

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA – PECE
ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA**

DENYS AUGUSTO DA SILVA

**OPERAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS EM PEQUENAS
CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

São Paulo
2022

DENYS AUGUSTO DA SILVA

OPERAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS EM PEQUENAS
CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Monografia apresentada ao PECE –
Programa de Educação Continuada da
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos
para obtenção do título de
Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Ivan E. Chabu

São Paulo
2022

AGRADECIMENTOS

Ao meu supervisor Prof. Dr. Ivan E. Chabu, pela precisão na orientação e correção do trabalho, fundamental para a organização e conclusão do mesmo.

Agradeço à minha família por todo apoio durante a minha jornada acadêmica e profissional.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo reunir diversas informações a respeito de operação de geradores síncronos utilizados em pequenas centrais hidrelétricas. Ao longo deste trabalho, serão apresentados diversos conceitos como o princípio de funcionamento dos geradores síncronos, seus principais tipos, suas partes principais e seus diversos modos de operação. Além dos geradores, também serão apresentadas as definições e conceitos sobre as próprias pequenas centrais hidrelétricas.

Após as apresentações de todo o fundamento teórico necessário à realização do trabalho, será apresentado um estudo de caso, utilizando como base uma pequena central hidrelétrica real que servirá de modelo para o desenvolvimento de diversos estudos. Para um melhor enriquecimento teórico deste trabalho e para a apresentação de conceitos necessários para o desenvolvimento de um projeto de uma PCH, será realizado o redimensionamento dos principais componentes e equipamentos desta PCH escolhida. Após a realização dos cálculos, será realizada uma comparação com as especificações dos equipamentos presentes na usina. Esta comparação permitirá validar grande parte da teoria aplicada para o dimensionamento de equipamentos de uma PCH.

A partir da validação da teoria aplicada no redimensionamento, será realizado um estudo da operação dos geradores síncronos em função da vazão disponível no rio onde a PCH escolhida está instalada.

PALAVRAS-CHAVE: Geradores Síncronos, Operação de Usinas, Pequenas Centrais Hidrelétricas.

ABSTRACT

This work aims to gather information about the operation of synchronous generators used in small hydroelectric plants. Throughout this work, several concepts will be presented, such as the working principle of synchronous generators, their main types, their main parts and their different modes of operation. In addition to generators, definitions and concepts about small hydroelectric plants will also be presented.

After the presentations of all the theoretical fundamentals necessary to carry out the work, a case study will be presented, using a real small hydroelectric plant that will serve as a model for the development of several studies. For a better theoretical enrichment of this work and for the presentation of concepts necessary for the development of a project of a SHP, the resizing of the main components and equipment of this chosen SHP will be carried out. After carrying out the calculations, a comparison will be made with the specifications of the equipment present in the plant. This comparison will allow validating much of the theory applied to the sizing of equipment in a SHP.

From the validation of the theory applied in the resizing, a study of the operation of the synchronous generators will be carried out as a function of the available flow in the river where the chosen SHP is installed.

KEYWORDS: Operation of Power Plants, Small Hydroelectric Power Plants.

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAPCH, Associação Brasileira de PCHs e CGHs

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica

AVR, regulador automático de tensão

B , largura da pá da turbina Pelton

b' , largura do recorte da pá da turbina Pelton

ca , curso da agulha

$c1$, velocidade do jato

CGH, Central geradora hidrelétrica

CPFL, Companhia Paulista de Força e Luz

cos , cosseno

$cos\phi$, fator de potência nominal do gerador

d , diâmetro de saída do bocal

da , diâmetro da agulha

de , diâmetro de entrada do bocal

dh , diâmetro da haste

Dm , diâmetro médio da roda da turbina

$dmax$, diâmetro máximo do jato

dr , diâmetro da seção de entrada do bocal

DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

e , Tensão nos terminais de cada fase do induzido

E , excesso

E_A , força eletromotriz

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

f , frequência da tensão gerada

FMM, força magneto motriz

g , aceleração da gravidade

H , altura da queda

HP, cavalo de força

I_A , corrente de armadura

I_d , corrente de eixo direto

I_F , corrente de campo

I_q , corrente de eixo em quadratura

kV, quilovolt

kVA, quilo volt-ampere

kW, quilowatt

L , comprimento da pá da turbina Pelton

L_F , indutor de campo (excitação)

l_a , comprimento da agulha

m, metro

mm, milímetro

m/s, metros por segundo

m/s², metros por segundo ao quadrado

m³/s, metros cúbicos por segundo

MVA_r, mega volt-ampere reativo

MW, mega watt

n , rotação síncrona

N_f , número de espiras efetivas por fase

n_q , velocidade específica

p , número de pares de polos do gerador

P , potência

P_A , potência de saída do gerador

P_{ef} , potência disponível no eixo da máquina

PCH, pequenas centrais hidrelétrica

p.u., por unidade

Q , vazão

Q_{mlt} , vazão média de longo termo

Q_{50} , vazão encontrada durante 50% do tempo

Q_{80} , vazão encontrada durante 80% do tempo

Q_{95} , vazão encontrada durante 95% do tempo

Q_{100} , vazão encontrada durante 100% do tempo

$Q_{mínima}$, vazão mínima encontrada

R_A , resistência do enrolamento da armadura

R_{adj} , resistor variável de ajuste da corrente de campo

R_F , resistência do enrolamento de campo

sen , seno

S_g , potência do gerador

T , espessura da pá da turbina Pelton

T_e , torque eletromagnético

V_A , tensão nos terminais do gerador

X_{al} , reatância de dispersão da armadura

X_{φ} , reatância de magnetização

X_d , reatância síncrona de eixo direto

X_q , reatância síncrona de eixo em quadratura

$X_{\varphi d}$, reatância de magnetização de eixo direto

$X_{\varphi q}$, reatância de magnetização de eixo em quadratura

X_s , reatância síncrona

Z , número de pás

δ , ângulo de carga

φ , ângulo do fator de potência da carga

ω , frequência angular da tensão induzida

Ω , frequência de rotação do rotor

ϕ , fluxo magnético criado pelo indutor

ρ , massa específica da água

η_g , rendimento do gerador

η_t , rendimento da turbina

μ_2 , velocidade periférica da roda

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – PCH Cristina	17
Figura 2 – Gráfico com Tendências de Custos para Geradores Elétricos Síncronos	20
Figura 3 – Turbina Pelton operando na posição vertical com apenas um injetor.....	22
Figura 4 – Turbina Francis.....	23
Figura 5 – Turbina Kaplan	24
Figura 6 – Turbinas Bulbo, com gerador externo (A) e gerador no próprio bulbo (B)	25
Figura 7 – Gráfico $H \times n\eta$ para seleção de turbinas.	26
Figura 8 – Rotor de dois polos lisos de uma máquina síncrona.	28
Figura 9 – Rotor de polos salientes de uma máquina síncrona.	28
Figura 10 – Gerador Síncrono – Circuito Equivalente	32
Figura 11 – Diagrama fasorial do gerador de polos salientes.....	35
Figura 12 - Curva de capacidade do gerador de polos salientes.....	36
Figura 13 – Tipos de excitatrizes disponíveis.....	38
Figura 14 – Gerador síncrono alimentando uma carga isolada.....	40
Figura 15 – Gerador sendo ligado em paralelo a um sistema de potência em operação	42
Figura 16 – Um gerador síncrono operando em paralelo com um barramento infinito	45
Figura 17- Detalhamento das pás da turbina Pelton	52
Figura 18 - Detalhamento do bocal injetor e da agulha	56
Figura 19 – Vazões de referência do rio Itatinga.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimento do gerador síncrono em função da classe de potência.....	58
Tabela 2 – Principais vazões de referência encontradas no rio Itatinga	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. ESTADO DA ARTE	16
3. TURBINAS HIDRÁULICAS	21
3.1. Generalidades	21
3.2. Turbinas de ação ou impulso	21
3.3. Turbinas de reação.....	22
3.4. Seleção de turbinas	25
4. GERADORES SÍNCRONOS	27
4.1. Generalidades	27
4.2. Princípio de Funcionamento	29
4.3. Circuito equivalente de um gerador síncrono.....	31
4.4. Gerador de polos salientes	33
4.5. Potência e Torque no Gerador Síncrono	34
4.6. Diagrama fasorial e curva de capacidade do gerador de polos salientes	35
5. OPERAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS	37
5.1. Regulador de velocidade	37
5.2. Regulador de tensão	37
5.3. Sistema de excitação (excitatrizes).....	38
5.4. Operação isolada de um único gerador	39
5.5. Operação de geradores ligados em paralelo	41
5.6. Operação de geradores em paralelo com outros geradores de mesmo porte.....	43
5.7. Operação de geradores em paralelo em grandes sistemas de potência.....	44
6. ESTUDO DE CASO	47
6.1. Apresentação e Metodologia	47
6.2. PCH Itatinga	47
6.3. Revisão do Dimensionamento dos Principais componentes	51
6.4. Operação dos geradores da usina de Itatinga	60
7. CONCLUSÕES	66
8. BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL	68

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de PCHs e CGHs (ABRAPCH) as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são usinas hidrelétricas de tamanho e potência relativamente reduzidos, conforme classificação feita pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 1997. Esses empreendimentos têm sua capacidade dentro dos limites superior a 1 MW e inferior ou igual a 30 MW de geração de energia, além de um reservatório hídrico com área menor que 3 km². No Brasil, grande parte das PCHs operam a partir do aproveitamento do potencial hídrico de pequeno porte ou a fio d'água.

Uma pequena central hidrelétrica que opera a fio d'água, sem reservatório, não permite a regularização ou controle do fluxo d'água. Com isso em situações de estiagem a vazão disponível pode ser menor que a capacidade das turbinas, causando ociosidade de geradores, porém, quando o volume de água no rio é maior que o necessário para a geração de energia na máxima potência de geração, a água que sobra passa por cima da barragem através dos vertedouros e segue pelo curso natural do rio sem passar pelas máquinas. Este tipo de operação possui a vantagem de ocasionar baixo impacto ambiental devido à pequena área alagada, menor custo e tempo de implantação quando comparado às hidrelétricas de grande porte. Porém, apresenta o problema de não poder armazenar água excedente do período de chuvas para utilização no período seco, já que não possui um grande reservatório.

Como as PCHs estão sujeitas a variação de vazão ao longo do tempo, também estão sujeitas a variação de seu potencial hidrelétrico disponível para geração. Para que essa operação seja realizada da melhor maneira possível, é preciso conhecer toda a teoria aplicada aos geradores síncronos, principalmente no que tange ao seu funcionamento e operação. Um gerador síncrono é uma máquina destinada a converter a energia mecânica em energia elétrica. Esta energia mecânica que movimenta o rotor dos geradores é proveniente das Turbinas hidráulicas. As turbinas hidráulicas são equipamentos destinados a converter a energia potencial e cinética presente na pressão e vazão das águas em energia mecânica disponível no seu

eixo para ser transmitida ao rotor do gerador, para a conversão final em energia elétrica.

Um gerador síncrono pode ser basicamente operado de diversas maneiras: operação isolada, operação em paralelo com outros geradores e operação em paralelo com a rede elétrica de grande porte. Para cada tipo de operação de geradores, há particularidades que devem ser observadas para que os geradores operem com a máxima eficiência possível.

Como a vazão de água em uma PCH a fio d'água pode sofrer variações significativas ao longo do tempo, o estudo da operação de geradores se torna algo indispensável para que estas máquinas operem com a maior eficiência possível, nos variados regimes de vazão. Este trabalho tem por objetivo principal mostrar a operação de geradores síncronos em PCHs a fio d'água.

2. ESTADO DA ARTE

As pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) possuem um papel importante como alternativa para a geração complementar de energia no intuito de atender ao atual crescimento da demanda energética do país e a fim de alcançar maior disponibilidade de geração de energia. Este tipo de usina possui importantes características, como: minimização dos impactos socioambientais; pequeno prazo de implantação e investimentos menores quando comparadas as Usinas Hidrelétricas convencionais. Albarello (2014) procurou demonstrar como são consideradas as questões referentes às Pequenas Centrais Hidrelétricas e quais são os materiais utilizados em sua confecção, bem como os respectivos cuidados referentes a qualidade dos mesmos. O mesmo autor também apresentou os principais tipos de PCH e as suas características, bem como os serviços de manutenção e operação, os impactos ambientais, os aspectos econômicos e a questão da eficiência energética.

Ainda segundo Albarello (2014) e o Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ANEEL, 2003, p. 21), são consideradas Pequenas Centrais Hidrelétricas ou PCH “os empreendimentos hidrelétricos com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km²”.

O mesmo autor cita os tipos de PCH. No Brasil as Pequenas Centrais Hidrelétricas classificam-se da seguinte maneira:

- De acordo com a capacidade de regularização:
 - A fio d'água: são unidades que não dispõem de reservatório de água, ou o têm em dimensões menores do que poderiam ter.
 - Acumulação diária com regularização diária do reservatório: este tipo de PCH é aplicado quando as vazões de estiagem do canal são menores que a necessária para fornecer a potência para atender à demanda máxima do mercado consumidor e acontecem com risco superior ao adotado no momento de projeto. Desta forma, o reservatório oferecerá o adicional exigido de vazão regularizada.

- Acumulação diária com regularização mensal do reservatório: À medida em que são considerados somente os dados de vazões médias mensais no dimensionamento energético, priorizando a análise de vazões de estiagem médias mensais, admite-se que o projeto apresente uma regularização mensal das vazões médias diárias, propiciada pela utilização do reservatório.
- Quanto ao sistema de adução:
 - Adução em baixa pressão com escoamento livre em canal em conduto forçado;
 - Adução em alta pressão por meio de tubulação de alta pressão em conduto forçado.
- Quanto à potência instalada e altura de projeto.

A figura 1 mostra a ilustração de um exemplo de PCH, a usina de Cristina, localizada no rio Lambari no município de Cristina no Estado de Minas Gerais.

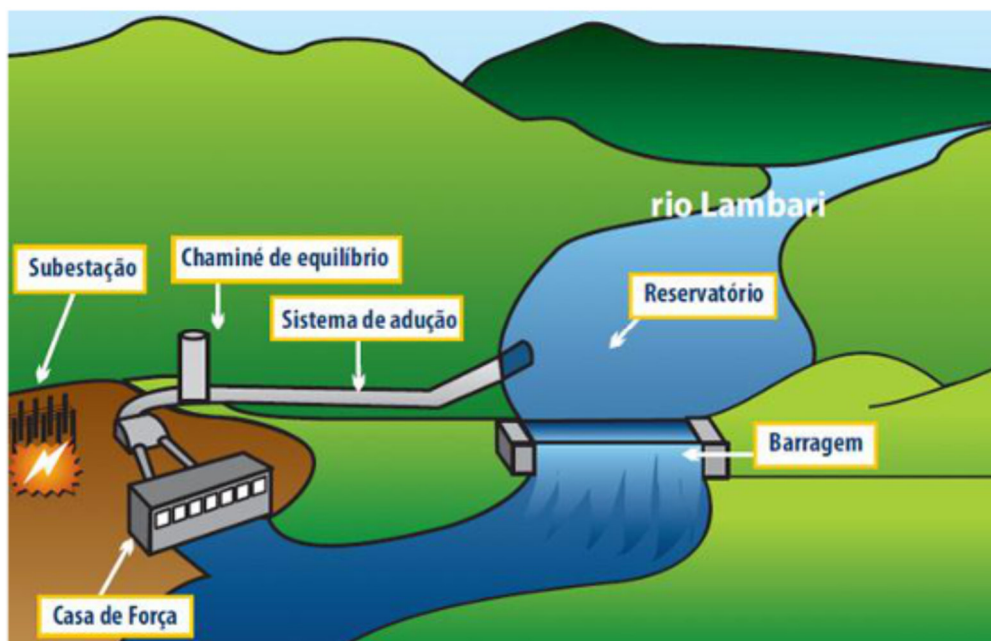


Figura 1 – PCH Cristina

Fonte: Albarello (2014)

Alexandre (2004) aprofundou-se na teoria sobre turbinas para Pequenas Centrais Hidrelétricas. Em seu trabalho, pretendeu-se, especificamente para geração de energia elétrica através desse tipo de aproveitamento, estabelecer um roteiro completo para pré-dimensionar turbinas hidráulicas, e implementar um roteiro em sistema computacional, e criar uma interface de software de fácil uso. A partir das

variáveis: vazão do rio, altura de queda do rio, e altitude local, as quais são fornecidas pelo usuário do sistema computacional, são proporcionados os resultados: cálculo da rotação específica e altura máxima de sucção; fator cavitação; rendimento e potência da turbina hidráulica e as dimensões principais do rotor, caixa espiral e tubo de sucção.

Assim como Albarello (2014), Alexandre (2004) também traz os conceitos básicos que norteiam as pequenas centrais hidrelétricas, porém, quanto à classificação, Alexandre (2004) adota os requisitos e diretrizes da portaria nº 136, de 06/10/87, do DNAEE, que estabelece e define a PCH da seguinte maneira:

- Estabelece que, para fins de análise pelo DNAEE do projeto relativo a PCH, serão observados os Manuais elaborados pela ELETROBRÁS;
- Permite a aceitação de soluções de engenharia e planejamento não contempladas nos referidos manuais, desde que torne mais conveniente o projeto e conduza a um custo final da energia gerada inferior a qualquer outra alternativa de suprimento, para o mercado a ser atendido.

O trabalho de Alexandre (2004) também aborda temas importantes como as partes e equipamentos que compõe uma PCH, como, por exemplo, as turbinas hidráulicas que são os equipamentos responsáveis por transformar a energia de escoamento contínuo da água que a atravessa em trabalho mecânico. As turbinas basicamente são classificadas em:

- De reação: aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de reação são do tipo Francis e hélice (Kaplan), podendo ser: de eixo horizontal, vertical ou inclinado; com um ou mais rotores; em caixa aberta ou fechada; com tubo de sucção cônico reto ou cônico em cotovelo;
- De ação: aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação exclusiva da energia cinética da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de ação são do tipo Pelton; podendo ser: de eixo vertical ou horizontal; com um ou mais rotores; com um ou mais injetores.

O estudo realizado por Silva, Quintino e Della Piazza (2016), apresenta um trabalho que explanou os conceitos das pequenas centrais hidrelétricas, e a utilização dos geradores síncronos, com potência instalada superior a 1 MW e igual ou inferior à potência de 30 MW de acordo com a ANEEL em regulamento de nº 394 de dezembro de 1998. Este trabalho apresentou os principais equipamentos em uma PCH e informou sua forma de operação nestas instalações. No estudo apresentado estão as características técnicas dos principais equipamentos de uma PCH, além de trazer conceitos técnicos que permitem estimar o potencial hidrelétrico de uma PCH, possibilitando a escolha da turbina e do gerador apropriado para um determinado projeto.

Silva, F. B (2010), utilizando os princípios teóricos apresentados por Silva, Quintino e Della Piazza (2016), apresentou um estudo do potencial energético para a complementação da geração da Usina Hidrelétrica Amador Aguiar I, através da implantação de uma Pequena Central Hidrelétrica que será instalada nas proximidades do vertedouro desta usina hidrelétrica. Nesse estudo, Silva, F. B (2010) realizou a comparação entre os valores especificados dos principais equipamentos eletromecânicos, contidos no Relatório Final do Projeto Básico da Pequena Central Hidrelétrica, que foi elaborado a pedido do Consórcio Capim Branco Energia e a maneira em que estes estão especificados no guia de Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas da Eletrobrás.

Na tese defendida por Lima (2002), foi apresentada uma proposta de padronização para projetos elétricos de pequenas centrais hidrelétricas, tendo como objetivo a otimização de algumas soluções para os casos mais comuns, considerando a grande diversidade de opções. Neste trabalho, foram salientadas as principais características de emprego dos componentes elétricos de uma PCH, de maneira a definir de uma forma prática as melhores condições para aplicação desses componentes. Também foi apresentado no trabalho o levantamento de pontos para implantação de um sistema semi-automatizado e automatizado, estabelecendo um critério para otimização de alguns recursos necessários a um sistema de supervisão. Como resultado, o estudo elaborado chegou a um modelo de especificação para projetos elétricos abordando as condições específicas dos equipamentos elétricos e

hidromecânicos. A figura 2 mostra uma curva levantada por Lima (2002) para estimar as tendências de custos para geradores síncronos.

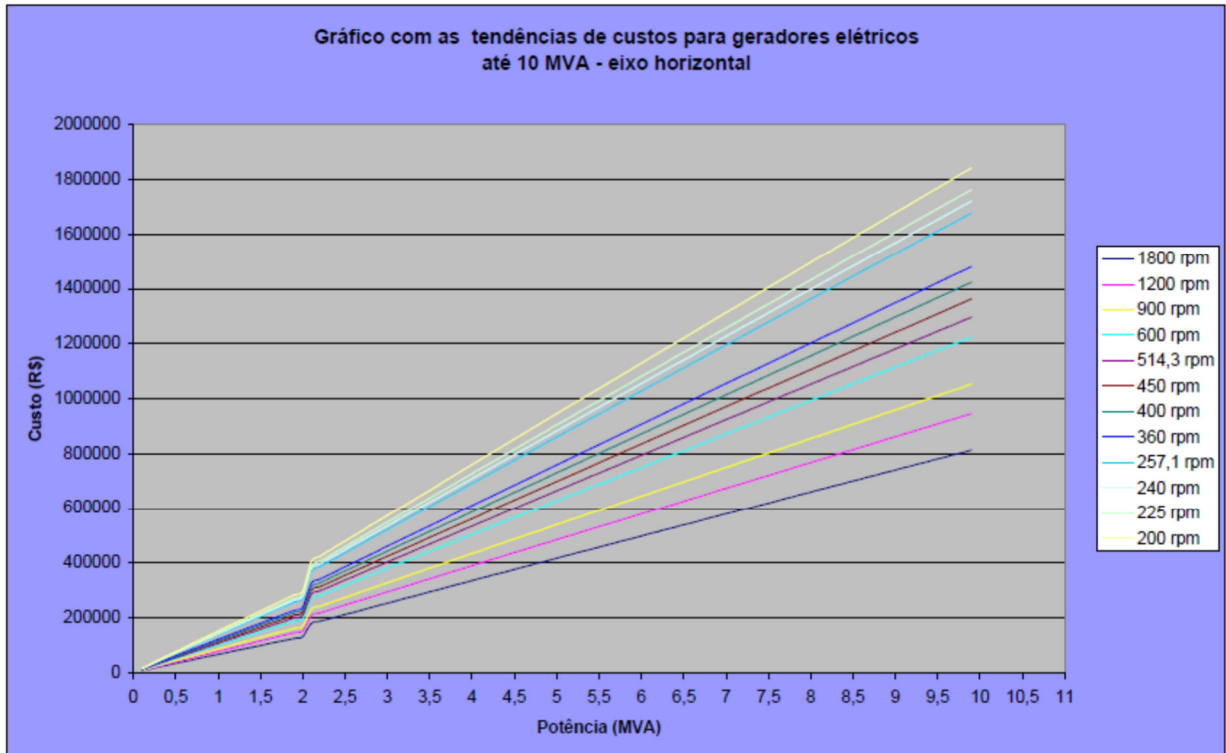


Figura 2 – Gráfico com Tendências de Custos para Geradores Elétricos Síncronos

Fonte: Lima (2002)

3. TURBINAS HIDRÁULICAS

3.1. Generalidades

As Turbinas hidráulicas são máquinas que têm por função transformar a maior parte da energia de escoamento contínuo da água que a atravessa em trabalho mecânico. Atualmente são usados basicamente dois tipos de turbinas hidráulicas: as de ação (ou impulso) e as de reação.

3.2. Turbinas de ação ou impulso

As turbinas de ação são aquelas em que a conversão de energia potencial em cinética é obtida quando um fluido é dirigido até um injetor, formando um jato de fluido em alta velocidade. Este jato impacta nas pás do rotor, convertendo a energia cinética da água em energia mecânica no eixo da turbina. A turbina de impulso com maior eficiência é a Pelton. Segundo Macintyre (1983), A turbina Pelton, também conhecida como roda Pelton, foi criada em 1880, pelo norte americano Lester Allen Pelton. As turbinas Pelton são projetadas para operar em altas quedas e baixas vazões. Caracterizam-se por um rotor com pás em formato de conchas e por uma tubulação de adução que alimenta um ou mais injetores. A posição do eixo pode ser vertical ou horizontal. A figura 3 ilustra uma turbina Pelton com apenas um injetor.

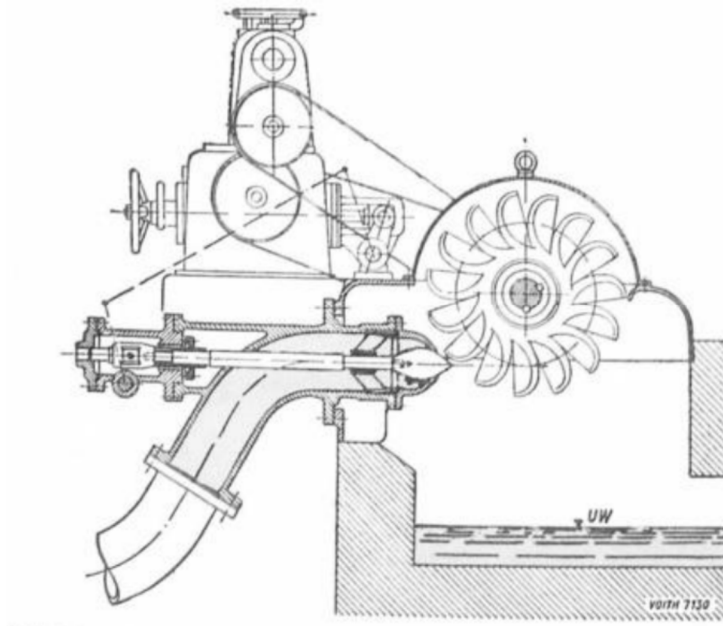


Figura 3 – Turbina Pelton operando na posição vertical com apenas um injetor

Fonte: Macintyre (1983)

3.3. Turbinas de reação

As turbinas de reação são aquelas onde o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). Elas consistem de alguns elementos básicos, como pré-distribuidor e palhetas ou pás do rotor (rotativas ou fixas). A água ao entrar no rotor em alta velocidade e pressão, transfere sua energia cinética para o rotor, convertendo-a em trabalho mecânico. Após esta transferência de energia, a água sai do rotor a baixa pressão direta de volta para o rio ou outro curso d'água. As principais turbinas de reação são as turbinas Francis, as turbinas Kaplan e as turbinas Bulbo.

Segundo Macintyre (1983), A turbina Francis foi criada em 1847 por James Bicheno Francis, que se inspirou na turbina patenteada por Samuel Dowd nove anos antes, em 1838.

As turbinas Francis permitem sua instalação em uma maior faixa de aplicação relacionada à queda/vazão. O distribuidor da Turbina Francis possui um conjunto de pás móveis, cujo objetivo é ajustar o ângulo de entrada da água, dando maior

rendimento à turbina em uma grande faixa de operação. A faixa de operação a qual essa turbina funciona com eficiência fica entre 45 e 550 metros de queda, em potência de 250 kW a 50 MW e 10 a 700 m³/s de vazão. São projetadas com rotor simples (para eixo vertical ou horizontal) ou com rotor duplo (para eixo horizontal). A figura 4 mostra um exemplo de turbina Francis

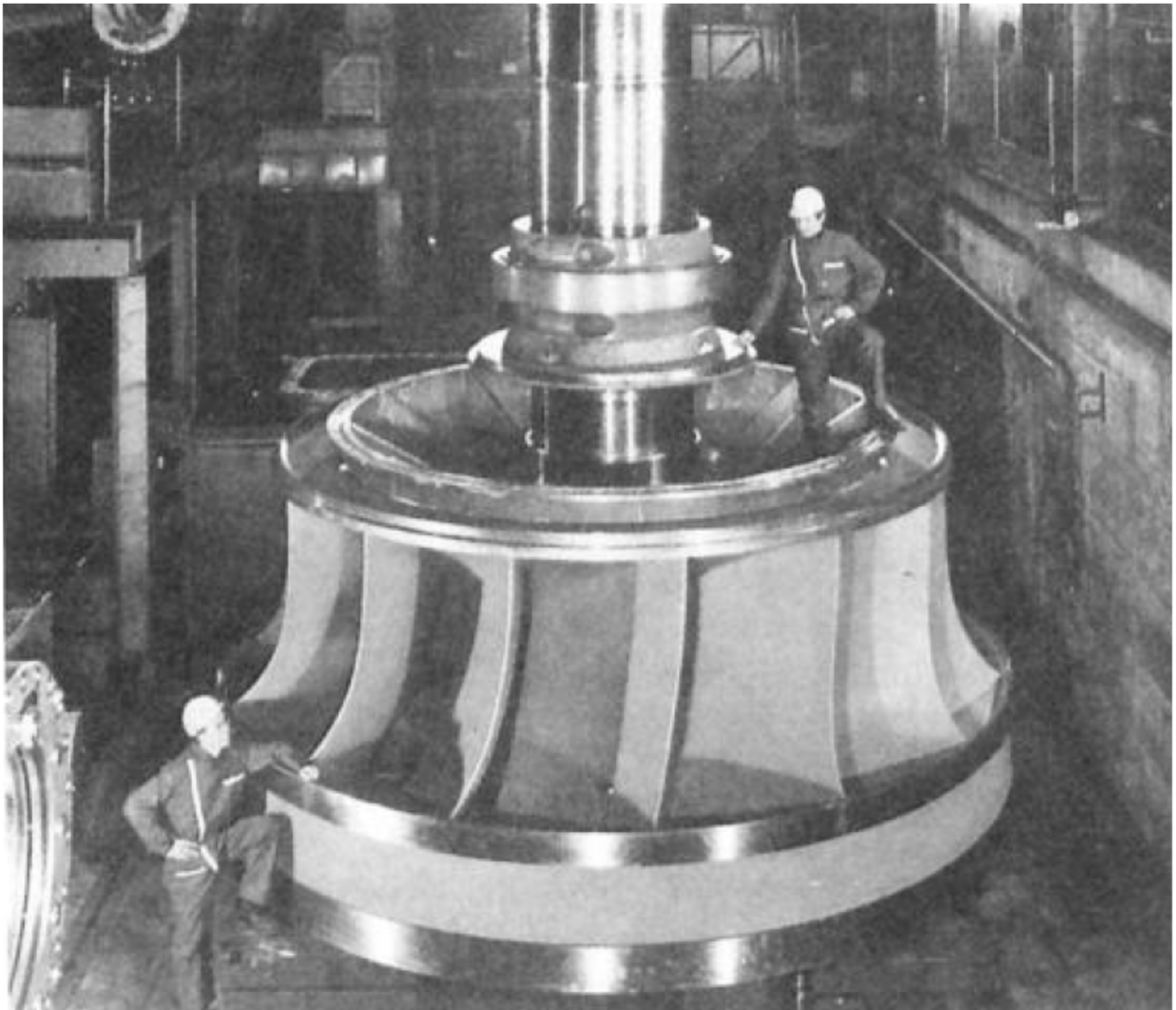


Figura 4 – Turbina Francis

Fonte: Macintyre (1983)

Ainda segundo Macintyre (1983), A turbina Kaplan foi criada em 1912 pelo austríaco Victor Kaplan. As turbinas Kaplan operam em uma ampla faixa de vazão, alcançando melhor performance na curva de rendimento com cargas parciais. São máquinas de eixo vertical ou horizontal projetadas com rotor que possui pás móveis, permitindo sua regulação conjugada com a vazão do distribuidor. Podem ser

aplicadas nas versões Kaplan S Montante, Kaplan S Jusante, Kaplan Saxo, Kaplan Open Pit, e Kaplan Vertical. A Turbina Kaplan é projetada para situações onde se têm uma pequena queda, mas um grande volume de água. Assim, ela opera com maior eficiência em quedas de até 60 metros, com potências de 500 kW a 30MW. A figura 5 ilustra um exemplo de turbina Kaplan.

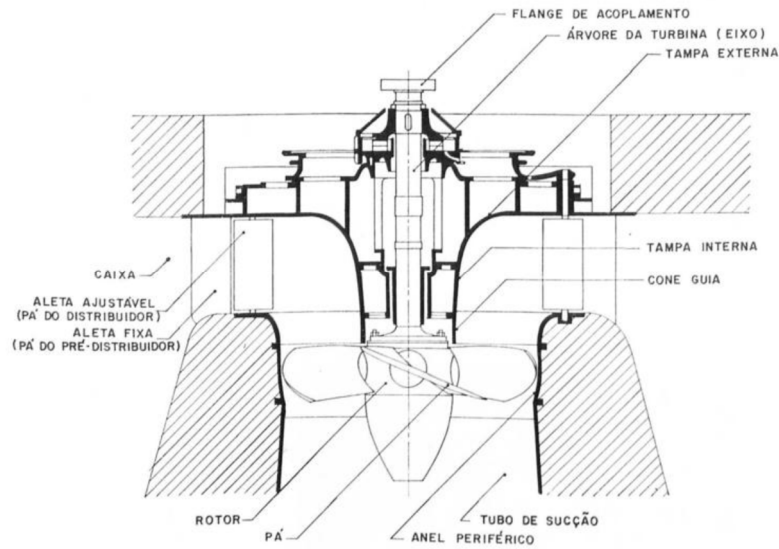


Figura 5 – Turbina Kaplan

Fonte: Macintyre (1983)

As turbinas de Bulbo possuem rotor com pás orientáveis como as turbinas Kaplan e existe uma espécie de bulbo colocado dentro do tubo adutor de água. O interior do bulbo funciona como uma câmara blindada, podendo existir um sistema de engrenagens para transmitir o movimento do eixo ao gerador ou, nos tipos mais avançados, no interior do bulbo pode abrigar o próprio gerador. A figura 6 ilustra dois exemplos de turbina bulbo, uma com gerador externo (A) e a outra gerador no próprio bulbo (B).

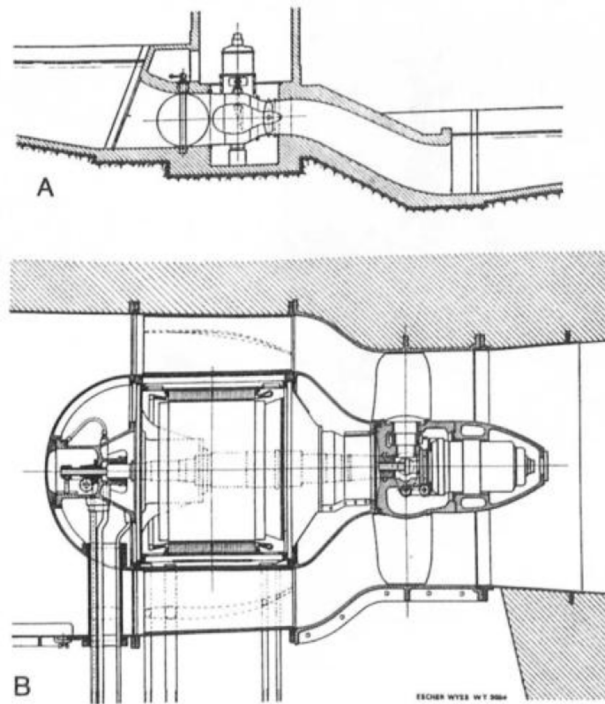


Figura 6 – Turbinas Bulbo, com gerador externo (A) e gerador no próprio bulbo (B)

Fonte: Macintyre (1983)

3.4. Seleção de turbinas

Para a implantação de uma PCH é necessário determinar a capacidade de geração e escolher as turbinas adequadas para a obtenção do melhor aproveitamento energético possível. Deve ser definida a quantidade de turbinas, a vazão máxima turbinada, a forma de operação, os valores de quedas disponíveis, as elevações máximas e mínimas dos reservatórios a montante e jusante das turbinas, o tipo e potência máxima da turbina e a energia gerada.

Para a escolha da turbina, é necessário obter os valores da queda líquida H e da velocidade específica n_q . A velocidade específica é o fator que relaciona a queda H , a vazão Q e a rotação síncrona n . Para a determinação da velocidade de rotação da turbina, é necessário levar em consideração o projeto do gerador, pois no projeto será definido o número de pares de polos e os diâmetros do rotor e estator. A equação 1 permite o cálculo da velocidade específica.

$$n_q = n \cdot \left(\frac{Q^{0,5}}{H^{0,75}} \right) \quad (1)$$

Após o levantamento da velocidade específica, utiliza-se o gráfico da figura 7 para determinar qual o tipo de turbina é o mais adequado para atender as exigências do projeto.

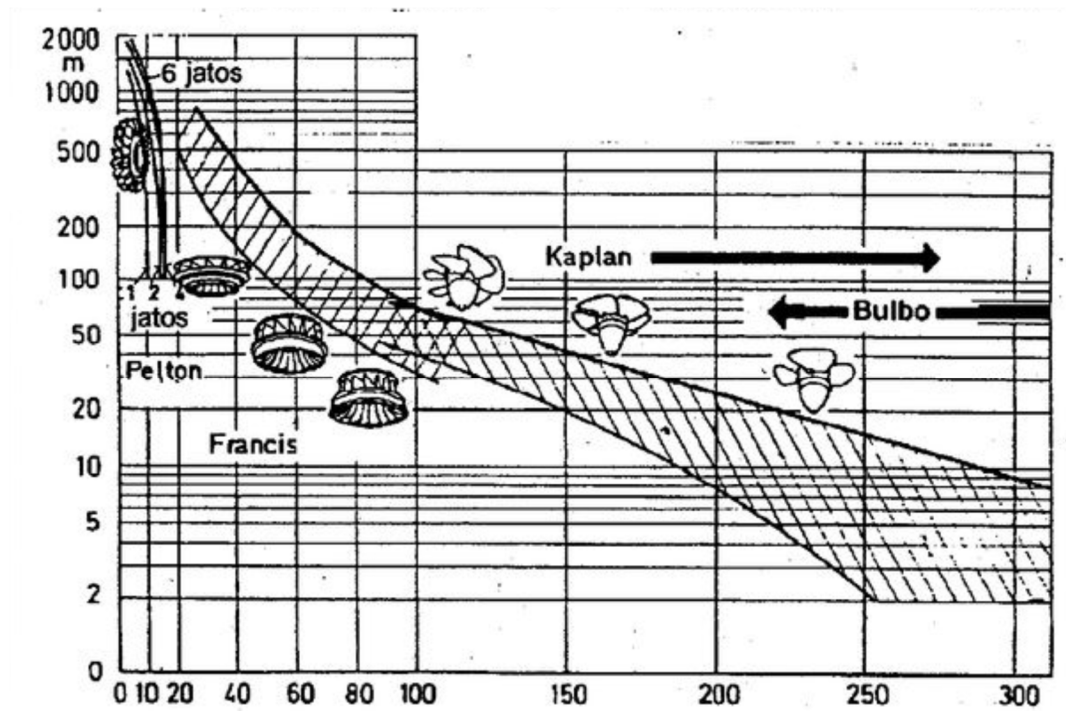


Figura 7 – Gráfico $H \times n_q$ para seleção de turbinas.

Fonte: <https://slideplayer.com.br>

4. GERADORES SÍNCRONOS

4.1. Generalidades

Os geradores síncronos são máquinas elétricas responsáveis por converter a potência mecânica disponível no eixo em potência elétrica nos seus terminais. Os geradores acoplados às turbinas hidráulicas são chamados de hidrogeradores.

As máquinas síncronas operando como motor ou operando como gerador possuem duas partes fundamentais:

- Estator: onde estão alojados os enrolamentos denominados enrolamentos de armadura.
- Rotor: onde está alojado o enrolamento de campo.

Existe a máquina síncrona chamada de conversor síncrono cujo enrolamento de campo está no estator e o enrolamento de armadura no rotor. Essa configuração é menos usual. Neste estudo, toda explicação e modelagem serão baseadas na configuração anterior.

Os rotores encontrados em máquinas síncronas são de dois tipos:

- Polos lisos ou rotor cilíndrico: os polos magnéticos são formados por bobinas distribuídas em ranhuras de pequena abertura em relação ao passo polar (amplitude ocupada por um polo magnético ao longo da circunferência do rotor). Constroem-se deste modo máquinas que rodam a velocidades relativamente elevadas uma vez que não se ultrapassa com este tipo de enrolamento os 2, 4 ou 6 polos, embora possam ser construídos, em potências reduzidas, até com 12 ou 14 polos. A figura 8 ilustra um rotor de polos lisos.

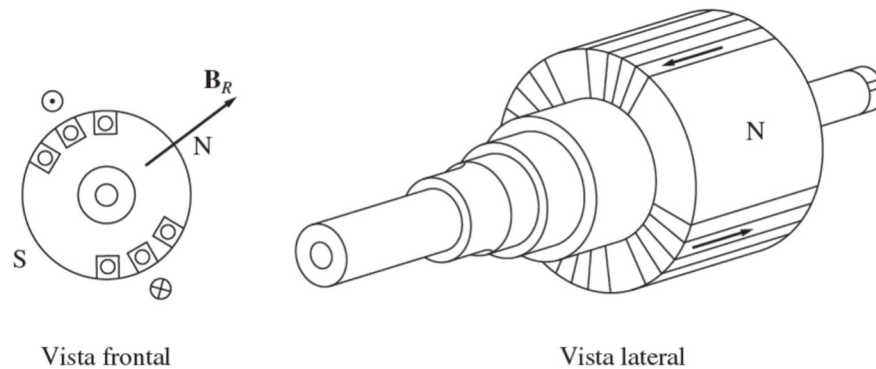


Figura 8 – Rotor de dois polos lisos de uma máquina síncrona.

Fonte: Chapman (2013)

- Polos salientes: nesse tipo de rotor, os polos são formados por bobinas concentradas executadas em torno de peças ferromagnéticas denominadas peças polares, restando distâncias grandes entre polos contíguos quando comparadas ao passo polar. Este tipo de rotor é o mais utilizado em geradores síncronos utilizados em PCHs. A figura 9 ilustra um rotor de polos salientes.

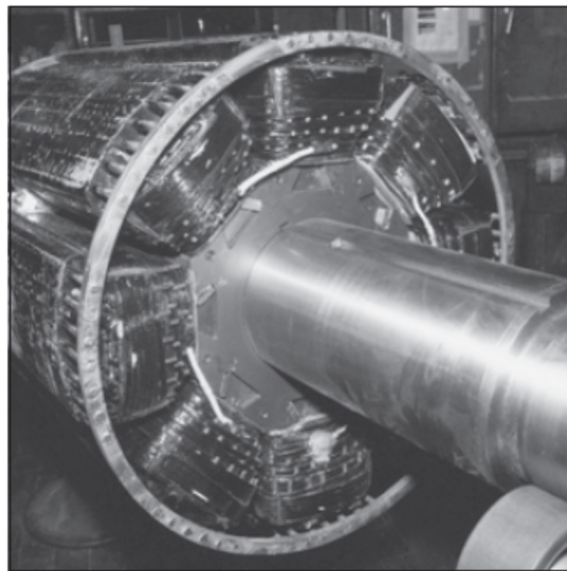


Figura 9 – Rotor de polos salientes de uma máquina síncrona.

Fonte: Chapman (2013)

As máquinas síncronas são máquinas de corrente alternada na qual a frequência da tensão induzida e a velocidade possuem uma relação constante.

A sua velocidade de rotação é por esse motivo designada a velocidade de sincronismo e é dada pela equação:

$$n = (f \cdot 60)/p \quad (2)$$

Onde:

n = velocidade de rotação síncrona (rpm);

f = frequência da tensão gerada (Hz);

p = Número de pares de polos do gerador.

4.2. Princípio de Funcionamento

No gerador síncrono, uma corrente contínua é aplicada ao enrolamento de campo ou de excitação localizado no rotor, a qual produz uma distribuição de campo magnético no entreferro. O rotor, ou indutor, então é acionado por uma máquina primária, produzindo um campo magnético girante no interior da máquina. Este campo girante induzirá um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos do estator. O fornecimento de corrente contínua ao enrolamento de campo pode ser feito de duas maneiras:

- O fornecimento é feito de uma fonte externa por meio de anéis coletores e escovas. Esta opção gera muitos problemas para operação da máquina, pois aumenta a quantidade de intervenções para manutenção. Esse método é denominado excitação estática.
- Fornecimento de potência a partir de uma fonte especial montada diretamente no eixo do gerador síncrono, denominada excitatriz rotativa.

Em grandes geradores, as excitatrizes sem escovas (*“brushless exciters”*) são usadas para a geração da corrente de campo para a máquina. Uma excitatriz sem escova é um pequeno gerador de corrente alternada com seu circuito de campo montado no estator e o circuito de armadura montado no rotor. A saída trifásica da excitatriz é retificada para corrente contínua, por um circuito retificador trifásico também montado no próprio rotor. Isto então alimenta o circuito de campo principal da máquina.

A partir do momento em que o indutor cria um campo magnético, ao fazer rodar o rotor a uma velocidade constante, vai aparecer uma tensão induzida nos terminais de cada fase do estator, tensão essa dada pela equação 3:

$$e = 2 \cdot \pi \cdot N_f \cdot \phi \cdot f \cdot \cos(\omega t) = \omega \cdot N_f \cdot \phi \cdot \cos(\omega t) \quad (3)$$

Onde:

e = Tensão nos terminais de cada fase do induzido;

ω = frequência angular da tensão induzida, $= 2 \cdot \pi \cdot f$

N_f = número de espiras efetivas por fase;

ϕ = fluxo magnético criado pelo indutor;

f = frequência da tensão induzida.

Sendo também que:

$$\omega = p \cdot \Omega \quad (4)$$

e a frequência da tensão induzida é dada por:

$$f = \omega/2\pi \text{ ou } f = (n \cdot p)/60 \quad (5)$$

Onde:

p = número de pares de polos;

Ω = frequência de rotação do rotor (rad/s);

n = velocidade do rotor (rpm).

O valor eficaz da tensão induzida é dada por:

$$E = (\omega \cdot N_f \cdot \phi)/\sqrt{2} \quad (6)$$

O valor da tensão é por isso proporcional ao fluxo criado pelo indutor, mas a relação com a corrente de excitação não é diretamente proporcional devido à existência da saturação no material ferromagnético dos núcleos rotórico e estatórico. Esta relação torna-se ainda menos linear a partir do momento em que circule corrente nos enrolamentos estatóricos, pois pela lei de Lenz serão responsáveis pela criação de um campo parcialmente oposto ao do indutor, efeito conhecido por reação do induzido.

4.3. Circuito equivalente de um gerador síncrono

Quando o gerador está alimentando uma carga, o mesmo funciona como um circuito fechado, portanto, vai circular por ele uma corrente que será responsável por perdas por efeito de Joule na resistência do próprio enrolamento, e também pela existência de dispersões de fluxo magnético em torno dos condutores. Estes efeitos, semelhantes aos que se verificam para outros tipos de máquinas, levam ao modelo de circuito equivalente.

Este modelo é usado para analisar o funcionamento em regime permanente tanto em modo motor como em modo gerador. Como se trata de regime permanente são desprezados os transitórios ocorridos tanto no circuito de excitação como no enrolamento amortecedor. Trata-se, como noutros casos, de um modelo fase-neutro.

A força eletromotriz E_A é a tensão interna produzida em uma das fases do gerador síncrono, pelo efeito de indução magnética, porém a tensão V_A no terminal de saída deste enrolamento não será igual ao valor de E_A . Na realidade, o único momento em que a tensão de saída V_A será igual à tensão interna E_A é quando não existe corrente circulando no estator, e o gerador está sem carga. O enrolamento do estator tem a sua própria reatância X_s e resistência R_A , que ao serem atravessadas pela corrente de armadura I_A , provocaram uma queda de tensão, diminuindo a tensão V_A que estará presente nos terminais de saída e pode ser calculada pela equação:

$$V_A = E_A - j \cdot X_s \cdot I_A - R_A \cdot I_A \quad (7)$$

Da equação 7 resulta que quanto maior for I_A , maior será a necessidade de incrementar E_A para manter a tensão no terminal V_A constante.

A reatância X_s , denominada reatância síncrona, é um parâmetro característico do gerador, responsável pela flutuação de tensão em carga da máquina. É, portanto, possível representar o circuito equivalente do Gerador Síncrono trifásico com o esquema apresentado na figura 10:

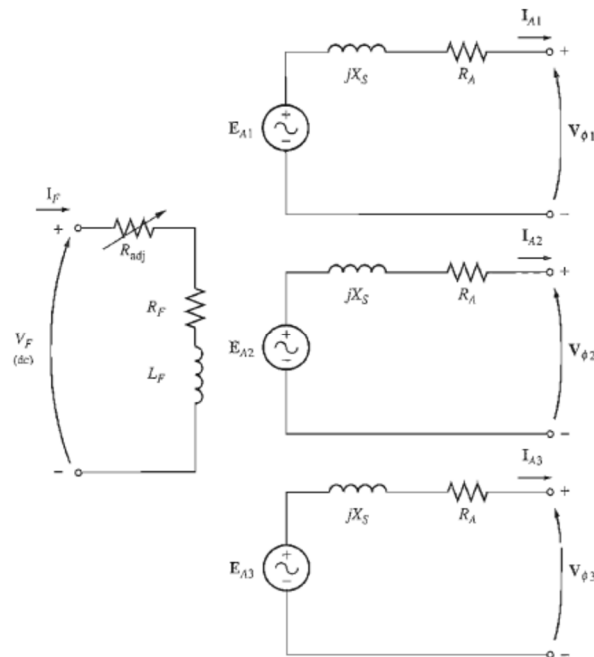


Figura 10 – Gerador Síncrono – Circuito Equivalente

Fonte: Chapman (2013)

O circuito formado pelo indutor L_F e pela resistência R_F formam o enrolamento de campo do gerador. Ao aplicar uma tensão V_F nos terminais do enrolamento de campo, circula uma corrente I_F que tem a sua intensidade controlada pelo resistor variável R_{adj} . A corrente I_F cria um campo magnético que irá excitar a máquina. Nos geradores modernos, a tensão V_F é provida por um retificador controlado ou pela excitatriz rotativa, não sendo utilizado em geral o resistor R_{adj} .

O valor de E_A é proporcional ao campo magnético originado pela excitação do rotor e a velocidade de rotação n do gerador síncrono. Como a velocidade de rotação n é constante, será necessário aumentar a corrente I_F de excitação para manter a tensão terminal V_A constante. Essa correção de excitação é dinâmica, e é realizada pelo sistema de regulação automática de tensão do gerador (AVR – “*automatic voltage regulator*”).

4.4. Gerador de polos salientes

Os geradores síncronos de polos salientes possuem uma particularidade que deve ser observada: devido a sua construção (multipolares e polos salientes), seu entreferro não é uniforme. Essa não uniformidade faz com que a relutância magnética seja reduzida junto às faces polares e elevada entre elas. Assim sendo, uma força magneto motriz (FMM) de reação de armadura vai produzir mais fluxo no eixo polar, chamado de “eixo direto”, do que no eixo interpolar, o “eixo em quadratura”. Na máquina de rotor cilíndrico a reação do induzido é aproximadamente uniforme ao longo de todo o entreferro. Devido a esse fato, uma simples reatância de reação de induzido X_s não pode ser usada nas máquinas de polos salientes.

Segundo Umans (2014, p. 308), os efeitos indutivos das ondas de fluxo de armadura para o eixo direto e em quadratura podem ser vistos como responsáveis pelas reatâncias de magnetização de eixo direto e em quadratura, $X_{\phi d}$ e $X_{\phi q}$, respectivamente, similares à reatância de magnetização X_ϕ da teoria do rotor cilíndrico. Essas reatâncias são responsáveis pelos efeitos indutivos dos fluxos fundamentais espaciais de entreferro criados pelas correntes de armadura ao longo do eixo direto e em quadratura. Devido ao entreferro maior entre os polos e à respectiva relutância mais elevada, o fluxo fundamental espacial de armadura, quando a FMM de armadura está alinhada com o eixo em quadratura, é menor do que o fluxo fundamental espacial de armadura que seria criado pela mesma corrente de armadura se a onda FMM de armadura estivesse alinhada com o eixo direto.

Para cada uma das componentes de corrente I_d e I_q , há associada um componente de queda de tensão nas reatâncias síncronas, $j I_d X_d$ e $j I_q X_q$, respectivamente.

As reatâncias X_d e X_q são, respectivamente, as reatâncias síncronas de eixo direto e em quadratura e são dadas pelas seguintes expressões:

$$X_d = X_{\phi d} + X_{al} \quad (8)$$

$$X_q = X_{\phi q} + X_{al} \quad (9)$$

Onde:

X_{al} = reatância de dispersão da armadura

A reatância síncrona de eixo em quadratura X_q é menor do que a de eixo direto X_d devido à relutância maior do entreferro mais longo no eixo em quadratura. A tensão nos terminais pode ser calculada da seguinte forma:

$$V_A = E_A - j \cdot X_d \cdot I_d - j \cdot X_q \cdot I_q - R_A \cdot I_A \quad (10)$$

4.5. Potência e Torque no Gerador Síncrono

O gerador síncrono de polos salientes converte a potência mecânica disponível no eixo da turbina em potência elétrica trifásica. O cálculo da potência de saída (P_A) pode ser feito pela seguinte equação:

$$P_A = \sqrt{3} \cdot V_A \cdot I_A \cdot \cos\varphi \quad (11)$$

Com esta equação, é possível calcular a potência de saída P_A em função da corrente de armadura I_A , da tensão de linha nos terminais da máquina V_A , e do fator de potência da carga $\cos\varphi$. Porém, é perfeitamente possível estimar a potência de saída do gerador através de E_A e V_A (valores de linha) através da seguinte equação:

$$P_A = \left(\frac{E_A \cdot V_A}{X_d} \right) \cdot \text{sen}\delta + \left(\frac{V_A^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \right) \cdot \text{sen}2\delta \quad (12)$$

Onde δ é o ângulo de carga do gerador, ou seja, o ângulo entre V_A e E_A . O máximo valor da potência ativa P_A é obtido para um ângulo de carga $\delta = 90^\circ$. Essa condição estabelece o limite de estabilidade teórico do gerador quando conectado a uma rede energizada. Mantida a excitação, se o ângulo de carga ultrapassar 90° o torque eletromagnético oferecido pelo gerador torna-se inferior ao torque aplicado pela turbina, fazendo com que o conjunto acelere e ocorra a perda de sincronismo com a rede, levando ao disparo da máquina.

A relação entre o torque eletromagnético (T_e) e a potência de saída do gerador pode ser calculada pela equação:

$$P_A = T_e \cdot n \quad (13)$$

Juntando a equação 12 com a equação 13, é possível verificar que o torque eletromagnético será:

$$T_e = \left(\frac{E_A V_A}{n \cdot X_d} \right) \cdot \text{sen} \delta + \left(\frac{V_A^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot n \cdot X_d \cdot X_q} \right) \cdot \text{sen} 2\delta \quad (14)$$

4.6. Diagrama fasorial e curva de capacidade do gerador de polos salientes

A análise da operação de geradores de polos salientes é realizada a partir da teoria da dupla reação ou da dupla reatância. A partir de considerações sobre o diagrama fasorial do gerador de polos salientes, obtêm-se os modos de operação e a correspondente curva de capacidade.

Para a construção do diagrama fasorial da Figura 11, admitem-se conhecidos os parâmetros do gerador como a tensão terminal V_A , as reatâncias de eixo direto X_d e em quadratura X_q , assim como os parâmetros da carga, ou seja, a corrente I_A e o ângulo φ do fator de potência.

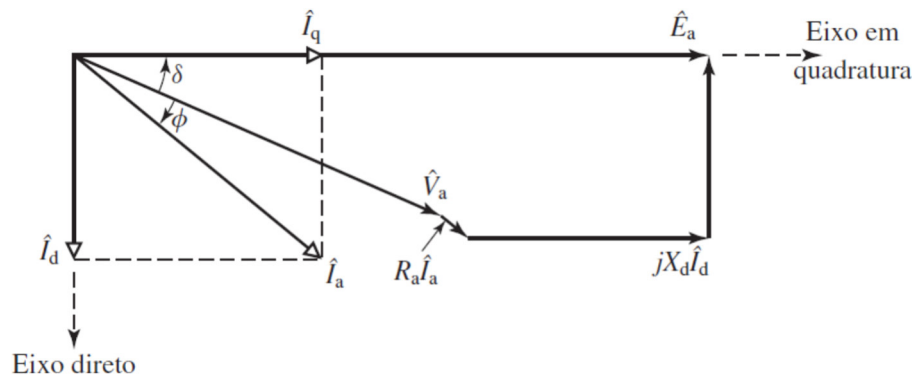


Figura 11 – Diagrama fasorial do gerador de polos salientes

Fonte: Umans (2014)

Segundo Da Costa JR (2010, p. 770), a combinação dos diagramas fasoriais precedentes, construídos com valores em p.u. e calibrados em potência através da multiplicação dos segmentos que representam as tensões por V_A/X_d fornece o diagrama de operação do gerador de polos salientes. Este diagrama é conhecido como curva de capacidade de um gerador conforme mostrado na Figura 12.

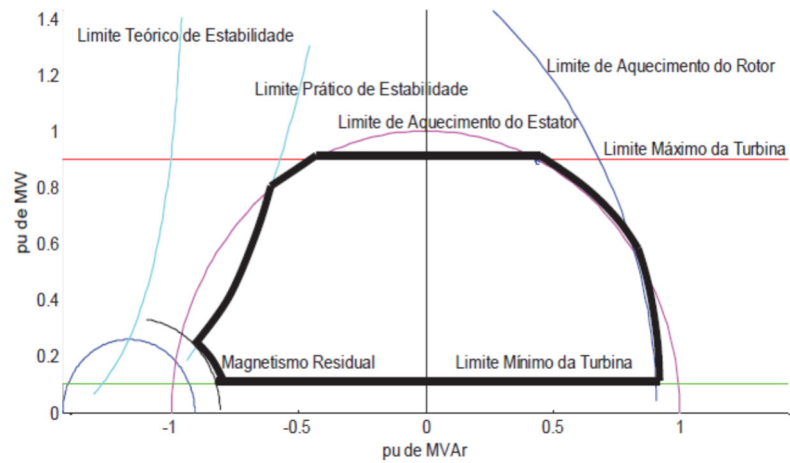


Figura 12 - Curva de capacidade do gerador de polos salientes

Fonte: Da Costa JR (2010)

A região contornada pela linha mais espessa no diagrama da figura 12 representa a região de operação estável e segura do gerador.

5. OPERAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

5.1. Regulador de velocidade

O regulador de velocidade tem por função manter a rotação do gerador constante com o objetivo de manter a frequência constante e dentro do valor nominal. Na maioria dos sistemas, a variação da velocidade é detectada a partir da variação da frequência da tensão gerada. Basicamente, os reguladores de velocidade podem ser de dois tipos: isócrono e com queda de velocidade.

O regulador de velocidade isócrono tem como característica a manutenção de uma velocidade de rotação constante e igual à velocidade de referência em regime permanente. Este tipo de regulador apresenta péssimas características de estabilidade em regime transitório. Devido a estas limitações, sua aplicação é indicada para controle de geradores operando em regime isolado, não sendo recomendada sua aplicação em regimes de operação com geradores ligados em paralelo devido a problemas de estabilidade.

Devido às limitações apresentadas pelo regulador de velocidade isócrono, foi adicionado a este uma malha de realimentação, resultando numa pequena queda de velocidade na ocorrência de um impacto positivo de carga, ou um aumento, caso o impacto seja negativo. Esta variação de velocidade é chamada de “queda” ou “drop”. Este novo regulador passa a ser chamado de regulador com queda de velocidade ou com estatismo. É também chamado de “estatismo permanente”, pois o estatismo é a variação percentual da velocidade quando ocorre um impacto de carga igual à potência nominal do gerador síncrono.

5.2. Regulador de tensão

O regulador de tensão tem por função variar a corrente de excitação fornecida ao enrolamento de campo do gerador de modo a manter a tensão de saída do gerador sempre dentro do valor ajustado.

Os reguladores de tensão também atuam no controle da potência reativa a ser gerada pela máquina síncrona, principalmente quando o objetivo é obter uma distribuição apropriada da potência entre os geradores conectados a um mesmo barramento, por meio da alteração do ponto de regulação, ou para controlar a tensão em um ponto distante dos terminais do gerador síncrono.

Para a operação de geradores em paralelo com barramentos de grande porte, ou rede elétrica (barramento infinito), uma característica importante é o controle do fator de potência ao invés dos níveis de tensão. Neste caso, ao manipular a corrente de excitação, a tensão nos terminais permanece inalterada, porém, há o controle da potência reativa que a máquina está injetando na rede elétrica.

5.3. Sistema de excitação (excitatrizes)

A função do sistema de excitação é prover a alimentação em corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador síncrono. A corrente contínua gerada pelas excitatrizes é manipulada pelo regulador de tensão para ser aplicada ao enrolamento de campo do gerador síncrono. Basicamente, existem dois tipos de sistema de excitação: com excitatriz rotativa e sem excitatriz rotativa. A figura 13 mostra os esquemas dos dois tipos de excitatrizes.

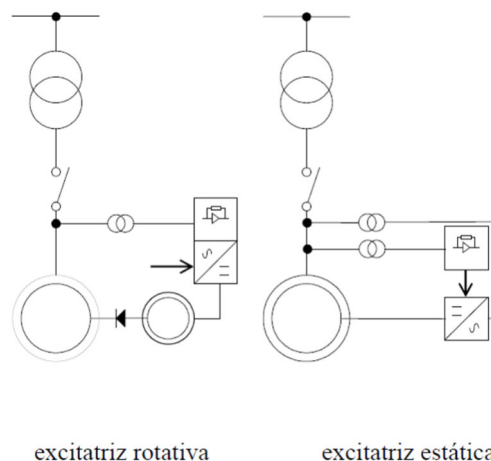


Figura 13 – Tipos de excitatrizes disponíveis

Fonte: Lima (2002)

As excitatrizes rotativas são divididas em dois tipos principais: as excitatrizes rotativas com comutação e as excitatrizes rotativas sem comutação.

As excitatrizes rotativas com comutação são na verdade geradores de corrente contínua com excitação *shunt* ou *compound* acionadas pelo próprio eixo do gerador elétrico principal diretamente ou acopladas por correia, ou ainda, acionadas por uma pequena turbina hidráulica própria. A energia gerada é levada ao campo do gerador elétrico por meios de anéis e escovas. Este sistema de excitação consome de 0,5 a 2% da potência do gerador elétrico principal tendo sido uma das primeiras soluções aplicadas para excitação de grandes geradores.

As excitatrizes rotativas sem comutação, também conhecidas como sistema *brushless*, dispensam o emprego de anéis e escovas, já que nessa concepção a excitação é feita por um gerador elétrico de polos fixos e com sua armadura montada no eixo do próprio gerador elétrico principal. Desta forma, a tensão induzida pode ser retificada e entregue diretamente ao circuito de campo e nesse caso os diodos giram conjuntamente com o eixo e o controle é feito por meio da excitação dos polos fixos.

As excitatrizes estáticas, por sua vez, podem utilizar a própria alimentação elétrica proveniente do gerador principal para prover a excitação. A tensão e corrente alternadas são retificadas e controladas por semicondutores disparados convenientemente pelo regulador de tensão. Após este processo, a corrente de excitação é levada ao enrolamento de campo do gerador principal por meio de anéis e escovas.

5.4. Operação isolada de um único gerador

Atualmente, a operação isolada de um único gerador síncrono instalado em uma usina é algo bem incomum. Normalmente, a operação isolada ocorre em circuitos de emergência, onde o gerador atua quando há falta de energia do sistema de distribuição local. Apesar de não ser o foco principal deste trabalho, analisar a operação de uma máquina isoladamente permite uma melhor compreensão do funcionamento e comportamento de uma máquina quanto à variação da carga e

como é feita a operação do gerador de modo a manter a frequência e a tensão sempre constante.

A figura 14 exemplifica um modelo de operação de gerador isolado alimentando apenas uma carga.

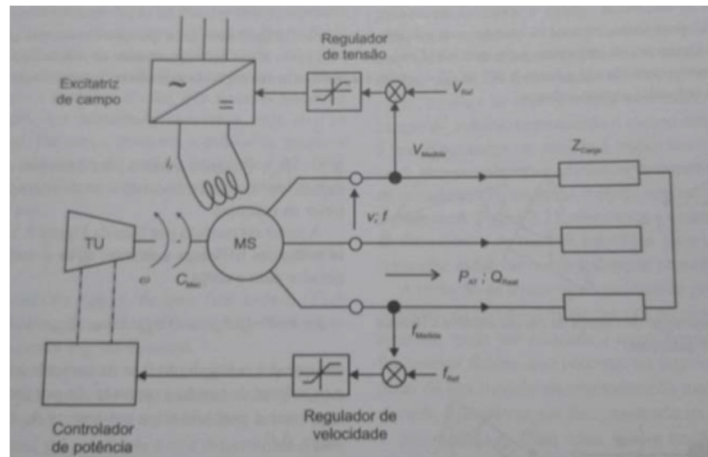


Figura 14 – Gerador síncrono alimentando uma carga isolada

Fonte: SIMÕES-MOREIRA (2017)

Com o aumento da demanda por potência reativa indutiva, há a redução da tensão nos terminais do gerador, pois, inicialmente considera-se que a tensão interna é constante. Para manter a tensão nos terminais constante, é necessário que aumente a corrente de campo do gerador, provocando um aumento do fluxo magnético na máquina, aumentando também a tensão interna do gerador, resultando no aumento da tensão disponível nos terminais do gerador, fazendo com que o gerador possa atender a nova demanda por cargas reativas indutivas.

Com o aumento da demanda por potência reativa capacitiva, há um aumento da tensão nos terminais do gerador, pois, inicialmente considera-se que a tensão interna é constante. Para manter a tensão nos terminais constante, é necessário que reduza a corrente de campo do gerador, reduzindo também o fluxo magnético na máquina, reduzindo a tensão interna do gerador, resultando na diminuição da tensão disponível nos terminais do gerador, fazendo com que o gerador possa atender a nova demanda por cargas reativas capacitivas.

Com o aumento da demanda por potência ativa, há além de uma queda na tensão do gerador, também uma tendência de queda do valor da frequência se o gerador estiver conectado a uma carga isolada (não conectado à rede ou a outros geradores em paralelo), ou a sua motorização (quando a máquina síncrona deixa de atuar como gerador e passa a atuar como um motor) caso esteja conectado à rede ou a outros geradores em paralelo. Para manter a máquina atuando como um gerador e manter a tensão constante são necessárias a adição de mais potência mecânica pela turbina, permitindo a conversão de mais energia mecânica em energia elétrica ativa.

5.5. Operação de geradores ligados em paralelo

Ao contrário da situação exposta no item anterior, normalmente, há mais de um gerador operando em paralelo para fornecer a potência demandada pelas cargas ou a rede elétrica. A operação em paralelo traz algumas vantagens como:

- Uma carga maior pode ser alimentada por diversos geradores ao invés de apenas um único gerador;
- Quanto maior o número de geradores operando em paralelo, maior será a confiabilidade do sistema, pois em caso de um gerador falhar, não ocorrerá uma perda total de potência para a carga;
- Com muitos geradores em paralelo, maior será a possibilidade de permitir que um ou mais deles sejam removidos para desligamento e manutenção preventiva;
- A operação de apenas um gerador em cargas variáveis faz com que haja muitas perdas no sistema, pois os geradores operam com a máxima eficiência quando operados próximos a sua potência nominal. Com mais geradores, quando a carga sofre redução, é possível reduzir o número de geradores operando, fazendo que os geradores restantes operem sempre próximos a suas potências nominais.

A figura 15 mostra um gerador sendo ligado em paralelo a um sistema de potência em operação:

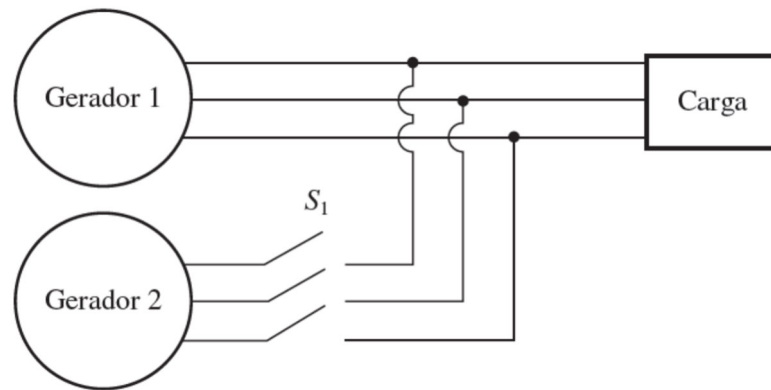


Figura 15 – gerador sendo ligado em paralelo a um sistema de potência em operação

Fonte: Chapman (2013)

Para que os geradores funcionem em paralelo, existem condições mínimas que devem ser obedecidas. Se tais condições não forem obedecidas, o sistema estará sujeito a graves perturbações que farão os dispositivos de proteção atuarem, desconectando o gerador.

Se as tensões não forem semelhantes em cada condutor que está sendo conectado, haverá um intenso fluxo de corrente quando os geradores forem ligados em paralelo. Para evitar tal problema, cada uma das fases dos geradores a serem conectados deve ter exatamente o mesmo valor de tensão e ângulo de fase que a do sistema onde serão conectados. Para que esta ligação seja possível, as seguintes condições de paralelismo devem ser atendidas:

- Condição 1: As tensões eficazes dos geradores a serem conectados devem ser iguais;
- Condição 2: Os geradores a serem conectados devem ter a mesma sequência de fases;
- Condição 3: Os ângulos de fase das tensões a serem conectadas devem ser iguais;
- Condição 4: A frequência do novo gerador a ser conectado deve ser ligeiramente superior à frequência do sistema que já está em operação, de modo a garantir que, em algum dado momento, as tensões se identifiquem de fato, permitindo a conexão em paralelo.

À medida que aumenta a demanda de potência sobre as máquinas, há uma diminuição da velocidade. A velocidade do eixo relaciona-se com a frequência elétrica resultante, portanto, a saída de potência de um gerador síncrono está relacionada com sua frequência. A função de manter a velocidade constante é do regulador de velocidade que irá fazer o ajuste da entrada de água na turbina para controlar a frequência de operação do sistema.

À medida que aumenta o consumo de potência reativa da carga alimentada, há uma diminuição da tensão nos terminais da máquina. Cabe ao regulador de tensão o ajuste da corrente de campo de modo a corrigir a tensão nos terminais do sistema de potência.

5.6. Operação de geradores em paralelo com outros geradores de mesmo porte

Quando um gerador é ligado em paralelo com outro do mesmo porte, o sistema terá como condição básica que: a soma das potências ativa e reativa fornecidas pelos dois geradores deva ser igual às potências ativas e reativas demandadas pela carga. Neste caso, não há nenhuma condição para a frequência do sistema ser constante nem para a potência de um dado gerador ser constante.

Quando há dois geradores operando em conjunto, um aumento do ponto de ajuste no regulador de velocidade de um deles elevaria a frequência do sistema e a potência fornecida por esse gerador e reduziria a potência fornecida pelo outro gerador.

Se a corrente de campo de um dos geradores for aumentada, a tensão terminal do sistema é aumentada e a potência reativa fornecida por esse gerador também aumenta, à medida que a potência reativa fornecida pelo outro gerador diminui.

O sistema está condicionado a que a potência total fornecida pelos dois geradores em conjunto deve ser igual à quantidade consumida pela carga. Nem a frequência do sistema nem a tensão nos terminais estão condicionadas a serem constantes.

Para que seja ajustado o compartilhamento de potência ativa entre os geradores sem alterar a frequência do sistema, é necessário que, simultaneamente, seja aumentado o ponto de ajuste no regulador de um gerador e que seja diminuído o ponto de ajuste no regulador do outro gerador. Tal procedimento fará que a máquina, cujo ponto de ajuste no seu regulador foi incrementado, assuma uma parte maior da carga. Para ajustar a frequência do sistema sem alterar o compartilhamento de potência ativa, é necessário que, simultaneamente, aumente ou diminua os pontos de ajuste em ambos os reguladores.

Para que seja feito o ajuste do compartilhamento de potência reativa entre os geradores sem alterar a tensão na carga, é necessário que simultaneamente, aumente a corrente de campo de um gerador e que diminua a corrente de campo do outro gerador, isso fará que a máquina, cuja corrente de campo aumentou, assuma uma parte maior da carga reativa. Para que seja ajustada a tensão na carga sem alterar o compartilhamento de potência reativa, é necessário que, simultaneamente, aumente ou diminua as correntes de campo de ambos os geradores.

5.7. Operação de geradores em paralelo em grandes sistemas de potência

Quando um gerador síncrono é conectado a um sistema de potência, frequentemente esse sistema é tão grande que não há *nada* que o operador do gerador possa fazer para alterar de modo significativo o sistema. Um exemplo dessa situação é a ligação de um gerador à rede de energia elétrica de um país. Essa rede é tão grande que nenhuma ação realizada no gerador será capaz de causar alguma mudança observável na frequência da rede. Essa ideia está implícita no conceito de barramento infinito. Um barramento infinito é um sistema de potência tão grande que sua tensão e sua frequência não variam, independentemente de quanta potência ativa ou reativa é retirada ou fornecida ao sistema. Esse tipo de sistema é ilustrado na figura 16.

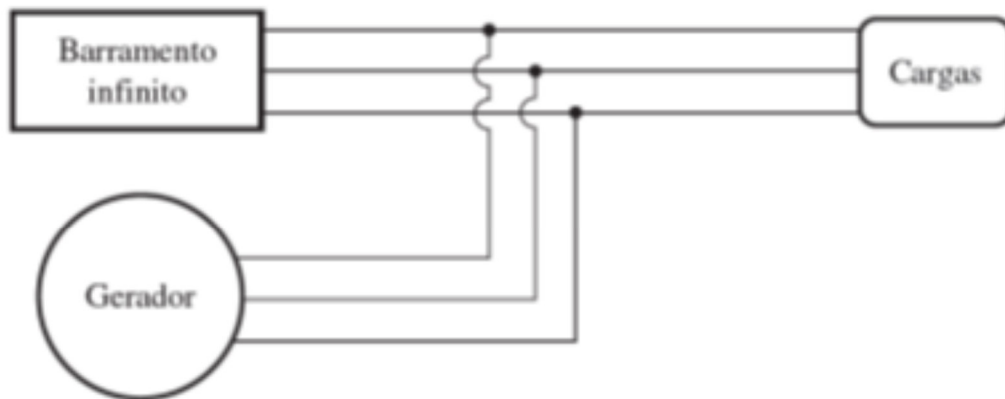


Figura 16 – Um gerador síncrono operando em paralelo com um barramento infinito.

Fonte: Chapman (2013)

Ao se ligar um gerador em paralelo em um barramento infinito (que pode ser outro gerador bem maior, um sistema de grande porte ou a rede elétrica), a frequência e a tensão de terminal de todos os geradores e cargas devem ser as mesmas, porque todos os seus condutores de saída estão interligados. Então, o gerador estará fornecendo uma pequena quantidade de potência ativa e pouca ou nenhuma potência reativa.

Para ser conectado ao barramento infinito, o gerador deverá apresentar uma frequência ligeiramente superior ao do barramento no instante prévio à conexão, caso contrário, o gerador passara a consumir potência do barramento, ou seja, a máquina passara a agir como um motor. Para impedir essa “motorização” do gerador, muitas máquinas possuem um sistema de desligamento em caso de inversão do fluxo de potência, sistema esse que desliga o gerador em caso de motorização.

Após o gerador ter sido ligado ao barramento, ao aumentar o ponto de ajuste no regulador de velocidade para aumentar a frequência, ocorre que a frequência e a tensão permanecem inalteradas (a frequência e a tensão do barramento infinito não podem mudar), porém, observa-se que a potência fornecida pelo gerador se eleva, ou seja, o gerador começa a injetar potência ativa no barramento. De modo análogo, ao aumentar a corrente de campo do gerador, a tensão permanecerá inalterada,

porém observa-se que aumenta a saída de potência reativa do gerador para o barramento infinito. Em outras palavras: a corrente de campo do gerador controla a potência reativa fornecida pelo gerador ao sistema.

6. ESTUDO DE CASO

6.1. Apresentação e Metodologia

Nesta etapa deste trabalho, será apresentado um estudo de caso mostrando a operação de uma PCH. Para a melhor compreensão e para fins de enriquecimento teórico, o estudo de caso se baseará numa PCH real: a PCH Itatinga. Basicamente, o estudo de caso será dividido em três partes básicas:

- 1) A primeira parte constituirá numa breve apresentação da PCH Itatinga;
- 2) A segunda parte será uma revisão do dimensionamento da PCH Itatinga, onde será feita uma comparação entre os valores calculados e os equipamentos instalados atualmente na usina. Esta segunda parte tem grande importância na validação de toda a teoria apresentada neste trabalho, servindo como exemplo de metodologia de análise da operação dos equipamentos da usina. Para cada componente redimensionado neste trabalho (turbina, injetor e gerador), será feita uma comparação entre o valor calculado e o equipamento presente na usina;
- 3) A terceira parte trata da análise da operação dos geradores propriamente dita e será feita tendo como base dados reais. Para esta análise, será utilizado o potencial energético do rio Itatinga, onde será analisada a operação dos geradores de acordo com os valores principais de vazão encontrados no rio, principalmente nas vazões mínimas que o rio Itatinga tem apresentado.

6.2. PCH Itatinga

6.2.1. Apresentação

Segundo a matéria publicada no site eletrônico da CGH Libera Maria, a PCH Itatinga foi construída em 1910, em Bertioga no Estado de São Paulo, há 30 km do Porto de Santos. O objetivo da usina é suprir parte da demanda energética do Porto de Santos. Devido à Usina Hidrelétrica de Itatinga, o Porto de Santos é um dos únicos portos no mundo que gera sua própria energia elétrica. A energia gerada pela Usina supre em torno de 80% da necessidade da área do porto.

Ainda segundo a matéria, o suprimento de energia é, prioritariamente, proveniente da Usina hidrelétrica de Itatinga, com capacidade de 15 MW, complementado em alta tensão pela concessionária local Companhia Piratininga de Força e Luz (CPFL),

através de um circuito com capacidade 8,6 MW ligado em paralelo e de mais dois pontos de conexão com capacidades de 1,6 MW e 0,1 MW respectivamente. A nova matriz energética permitiu ao Porto ampliar sua produtividade não somente por viabilizar a entrada em operação de equipamentos movidos a eletricidade, mas, também, por permitir que as operações se prolongassem nos períodos noturnos, a partir da instalação de iluminação elétrica.

A matéria também destaca que a capacidade geradora da usina, maior que a demanda das instalações do Porto, permitiu que, desde abril de 1911 as sobras fossem cedidas à concessionária dos serviços de eletricidade para atender aos municípios da Baixada Santista. Itatinga teve uma participação relevante no desenvolvimento socioeconômico-cultural da região, uma vez que, até 1927 forneceu toda a eletricidade consumida pelos municípios de Santos, São Vicente e localidades vizinhas. Sua energia foi utilizada pela “Light” na construção da Usina Henry Borden, em Cubatão, e, em 1925, durante a grande crise de energia em São Paulo, Itatinga forneceu 5.000 kW diários à capital.

A Usina opera com abastecimento a “fio d’água”, com uma captação direta do rio Itatinga situado a 765 m de altura na Serra do Mar, contando com um complexo composto por represa, câmara d’água, cinco tubulações de descida da serra, turbinas e geradores, além de 30 quilômetros de linhas de transmissão em 160 torres, duas grandes torres para transposição do canal do estuário, uma central elétrica e 60 subestações ao longo da margem de Santos.

Segundo os editais públicos de licitação para a manutenção das instalações da Autoridade Portuária de Santos S.A (antiga Companhia Docas do Estado de São Paulo), A PCH Itatinga é constituída pelos seguintes equipamentos principais:

6.2.2. Casa de força

A Casa de Força da Usina de Itatinga é uma construção em alvenaria, corpo central de 61,5 m por 12,0 m e ala transversal de 41,5 m por 9 m, paredes externas de pedra argamassada, variando de 0,50 a 1,00 m, pé direito de aproximadamente 13 metros, internamente dividido em: Sala das Válvulas, Sala de Máquinas, Celas dos

Transformadores, Sala das Barras de 44 kV, Sala de Operação e Comando, Oficina Mecânica, Copa, Sanitários, Depósitos, Escritórios e Túnel de Ventilação e de Passagem de Cabos. Os equipamentos principais são os seguintes:

- 6 turbinas hidráulicas (uma reserva), tipo Pelton, 4225 HP, 514 rpm, J M VOITH;
- 5 geradores GE, trifásicos, eixo horizontal, modelo A.T.B., 3.750 kVA, 2.300 V, 60 Hz, 514 rpm, com um estator de reserva;
- 5 excitatrizes, ABB, modelo WE500ba 10/14 Brushless, potência 17 kVA, 200 V, 82 A, classe de isolamento "F", 514 rpm, com seus respectivos transformadores de excitação, potência nominal 1,5 kVA, 2300/125 V, fabricação maio/2012;
- 16 transformadores monofásicos, de 1.250 kVA, GE, tipo WC modelo VDM, tensão primária 2.300 V, secundária 44.000 V;
- 3 transformadores trifásicos, de 600 kVA, tensão primária 44.000V, secundária 6.600 V;
- 7 disjuntores tripolares EDI 72 SK 1-1, a gás SF6, ABB, 44 kV, 60 Hz;
- 8 disjuntores tripolares (um reserva) VD4, ABB, classe de tensão 72,5 kV, tensão de serviço 6,6 kV, corrente nominal 1250 A, 60 Hz;
- 2 disjuntores de saída das linhas de 44kV, GE, tipo FK-339-46-599-4, tripolar, imerso em óleo, 46 kV, 600 A, 500 MVA, 60 Hz;
- Painéis de comando, medição e proteção, ABB, metálicos, com IHM, relês, medidores, reguladores de tensão ABB e reguladores de velocidade WOODWARD com as respectivas Unidades Hidráulicas de fabricação GLOBAL HYDRAULIC, chaves de controle e comando, amperímetros, voltmíetros, frequencímetros, etc.;
- Válvulas dos encanamentos tipo gaveta, válvulas de entrada e intermediária com respectivos "by-pass" e válvulas das turbinas com respectivos "by-pass", com os respectivos motores com acionamento à distância e volantes para acionamento manual;
- Acumuladores elétricos de baterias, chumbo-ácido, marca Fulguris, 150 Ah x 10 horas, acoplados a retificadores-carregadores.

6.2.3. Tomada de água - represa

O abastecimento da Usina é a "fio d'água", com uma captação direta do rio Itatinga, situado a aproximadamente 765 metros de altura, na Serra do Mar.

6.2.4. Canal adutor

A entrada do canal adutor possui duas comportas que abastecem este canal coberto, de alvenaria, com seção retangular de 1,50 x 1,00 m, com 3.100 metros de extensão, sendo que 940 metros são em túnel escavado na rocha, possuindo um declive total de aproximadamente 3,5%, contando com uma linha férrea para serviços, de bitola 0,60 m ao longo de sua extensão.

6.2.5. Dependências

Dois areeiros ao longo do Canal Adutor para retirada do excesso de areia.

6.2.6. Câmara d'água

A Câmara D'água, com capacidade de aproximadamente 700 m³, abriga as cinco comportas de entrada dos encanamentos, situando-se a aproximadamente 640 metros de altura, na Serra do Mar.

6.2.7. Linha de dutos forçados

A água é conduzida da Câmara D'água até a Casa de Válvulas anexa à Casa de Força através de 5 (cinco) tubulações de aço fundido, paralelas, ancoradas em 64 maciços (denominados maciços de ancoragem) e apoiadas em vários pequenos apoios (denominados maciços de apoio), todos de pedra argamassada. Tal tubulação tem 2.034 metros de extensão, altura de queda de 640 metros, possui diâmetro interno variável de 900, 800, 700 e 600 mm, sendo esta última a seção mais baixa, vazão de 660 litros por segundo em cada encanamento, caminho de acesso com calçamento em pedra com 4.400 metros de extensão e sistema de drenagem de águas pluviais constituído de canaletas e valas.

6.3. Revisão do Dimensionamento dos Principais componentes

6.3.1. Potencial hidrelétrico

Para o dimensionamento do potencial hidrelétrico, utilizaremos a vazão nominal da usina, ou seja, 3,3 m³/s. Como são 5 condutos forçados, é possível concluir que a vazão por conduto será de 0,66 m³/s. Para o dimensionamento, serão utilizados os procedimentos sugeridos por Macintyre (1983). Para o cálculo do potencial hidrelétrico, será utilizada a seguinte expressão:

$$P = g \cdot H \cdot Q \cdot \rho \quad (15)$$

Onde:

Q = vazão da máquina, em m³/s

g = aceleração da gravidade, em m/s²

H = altura da queda, em metros (m).

ρ = massa específica da água

Para o cálculo da Potência hidráulica:

Onde:

$Q = 0,66$ m³/s (para cada conduto forçado);

$g = 9,8$ m/s²

$H = 765$ m

$$P = 9,8 \cdot 640 \cdot 0,66 \cdot 1000 = 4.139,52 \text{ kW}$$

Os cálculos levaram ao valor de 4.139,52 kW por conduto forçado, como a usina possui 5 condutos forçados, logo temos uma potência hidráulica total de 20.697,6 kW disponível para uma vazão de 3,3 m³/s (vazão nominal da usina).

6.3.2. Dimensionamento da turbina

A figura 17 contém o detalhamento das pás de uma turbina Pelton. A seguir será apresentado o dimensionamento da turbina

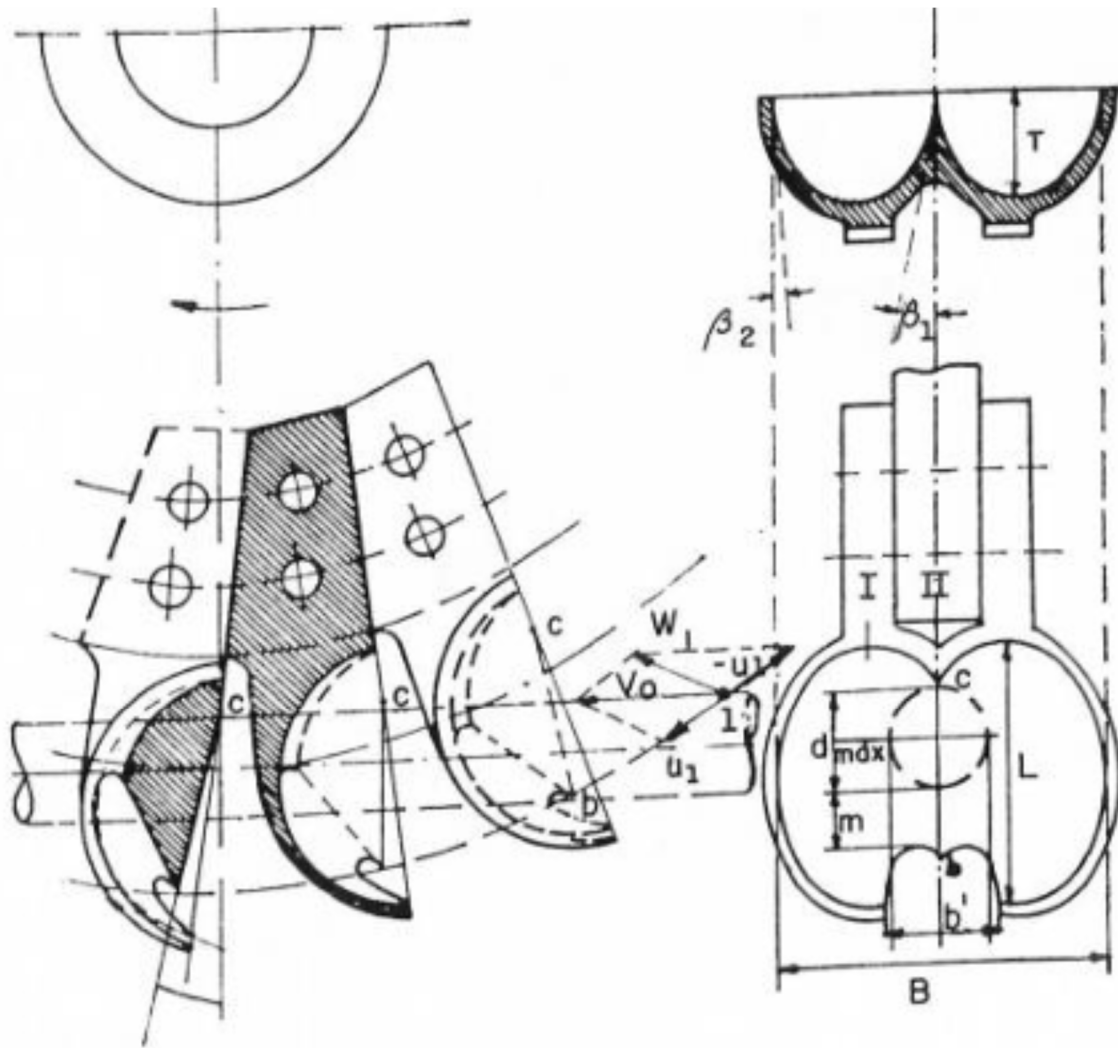


Figura 17- Detalhamento das pás da turbina Pelton

Fonte: Macintyre (1983)

a. Velocidade do jato

Para calcular a velocidade do jato de água na turbina, utiliza-se a seguinte expressão:

$$c_1 = \varphi \sqrt{2gH} \quad (16)$$

Onde:

φ = coeficiente de velocidade (0,99)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

H = altura (m)

Resultando em:

$$c_1 = 0,99\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 640} = 110,88 \text{ m/s}$$

b. Cálculo do diâmetro máximo do jato

O diâmetro máximo do jato pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$d_{max} = \sqrt{(4Q/\pi c_1)} \quad (17)$$

Q = vazão volumétrica (m³/s)

c₁ = velocidade do jato na saída do injetor (m/s)

$$d_{max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,66}{\pi \cdot 110,88}} = 87,08 \text{ mm}$$

c. Velocidade Periférica da Roda

Para o cálculo da velocidade periférica da roda, utiliza-se a seguinte expressão:

$$\mu_2 = (0,42 \text{ a } 0,485) \cdot c_1 \quad (18)$$

Onde:

c₁ = velocidade do jato na saída do rotor, dada em m/s

$$\mu_2 = (0,45) \cdot 110,88 = 49,896 \text{ m/s}$$

d. Diâmetro Médio da roda da turbina

Para o cálculo do diâmetro médio, utiliza-se a seguinte expressão:

$$D_m = \frac{\mu_2 \cdot 60}{\pi \cdot n} \quad (19)$$

Segue:

$$D_m = \frac{49,896 \cdot 60}{\pi \cdot 514} = 1,85 \text{ m}$$

e. Número de Pás

Para o cálculo do número de pás, utiliza-se a seguinte expressão:

$$Z = \frac{1}{2} \cdot \frac{Dm}{d_{max}} + 14 \text{ a } 16 \quad (20)$$

Onde:

Dm = diâmetro do rotor

d_{max} = diâmetro máximo do jato

$$Z = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,85}{0,08708} + 15 = 26 \text{ pás}$$

f. Dimensionamento da geometria da pá

A largura (B) da pá é limitada pelo raio de curvatura que na superfície interna do jato não deve ser muito pequeno. Desejando-se o máximo rendimento a carga total, deve-se tomar B como:

$$B = (2 \text{ a } 3) \cdot d_{max} \quad (21)$$

$$B = 3 \cdot 0,08708 = 261,24 \text{ mm}$$

No plano mais longitudinal do rotor perpendicular ao eixo do jato, coloca-se o ponto mais interno da aresta de entrada junto no limite do jato e o ponto mais externo a uma distância “E”. Esta medida recebe o nome de “excesso” e pode ser calculada pela fórmula:

$$E = (0,9 \text{ a } 1,2) \cdot d_{max} \quad (22)$$

$$E = (1,2) \cdot 87,08 = 104,5 \text{ mm}$$

A pá recebe um recorte na parte mais externa a largura, de maneira que o jato não alcance a pá muito cedo, sendo definido conforme equação:

$$b' = 1,2 \cdot d_{max} + 5(\text{mm}) \quad (23)$$

$$b' = 1,2 \cdot 87,08 + 5(\text{mm}) = 109,5 \text{ mm}$$

Para o comprimento da pá, indica-se a seguinte expressão:

$$L = (2,5 \text{ a } 2,8) \cdot d_{max} \quad (24)$$

L = Comprimento da pá (m).

Segue o cálculo do comprimento da pá:

$$L = 2,8 \cdot 87,08 = 243,8 \text{ mm}$$

O cálculo da espessura da pá pode ser feito da seguinte forma:

$$T = (0,8 \text{ a } 1) \cdot d_{max} \quad (25)$$

Onde:

T = espessura da pá (m).

$$T = (0,9) \cdot 87,08 = 78,4 \text{ mm}$$

6.3.3. Dimensionamento do bocal injetor e agulha

A figura 18 mostra o detalhamento do bocal injetor e da agulha.

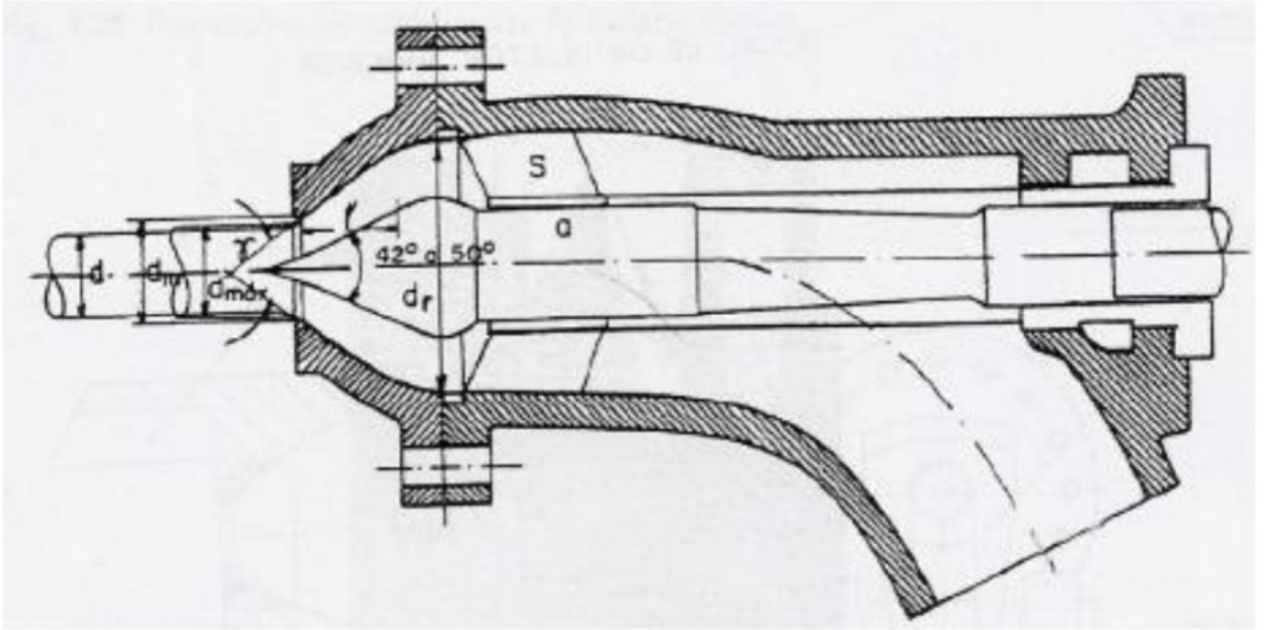


Figura 18 - Detalhamento do bocal injetor e da agulha

Fonte: Macintyre (1983)

a. Dimensionamento do bocal e haste

Para o diâmetro de saída do bocal (d) usa-se a expressão abaixo.

$$d = d_{max}/(1,12 \text{ a } 1,27) \quad (26)$$

$$d = \frac{87,08}{1,2} = 72,6 \text{ mm}$$

Para o diâmetro da seção de entrada do bocal (d_r) utiliza-se a seguinte expressão:

$$d_r = (2,6 \text{ a } 2,8) \cdot d_{max} \quad (27)$$

$$d_r = (2,7) \cdot 87,08 = 235,1 \text{ mm}$$

O diâmetro de entrada do bocal (d_e) varia segundo a expressão a seguir:

$$d_e = (4 \text{ a } 5) \cdot d_{max} \quad (28)$$

$$d_e = (5) \cdot 87,08 = 435,4 \text{ mm}$$

O diâmetro da haste (d_h) varia segundo a expressão a seguir:

$$d_h = (0,58 \text{ a } 0,7) \cdot d_{max} \quad (29)$$

$$dh = (0,6).87,08 = 52,3 \text{ mm}$$

b. Dimensionamento da agulha

O diâmetro da agulha (d_a) varia segundo a expressão a seguir:

$$d_a = (1,42 \text{ a } 1,62).d_{max} \quad (30)$$

$$d_a = (1,5).87,08 = 130,6 \text{ mm}$$

O comprimento da agulha (l_a) varia segundo a expressão a seguir:

$$l_a = (3,25 \text{ a } 3,66).d_{max} \quad (31)$$

$$l_a = (3,5).87,08 = 304,8 \text{ mm}$$

O curso da agulha (ca) varia segundo a expressão a seguir:

$$ca = (0,81 \text{ a } 1,16).d_{max} \quad (32)$$

$$ca = (1,16).87,08 = 101 \text{ mm}$$

Ângulo da ponta da agulha varia de 42° a 60° e o Ângulo do bocal varia de 60° a 90° .

6.3.4. Dimensionamento do Gerador

a. Potência no eixo da Turbina.

Para o cálculo da potência disponível no eixo da máquina (P_{ef}), utiliza-se a seguinte fórmula:

$$P_{ef} = P \cdot \eta_t \quad (33)$$

Onde:

P = potência hidráulica (W)

η_t = rendimento da turbina

Sabe-se que o rendimento de uma turbina Pelton gira em torno dos 80 a 90%, portanto, será adotado o valor de 80% para os cálculos.

$$P_{ef} = 4.139,52 \cdot 0,8 = 3.311,62 \text{ kW}$$

b. Potência dos geradores síncronos

A potência do gerador síncrono é determinada após o cálculo da potência disponível no eixo das turbinas, e pode ser obtida pela equação a seguir:

$$S_g = P_{ef} \cdot \left(\frac{\eta_g}{\cos\phi} \right) \text{ kVA} \quad (34)$$

Onde:

S_g = potência do gerador (kVA)

P_{ef} = Potência no eixo da turbina (kW)

$\cos\phi$ = fator de potência nominal do gerador

η_g = rendimento do gerador

O rendimento do gerador deve ser obtido junto ao fabricante do equipamento. Na falta de informações, podem ser utilizados os valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Rendimento do gerador síncrono em função da classe de potência

Rendimento (%)	Potência do Gerador (MVA)
96	Até 2 MVA
97	Até 3 MVA
98	Até 5 MVA

O fator de potência deve ser definido em função das necessidades do sistema elétrico ao qual o gerador será ligado. Para o caso de geradores que operem interligados ao sistema elétrico, um fator de potência nominal de 0,90 a 0,95 é adequado.

Com todos estes dados, pode-se prosseguir a realização dos cálculos para o dimensionamento do gerador:

$$S_g = 3.311,62 \cdot \left(\frac{0,98}{0,92} \right) = 3.527,6 \text{ kVA}$$

c. Escolha da construção do rotor

Nesta etapa, será escolhido o tipo de construção do rotor que deverá ser utilizado no gerador da PCH. Como já foi apresentado, existem basicamente dois tipos de construção de rotores: rotor de polos lisos (rotor cilíndrico) ou rotor de polos salientes. Normalmente, rotores de polos lisos possuem menos de 4 polos, enquanto rotores de polos salientes são construídos utilizando diversos números de polos. Para o cálculo do número de polos, será utilizada a seguinte equação:

$$p = (60 \cdot f) / n \quad (35)$$

Onde:

n = velocidade de rotação síncrona (rpm);

f = frequência da tensão gerada (Hz);

p = Número de pares de polos do gerador.

$$p = \frac{60 \cdot 60}{514} = 7 \text{ pares de polos} \rightarrow 14 \text{ polos}$$

Os cálculos permitem concluir que o gerador escolhido deverá possuir 14 polos, portanto, o rotor a ser utilizado neste gerador deverá ser um rotor de polos salientes.

6.3.5. Análise dos resultados

Nesta parte do trabalho, será feita uma comparação entre os valores calculados e os equipamentos existentes atualmente na usina de Itatinga.

Devido a questões envolvendo sigilo industrial, não foi possível levantar muitos dados sobre as turbinas, injetores e geradores utilizados na usina, apenas os seguintes dados:

- 6 turbinas hidráulicas (uma reserva), tipo Pelton, 4225 HP, 26 pás, 514 rpm, J M VOITH;
- 5 geradores GE, trifásicos, eixo horizontal, modelo A.T.B., 3.750 kVA, 2.300 V, 60 Hz, 814 A, 514 rpm, com um estator de reserva.

Quanto a turbina, os cálculos apresentados neste trabalho sugeriram o uso de uma turbina de 26 pás com potência de até 3.311,62 kW, já considerando uma eficiência de 80%. O projetista da usina escolheu utilizar uma turbina de 3.150,6 kW (4225 HP) com 26 pás, portanto, é possível concluir que os valores propostos estão relativamente próximos ao estimado neste trabalho.

Quanto ao gerador, os cálculos apresentados neste trabalho sugeriram que o gerador de polos salientes possuísse valor teórico de 3.311,62 kW ou 3.527,6 kVA, já considerando um rendimento de 98% e fator de potência de 0,92. O projetista da usina escolheu utilizar um gerador de 3.750 kVA, portanto, é possível concluir que os valores propostos estão relativamente próximos ao estimado neste trabalho.

6.4. Operação dos geradores da usina de Itatinga

6.4.1. Potencial hidrelétrico do Rio Itatinga

Um dos elementos principais para se estimar a operação de geradores síncronos é o potencial hidrelétrico disponível para a produção de energia elétrica, portanto, é de extrema importância conhecer as vazões de referência que um determinado rio possui. Neste trabalho em particular, será analisado o potencial hidrelétrico do rio Itatinga. A figura 19 apresenta um gráfico indicando as vazões de referência do rio Itatinga.

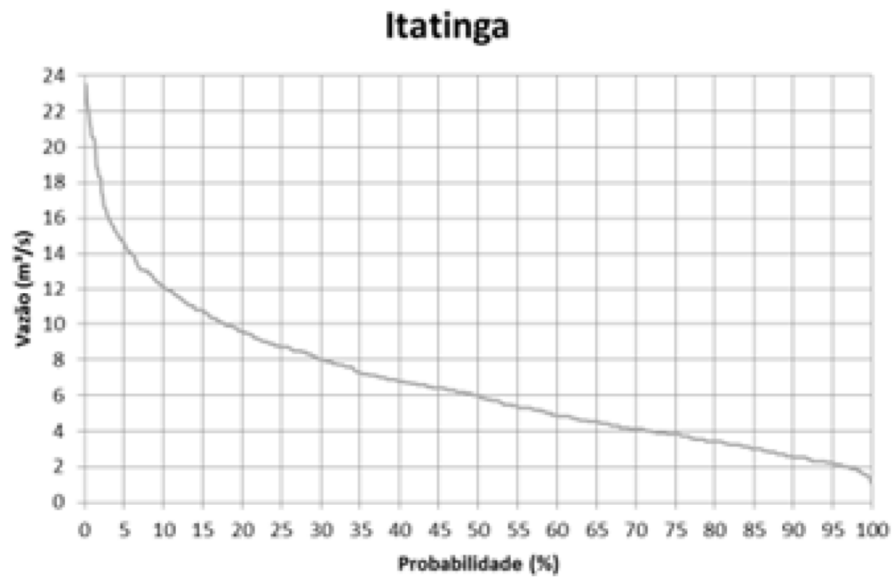


Figura 19 – Vazões de referência do rio Itatinga

Fonte: LABSID (2015)

Do gráfico da figura 19, é possível extrair os principais valores de vazão de referência que serão utilizados, os valores de Q_{mlt} (vazão média de longo termo), Q_{50} (vazão encontrada durante 50% do tempo), Q_{80} (vazão encontrada durante 80% do tempo), Q_{95} (vazão encontrada durante 95% do tempo) e Q_{100} (vazão encontrada durante 100% do tempo). A Tabela 2 mostra os principais valores de vazão de referência encontrados no rio Itatinga.

Tabela 2 – Principais vazões de referência encontradas no rio Itatinga

Rio	Q_{mlt} (m³/s)	Q_{50} (m³/s)	Q_{80} (m³/s)	Q_{95} (m³/s)	Q_{100} (m³/s)	$Q_{mínima}$ (m³/s)
Itatinga	6,74	6,03	3,4	2,2	1,1	1,1

6.4.2. Operação dos geradores nas vazões Q_{mlt} e Q_{50}

Nesta parte do trabalho será analisado o potencial hidrelétrico presente no rio Itatinga quando as vazões presentes possuem o mesmo valor que a referência Q_{mlt} e Q_{50} . O potencial hidrelétrico presente em uma determinada vazão definirá a operação dos geradores. O potencial hidrelétrico pode ser calculado pela seguinte equação:

$$P = g \cdot H \cdot Q \cdot \rho \cdot \eta_g \cdot \eta_t \quad (36)$$

Onde:

Q = vazão considerada, em m^3/s

g = aceleração da gravidade, em m/s^2

H = altura da queda, em metros (m).

ρ = massa específica da água

η_g = rendimento dos geradores

η_t = rendimento das turbinas

Para o cálculo da Potência hidráulica utilizando Q_{mit} :

Onde:

$Q_{\text{mit}} = 6,74 \text{ m}^3/\text{s};$

$g = 9,8 \text{ m}/\text{s}^2$

$H = 640 \text{ m}$

$\eta_g = 0,98$

$\eta_t = 0,8$

$$P = 9,8 \cdot 640 \cdot 6,74 \cdot 1000 \cdot 0,98 \cdot 0,8 = 33.142,25 \text{ kW}$$

Para o cálculo da Potência hidráulica utilizando Q_{50} :

Onde:

$Q_{\text{mit}} = 6,03 \text{ m}^3/\text{s};$

$g = 9,8 \text{ m}/\text{s}^2$

$H = 640 \text{ m}$

$\eta_g = 0,98$

$\eta_t = 0,8$

$$P = 9,8 \cdot 640 \cdot 6,03 \cdot 1000 \cdot 0,98 \cdot 0,8 = 29.651 \text{ kW}$$

Com as vazões de referência Q_{mit} e Q_{50} foi possível obter valores de 33.142,25 kW e 29.651 kW respectivamente, porém, a demanda de vazão da usina é de 3,3 m^3/s , portanto, para estas vazões disponíveis, é possível ativar todos os cinco geradores

de 3750 KVA da usina de modo que eles operem em seus valores nominais, injetando no sistema elétrico toda a potência ativa que conseguirem gerar.

6.4.3. Operação dos geradores na vazão Q_{80}

Nesta parte do trabalho será analisado o potencial hidrelétrico presente no rio Itatinga quando a vazão presente possui o mesmo valor que a referência Q_{80} . O potencial hidrelétrico presente em uma determinada vazão definirá a operação dos geradores. O potencial hidrelétrico pode ser calculado da mesma forma que anteriormente:

Para o cálculo da Potência hidráulica utilizando Q_{80} :

Onde:

$$Q_{80} = 3,4 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$H = 640 \text{ m}$$

$$\eta_g = 0,98$$

$$\eta_t = 0,8$$

$$P = 9,8 \cdot 640 \cdot 3,4 \cdot 1000 \cdot 0,98 \cdot 0,8 = 16.718,6 \text{ kW}$$

Com a vazão de referência Q_{80} foi possível obter o valor de 16.718,6 kW, porém, a demanda de vazão da usina é de 3,3 m³/s, portanto, para estas vazões disponíveis, é possível ativar todos os cinco geradores de 3750 KVA da usina de modo que eles operem em seus valores nominais, injetando no sistema elétrico toda a potência ativa que conseguirem gerar.

6.4.4. Operação dos geradores na vazão Q_{95}

Nesta parte do trabalho será analisado o potencial hidrelétrico presente no rio Itatinga quando a vazão presente possui o mesmo valor que a referência Q_{95} . O potencial hidrelétrico presente em uma determinada vazão definirá a operação dos geradores.

Para o cálculo da Potência hidráulica utilizando Q_{95} :

Onde:

$$Q_{95} = 2,2 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$H = 640 \text{ m}$$

$$\eta_g = 0,98$$

$$\eta_t = 0,8$$

$$P = 9,8 \cdot 640 \cdot 2,2 \cdot 1000 \cdot 0,98 \cdot 0,8 = 10.817,95 \text{ kW}$$

Como a vazão de referência Q_{95} é menor que a demanda de vazão da usina, é necessário verificar a capacidade de geração de potência ativa do gerador para fazer a comparação com o potencial hidrelétrico presente. Para estimar a capacidade de geração de potência ativa, é necessário conhecer o fator de potência nominal do gerador, porém, por questões de sigilo industrial, infelizmente não é possível precisar tal dado, portanto, será utilizado um valor estimado de 0,92. Para se descobrir o valor de potência ativa que o gerador pode despachar, basta multiplicar a potência aparente nominal do gerador pelo fator de potência resultando num valor de 3.450 kW.

Com base nestes dados, pode-se concluir que com essa vazão, é possível manter apenas três geradores operando dentro de seus valores nominais. O uso de quatro geradores obrigaria que os quatro operassem abaixo de seus valores nominais ou que apenas um operasse bem fora de seu valor nominal, portanto, as perdas nele seriam bem consideráveis.

6.4.5. Operação dos geradores na vazão Q_{100} e na vazão mínima ($Q_{\text{mínima}}$)

Nesta parte do trabalho será analisado o potencial hidrelétrico presente no rio Itatinga quando a vazão presente possui o mesmo valor que a referência Q_{100} ou da mínima vazão registrada no rio. O potencial hidrelétrico presente em uma determinada vazão definirá a operação dos geradores.

Para o cálculo da Potência hidráulica utilizando Q_{100} :

Onde:

$$Q_{100} = 1,1 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$H = 640 \text{ m}$$

$$\eta_g = 0,98$$

$$\eta_t = 0,8$$

$$P = 9,8 \cdot 640 \cdot 1,1 \cdot 1000 \cdot 0,98 \cdot 0,8 = 5.408,97 \text{ kW}$$

Como a vazão de referência Q_{100} é bem menor que a demanda de vazão da usina, é necessário verificar a capacidade de geração de potência ativa do gerador para fazer a comparação com o potencial hidrelétrico presente. Para se descobrir o valor de potência ativa que o gerador pode despachar, basta multiplicar a potência aparente nominal do gerador pelo fator de potência resultando num valor de 3.450 kW.

Com base nestes dados, pode-se concluir que com essa vazão, é possível manter apenas um gerador operando dentro de seus valores nominais. O uso de dois geradores obrigaria que os dois operassem um pouco abaixo de seus valores nominais ou que apenas um operasse bem fora de seu valor nominal, portanto, as perdas nele seriam bem consideráveis.

7. CONCLUSÕES

Este estudo reuniu diversas informações a respeito da operação de geradores síncronos utilizados em pequenas centrais hidrelétricas. Ao longo deste trabalho, foram apresentadas as diversas informações como o princípio de funcionamento dos geradores síncronos, seus principais tipos, suas partes principais e seus diversos modos de operação. Além dos geradores, também foram apresentadas as definições e conceitos sobre as próprias pequenas centrais hidrelétricas.

Após a apresentação de todo o fundamento teórico necessário à realização do trabalho, foi apresentado um estudo de caso, utilizando com base uma pequena central hidrelétrica real (PCH Itatinga) que serviu de modelo para o desenvolvimento de diversos cálculos. Para um melhor enriquecimento teórico deste trabalho e para apresentação de conceitos necessários para o desenvolvimento de um projeto de uma PCH, foi realizado o redimensionamento dos principais componentes e equipamentos da PCH Itatinga. Após a realização dos cálculos, foi realizada uma comparação com as especificações dos equipamentos presentes na usina. Esta comparação permitiu validar grande parte da teoria aplicada para o dimensionamento de equipamentos de uma PCH.

De posse da validação da teoria aplicada para dimensionamento de equipamentos de uma PCH, foram realizados diversos estudos de operação de geradores em função das diversas vazões encontradas no rio Itatinga, com destaque para os valores de vazões mínimas e médias encontrados no rio. Este estudo foi de suma importância, pois permite escolher o melhor regime de trabalho dos geradores, além de permitir escolher o número de geradores que podem operar. Tendo como base os princípios teóricos de funcionamento e operação de geradores síncronos, sabe-se que o gerador apresenta um melhor rendimento quando opera perto de seus valores nominais, portanto, é possível concluir que a vazão disponível em um determinado momento determinará a quantidade de geradores que estarão ativos de maneira a permitir que os geradores operem sempre próximos aos seus valores nominais de potência.

Tendo como base todo o trabalho elaborado até o presente momento, pode-se concluir que o estudo da operação de geradores síncronos é de suma importância para que uma PCH opere com a máxima eficiência, evitando assim o desperdício de importantes recursos hídricos, além de perdas financeiras devido a erros de dimensionamento dos equipamentos que compõe uma pequena central hidrelétrica.

8. BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL

ALBARELLO, Leonardo. Guia para a implantação de pequenas centrais hidrelétricas-PCHs. 2014.

ANEEL. Guia do empreendedor de pequenas Centrais Hidrelétricas. 2003.

ALEXANDRE, Denise Barros. Desenvolvimento de sistema computacional para pré-dimensionamento de turbinas para micro, mini e pequenas centrais hidrelétricas. 2004.

SILVA, Marcel Tavares Coelho; QUINTINO, Luís Fernando; DELLA PIAZZA, Cesar Augusto. GERADORES SÍNCRONOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. 2016.

SILVA, F. B. et al. Estudo do Potencial Energético para a Complementação por PCH da Geração da Usina Hidrelétrica Amador Aguiar I. 2010.

LIMA, Roberth dos Santos. Padronização de projetos elétricos de pequenas centrais hidrelétricas. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Dezembro.

MACINTYRE, ARCHIBALD JOSEPH; HIDRÁULICAS, Máquinas Motrizes. Editora Guanabara II. Rio de Janeiro, 1983.

CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. AMGH editora, 2013.

UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7. AMGH Editora, 2014.

DA COSTA JR, Pedro et al. Curvas de capacidade e dinâmica de geradores síncronos. In: 9 th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications. 2010.

CGH Libera Maria. Disponível em: <http://cghliberamaria.com.br/setor-hidreletrico/p,7,pch-itatinga-1910> Acessado em agosto de 2022.

LABSID, Estudo hidrológico para transferência do Rio Itapanhaú para a represa Biritiba (sistema alto Tietê). Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 2015.

NOGUEIRA, Vinícius de Freitas Gomes. Geração distribuída usando geradores síncronos trifásicos. 2011. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado), UNICAMP.

10 SIMÕES-MOREIRA, José R. et al. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. 2017.

11 LIMA, Roberth dos Santos. Padronização de projetos elétricos de pequenas centrais hidrelétricas. 2002. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.