funcionar normalmente em toda a faixa de operação. Para isso, considera-se uma margem acima da tensão de teto do sistema.

$$V_{crowbar} > 1,6 \cdot V_{teto-pos} \quad (17)$$

Portanto, a especificação do dispositivo *crowbar* é dada pela equação (18).

$$1,6 \cdot V_{teto-pos} < V_{crowbar} < 0,8 \cdot V_{RRM} \quad (18)$$

$$1,6 \cdot 609,55 \text{ V} < V_{crowbar} < 0,8 \cdot 1621 \text{ V}$$

$$975,28 \text{ V} < V_{crowbar} < 1296,8 \text{ V}$$

Realizando uma média aritmética simples entre os valores mínimo e máximo, chega-se a um valor de referência para $V_{crowbar}$:

$$V_{crowbar} = \frac{975,28 + 1296,8}{2} \quad (19)$$

$$V_{crowbar} = 1136,04 \text{ V}$$

3.3.8 Dimensionamento do Resistor de Descarga

3.3.8.1 Resistência

Para definição do valor de resistência do resistor, são consideradas a tensão de descarga sobre o resistor (V_{RD}) e a corrente que passará por ele, a qual é a própria corrente máxima de campo (I_{SC}). A referida tensão não deve ultrapassar 50% da tensão de isolamento dos equipamentos eletrônicos presentes no campo, cujo valor típico encontrado no mercado é em torno de 3 kV. Sendo assim, para a tensão de descarga, tem-se:

$$V_{RD} \leq 0,5 \cdot 3000 \quad (20)$$

$$V_{RD} \leq 1500 \text{ V}$$

Por fim, o valor da resistência (R_D) é dado por:

$$R_D \leq \frac{V_{RD}}{I_{SC}} \quad (21)$$

$$R_D \leq \frac{1500}{2100}$$

$$R_D \leq 0,714 \Omega$$

3.3.8.2 Dissipação de Energia

Conforme visto na subseção 3.2.6 (Resistor de Descarga), o resistor de descarga deve suportar a abertura do GCB em condições de sobrecarga. Assim sendo, a energia armazenada no campo (W_{campo}) nesta condição é dada pela equação (22).

$$W_{campo} = \frac{1}{2} \cdot R_{campo} \cdot T'_{d0} \cdot I_{SC}^2 \quad (22)$$

Na ocorrência de uma descarga, o resistor é colocado em paralelo ao campo através do dispositivo *crowbar*. Portanto, existe uma relação entre a energia dissipada pelo resistor (W_{RD}) e a energia dissipada pelo próprio campo da máquina, conforme a equação (23).

$$W_{RD} = W_{campo} \cdot \frac{R_D}{R_D + R_{campo}} \quad (23)$$

Para calcular de forma direta, substitui-se (22) em (23), chegando à equação (24).

$$W_{RD} = \frac{R_D \cdot R_{campo} \cdot T'_{d0} \cdot I_{SC}^2}{2 \cdot (R_D + R_{campo})} \quad (24)$$

$$W_{RD} = \frac{0,714 \cdot 0,105 \cdot 8,5 \cdot 2100^2}{2 \cdot (0,714 + 0,105)}$$

$$W_{RD} = 1715,75 \text{ kJ}$$

3.3.9 Resultados do Dimensionamento

Com os cálculos finalizados, é possível montar as Tabelas 4 a 8, contendo os dados relevantes dos componentes dimensionados para o sistema de excitação. Cabe ressaltar, porém, que os dados contidos nas tabelas são apenas alguns fatores de especificação dentre diversos outros, tais como temperatura ambiente, grau de proteção, materiais, nível de ruído, locais de instalação, etc., os quais variam muito de uma planta hidrelétrica para outra, conforme as exigências técnicas do operador de cada planta.

Tabela 4 - Resultados - Transformador de Excitação.

Transformador de Excitação	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão Nominal do Secundário	V_{sec}	458,49	V
Potência Nominal	S_N	1504,22	kVA

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 - Resultados - Disjuntor de Campo.

Disjuntor de Campo	Símbolo	Valor	Unidade
Corrente Nominal	I_{disj}	$\geq 1980,3$	A

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 - Resultados - Ponte de Tiristores.

Ponte de Tiristores	Símbolo	Valor	Unidade
Corrente Nominal (valor por ponte)	I_{ponte}	≥ 1155	A
Tensão de Pico Reversa Repetitiva (valor por tiristor)	V_{RRM}	≥ 1621	A

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 - Resultados - Dispositivo *Crowbar*.

Dispositivo <i>Crowbar</i>	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão Mínima de Disparo	-	975,28	V
Tensão Máxima de Disparo	-	1296,79	V
Valor Médio (referência)	V_{crowbar}	1136,04	V

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 - Resultados - Resistor de Descarga.

Resistor de Descarga	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência	R_D	$\leq 0,714$	Ω
Dissipação de Energia	W_{RD}	1715,75	kJ

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 25 a seguir apresenta uma ferramenta elaborada pelo autor que auxilia nos cálculos realizados ao longo da seção 3.3 (Dimensionamento). Somente com o preenchimento dos dados de entrada (células em amarelo), todos os parâmetros são calculados, já verificando se atendem aos requisitos impostos pelas normas aplicáveis.

Figura 25 - Ferramenta de dimensionamento.

Dados de Entrada			
	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de Campo Nominal a 130 °C	E_{campo}	250	V
Corrente de Campo Nominal	I_{campo}	2000	A
Corrente de Campo em Sobrecarga	I_{SC}	2100	A
Resistência de Campo	T_1	75	°C
	$R_{campo(T1)}$	0,105	Ω
Temperatura de Campo Nominal	T_2	100	°C
Constante de Tempo Transitória do Eixo Direto	T'_{d0}	8,5	s
Número de Pontes em Paralelo	N_{pontes}	2	-
Multiplicador da Tensão de Teto	k_{teto}	2,5	-

Valores Intermediários Calculados			
	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência de Campo Corrigida	$R_{campo(T2)}$	0,1135	Ω
Tensão de Campo Corrigida	$E_{campo(T2)}$	226,96	V
Tensão de Teto Positiva	$V_{teto-pos}$	609,55	V
Tensão de Teto Negativa	$V_{teto-neg}$	-536,03	V

Resultados do Dimensionamento				
	Símbolo	Valor	Unidade	
TEX	Tensão Nominal do Secundário	V_{sec}	458,49	V
	Potência Nominal	S_N	1504,22	kVA
Disjuntor de Campo	Corrente Nominal (maior ou igual a)	I_{disj}	1980,3	A
Ponte de Tiristores	Corrente Nominal (valor por ponte; maior ou igual a)	I_{ponte}	1155,00	A
	Tensão de Pico Reversa Repetitiva (valor por tiristor; maior ou igual a)	V_{RRM}	1620,99	V
Crowbar	Tensão Mínima de Disparo	-	975,28	V
	Tensão Máxima de Disparo	-	1296,79	V
	Tensão de Referência (média)	$V_{crowbar}$	1136,04	V
Resistor de Descarga	Resistência (menor ou igual a)	R_D	0,714	Ω
	Dissipação de Energia	W_{RD}	1715,75	kJ

Verificação (Item 3.3.4)	TETO POSITIVO OK
	TETO NEGATIVO OK

Fonte: Do próprio autor.

Com os resultados obtidos, o último passo é encontrar componentes comerciais com valores nominais que atendam aos requisitos e ao mesmo tempo não se distanciem muito do dimensionamento (ex.: dobro do valor calculado).

Para este tipo de aplicação, os fornecedores especializados são capazes de atender tais exigências, sendo através da disponibilidade de uma grande gama de produtos ou até mesmo da personalização de seus projetos. Por fim, a Tabela 9 abaixo apresenta um exemplo de especificação de componentes comerciais para os resultados obtidos nesta subseção.

Tabela 9 - Exemplo de especificação com componentes comerciais.

Componente	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Transformador de Excitação	Tensão Nominal do Secundário	V_{sec}	460	V
	Potência Nominal	S_N	1550	kVA
Disjuntor de Campo	Corrente Nominal	I_{disj}	2000	A
	Corrente Nominal (valor por ponte)	I_{ponte}	1200	A
Ponte de Tiristores	Tensão de Pico Reversa Repetitiva (valor por tiristor)	V_{RRM}	1800	A
Dispositivo <i>Crowbar</i>	Tensão de Disparo	$V_{crowbar}$	1200	V
Resistor de Descarga	Resistência	R_D	0,5	Ω
	Dissipação de Energia	W_{RD}	2000	kJ

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados do dimensionamento obtidos, é possível observar que os componentes do sistema de excitação possuem valores limites na sua definição, sejam máximos ou mínimos, ao invés de valores fixos impostos pelo cálculo. Esta característica possibilita ao projetista do sistema avaliar, com base em sua experiência e atendimento às normas, se os componentes existentes no mercado atendem aos requisitos, sem se distanciarem muito dos valores encontrados. Deve-se enfatizar, no entanto, que ao especificar um componente próximo ao dimensionado, os cálculos subsequentes devem ser refeitos considerando esta diferença, utilizando os valores nominais de tal componente.

Outras divergências que podem ocorrer neste tipo de projeto, além da diferença entre valores calculados e comerciais, são as alterações nas condições do ambiente em que a máquina se encontra (ex.: temperatura e umidade), bem como a diferença entre as máquinas da planta. Em uma UHE com 20 unidades geradoras, por exemplo, será bastante difícil encontrar máquinas com características construtivas idênticas, apesar de apresentarem os mesmos dados de entrada nominais. Sendo assim, o circuito de controle do regulador digital de cada UG é responsável por realizar o controle da excitação a partir dos dados de medição, buscando anular as diferenças construtivas.

Por fim, foi possível observar que os principais motivos de as plantas hidrelétricas serem tão consolidadas no Brasil, representando mais da metade da geração de energia, são sua grande e inquestionável capacidade de geração, aliada às rígidas normas nacionais e internacionais aplicadas na definição dos equipamentos que as compõem, além do grande mercado de fornecedores que se criou em torno deste segmento.

REFERÊNCIAS

- ALVES, K. D. Estratégias de controle para turbinas hidrelétricas. **Embarcados**. [S.l.], 24 jan. 2018. Disponível em: <https://embarcados.com.br/controle-para-turbinas-hidreletricas/>. Acesso em: 18 set. 2022.
- ASEA BROWN BOVERI. **SACE Emax 2**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://new.abb.com/low-voltage/pt/produtos/disjuntores/emax2>. Acesso em: 25 out. 2022.
- BLUTRAFOS. **Transformadores de média tensão a seco**. Blumenau, 2022. Disponível em: <https://blutrafos.com.br/tipos/1/categoria/7/transformadores-de-media-tensao-a-seco>. Acesso em: 25 out. 2022.
- DORF, R. C. **Sistemas de controle modernos**. 13. ed. São Paulo: LTC, 2018.
- ENGIE. Hidrelétricas são fundamentais para o Brasil. **Um só planeta**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/patrocinado/engie/noticia/2022/02/17/hidreletricas-sao-fundamentais-para-o-brasil.ghtml>. Acesso em: 10 out. 2022.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 115**: guide for test procedures for synchronous machines including acceptance and performance testing and parameter determination for dynamic analysis. New Jersey: IEEE, 2009. 219 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 421.1**: standard definitions for excitation systems for synchronous machines. New Jersey: IEEE, 2021. 45 p.
- OHMIC. **Resistores de descarga**. Indaiatuba, 2022. Disponível em: <https://ohmic.com.br/resistores-de-descarga/>. Acesso em: 01 nov. 2022.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O sistema em números**. Brasília, set. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 15 set. 2022.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de rede**: submódulo 2.10 - requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Brasília: ONS, 2022. 37 p.
- REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE. **Sistemas de excitação e reguladores de tensão para máquinas síncronas**. Florianópolis, 2020. Disponível em: https://www.reivax.com/wp-content/uploads/2022/03/Sistemas-de-Excitacao-e-Reguladores-de-Tensao_AJG-CB_FINAL-1.pdf. Acesso em: 14 out. 2022.

SZOPA, V. Boundary dam achieves significant milestone in unit 51 overhaul with new rotor installation. **Powerlines**. Seattle, 12 maio 2021.

Disponível em: <https://powerlines.seattle.gov/2021/05/12/boundary-dam-achieves-significant-milestone-in-unit-51-overhaul-with-new-rotor-installation/>. Acesso em: 08 nov. 2022.