

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA – ÊNFASE ELETROTÉCNICA

CAIO CESAR VIEIRA SLOMPO  
REINALDO ZANELLO KLOSTERMANN

**ESTUDO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA OTIMIZAÇÃO  
DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DE PCHs**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2012

CAIO CESAR VIEIRA SLOMPO  
REINALDO ZANELLO KLOSTERMANN

## **ESTUDO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DE PCHs**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. M. Sc. Annemarlen G.  
Castagna

Co-Orientador: M. Sc. Douglas Paladine Vieira

CURITIBA

2012

CAIO CESAR VIEIRA SLOMPO  
REINALDO ZANELLO KLOSTERMANN

## ESTUDO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DE PCHs

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 03 de dezembro de 2012.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre  
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso  
De Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica  
do DAELT

### ORIENTAÇÃO

### BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientadora

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Douglas Paladine Vieira, Mestre  
Companhia Paranaense de Energia - COPEL  
Co-Orientador

---

Prof. Gilberto Manoel Alves, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Wanderley Szlichta, Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Douglas Paladine Vieira, Mestre  
Companhia Paranaense de Energia – COPEL

## **AGRADECIMENTOS**

À nossa orientadora Professora M. Sc. Annemarlen G. Castagna pela paciência e orientação.

Ao amigo e co-orientador M. Sc. Douglas Paladine Viera por nos ajudar na escolha do tema, realização e conclusão do trabalho.

À nossas famílias pelo apoio e educação que nos permitiu chegar até aqui.

## RESUMO

SLOMPO, Caio Cesar Vieira; KLOSTERMANN, Reinaldo Zanello. Estudo de Parâmetros Operacionais para Otimização da Operação Energética de PCHs. 2012. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Este trabalho apresenta um estudo sobre os parâmetros operacionais que devem ser considerados na otimização da operação energética de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) analisando as perdas envolvidas no processo de transformação da energia. São apresentados métodos para obtenção das grandezas das variáveis da função geração que tem como objetivo fornecer os valores que possibilitam o cálculo das perdas de PCHs em funcionamento. Além disso, faz-se simulações de operação para comprovar ganho na geração de energia dentro de um intervalo de tempo com valores mínimos e máximos de perdas e levando em consideração valores de afluência.

**Palavras-chave** – Pequenas Centrais Hidrelétricas, otimização, afluência.

## **ABSTRACT**

SLOMPO, Caio Cesar Vieira; KLOSTERMANN, Reinaldo Zanello. Study of Operational Parameters to the Optimization of the Energetic Operation of SHPPs. 2012. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

This coursework presents a study of the operating parameters that must be taken into account in the optimization of the operation of Small Hydro Power Plants (SHPPs) analyzing the losses involved in the process of transformation of energy. We present methods to obtain the magnitudes of variable generation function that aims to provide values that enable the calculation of losses from SHPs in operation. Furthermore, we make simulations of operation to demonstrate gain in power generation within a time interval with minimum and maximum values of losses and taking into account values of affluence.

**Keywords** - Small Hydro Power Plants, optimization, affluence.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático de uma usina hidrelétrica.....	18
Figura 2 – Exemplo da curva colina de uma turbina hidráulica. ....	23
Figura 3 – Exemplo da curva de rendimento de um gerador de Itaipu.....	23
Figura 4 - Total de Perdas na Usina Serra da Mesa. ....	27
Figura 5 – Geometria dos Rotores de Turbinas Hidráulicas.....	28
Figura 6 – Tipo de turbina em função da vazão (Q) e queda líquida (H).....	30
Figura 7 – Turbina Pelton Horizontal com um jato. ....	31
Figura 8 – Esquema funcionamento turbina Michell Banki.....	32
Figura 9 – Turbina Francis de eixo horizontal e caixa espiral.....	33
Figura 10 – Rotor Turbina Hélice e Kaplan. ....	34
Figura 11 – Esquemática do funcionamento de uma Turbina Hélice e Kaplan. ....	35
Figura 12 – Comparação Rendimento X % Plena Carga das Turbinas Kaplan, Francis e Hélice.....	35
Figura 13 – Esquemático do funcionamento de uma Turbina Bulbo. ....	36
Figura 14 – Esquemático do funcionamento de uma Turbina tipo “S”.....	37
Figura 15 – Corte longitudinal da Turbina Straflo, eixo horizontal. Componentes: (1) pás diretrizes fixas, (2) pás diretrizes móveis do distribuidor, (3) pás fixas do rotor e (4) gerador.....	38
Figura 16 – Rendimento das turbinas em função da vazão $n_0$ e $H_0$ constantes.....	39
Figura 17 – Curvas de $(\eta t)$ em função de $(H/H_n)$ para turbinas. ....	40
Figura 18 – Limites de operação de uma turbina Francis Normal.....	41
Figura 19 – Diagrama de Colina Q x n, com curvas de $\alpha$ a $\eta t$ constantes, para H constante.....	45
Figura 20 – Medição da vazão através do Método de Gibson .....	47
Figura 21 – Corte de um Molinete. ....	48
Figura 22 – Seção transversal com representação da velocidades nos pontos.....	49
Figura 23 – Diferença de tempo no medidor ultrassônico. ....	52
Figura 24 – Tipos de medições dos medidores de vazão ultrassônicos. ....	53
Figura 25 – Localização das tomadas de pressão em turbinas com caixa espiral ....	54
Figura 26 – Instalação do Medidor de Nível Hidrostático .....	57
Figura 27 – Medição pelo Método Ultrassônico. ....	57
Figura 28 – Método dos dois wattímetros com medição do neutro. ....	58
Figura 29 – Método dos dois wattímetros sem medição do neutro. ....	59
Figura 30 – Total de perdas em função da potência instantânea gerada.....	64
Figura 31 – Volume do reservatório em função do período de estudo.....	69
Figura 32 – Energia gerada em função do período do estudo. ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das PCHs quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto. ....	20
Tabela 2 – Distância recomendada entre cada seção vertical. ....	50
Tabela 3 – Número e profundidade recomendada em cada seção vertical de acordo com a profundidade do rio. ....	50
Tabela 4 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 1. ....	65
Tabela 5 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 2. ....	66
Tabela 6 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 3. ....	67
Tabela 7 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 4. ....	68

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ACL – Ambiente de Contratação Livre

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Sustentável

CCEAR – Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCVE – Contrato de Compra e Venda de Energia

DNAEE – Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

MAE – Mercado Atacadista de Energia

MME – Ministério de Minas e Energia

MRE – Mecanismo de Realocação de Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PLD – Preço de Liquidação das Diferenças

PNE – Plano Nacional de Energia

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA.....	13
1.2	PROBLEMA.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	JUSTIFICATIVA.....	15
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	16
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	PRODUÇÃO HIDRÁULICA DE ENERGIA ELÉTRICA E AS PERDAS ASSOCIADAS.....	18
2.1	PCHs QUANTO A CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO.....	19
2.1.1	PCH a Fio d'água.....	19
2.1.2	PCH de Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório.....	19
2.1.3	PCH de Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.....	19
2.2	PCHs QUANTO AO SISTEMA DE ADUÇÃO.....	20
2.3	PCHs QUANTO A POTÊNCIA INSTALADA E QUANTO A QUEDA DO PROJETO.....	20
2.4	POTÊNCIA GERADA.....	20
2.5	ALTURA DE QUEDA LÍQUIDA.....	21
2.6	O NÍVEL DE JUSANTE.....	22
2.7	RENDIMENTO DO CONJUNTO TURBINA-GERADOR.....	22
2.8	PERDA TOTAL NA GERAÇÃO.....	24
2.8.1	Perda Hidráulica.....	24
2.8.2	Perda pela Elevação do Nível Jusante.....	24
2.8.3	Perda pela Variação de Rendimento do Conjunto Turbina-Gerador.....	25
2.8.4	Cálculo da Perda Total na Geração.....	25
3	CLASSIFICAÇÃO E OPERAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS.....	27
3.1	TURBINAS HIDRÁULICAS DE AÇÃO.....	30
3.1.1	Turbinas Pelton.....	31
3.1.2	Turbinas Michell Banki.....	32
3.2	TURBINAS HIDRÁULICAS DE REAÇÃO.....	32
3.2.1	Turbinas Francis.....	33

3.2.2	Turbinas Hélice e Kaplan.....	34
3.2.3	Turbinas Bulbo.....	36
3.2.4	Turbinas Tipo “S” .....	36
3.2.5	Turbinas Straflo .....	37
3.3	OPERAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS.....	38
3.3.1	Rendimento da Turbina em Função da Vazão .....	38
3.3.2	Rendimento da Turbina em Função da Altura .....	39
3.3.3	Limites de Operação das Turbinas.....	40
4	ENSAIOS E METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS.....	41
4.1	ENSAIOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS .....	42
4.1.1	Normas para Ensaios de Turbinas .....	42
4.1.2	Finalidade dos Ensaios.....	42
4.1.3	Tipos de Ensaios .....	43
4.2	CAMPOS DE FUNCIONAMENTO .....	44
4.2.1	Campo Básico de Funcionamento das Turbinas .....	44
4.3	MEDIÇÃO DE VAZÃO .....	46
4.3.1	Método de Gibson (Pressão por Tempo).....	46
4.3.2	Método dos Molinetes.....	48
4.1.2.1	Instalação do Molinete em canal aberto.....	51
4.1.2.2	Instalação do Molinete em condutos forçados de seção circular .....	51
4.1.2.3	Instalação do Molinete na tomadas d’água da turbina.....	51
4.3.3	Método Ultrassônico.....	52
4.3.4	Método de Winter-Kennedy .....	54
4.3.5	Método da Diluição .....	55
4.4	MEDIÇÃO DO NÍVEL A JUSANTE E A MONTANTE .....	56
4.4.1	Método de Nível Hidrostático.....	56
4.4.2	Método de Nível Ultrassônico.....	57
4.5	MEDIÇÃO INDIRETA DA POTÊNCIA ATIVA DO GERADOR.....	58
4.6	RENDIMENTO DA TURBINA HIDRÁULICA.....	59
4.6.1	Obtenção dos Parâmetros.....	59
4.7.1.1	Altura de queda líquida ( $h_{li}$ ).....	60
4.7.1.2	Vazão Turbinada ( $q_{ti}$ ) .....	60
4.7.1.3	Potência Hidráulica ( $p_i$ ).....	60
4.7.1.4	Potência Ativa do Gerador ( $P_{el}$ ).....	60
4.7.1.5	Rendimento Elétrico do Gerador ( $\eta_{el}$ ).....	60
4.7.1.6	Potência no Eixo da Turbina ( $P_e$ ).....	61

4.7.1.6	Rendimento da Turbina ( $\eta_t$ ) .....	61
5	SIMULAÇÕES.....	62
5.1	EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO.....	62
5.2	DADOS DA PCH.....	63
5.3	METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO.....	64
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
6.1	CONCLUSÕES .....	71
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	72
7	REFERÊNCIAS.....	73

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

A energia elétrica confiável e com altos índices de disponibilidade é uma componente de suma importância da rede de infra-estrutura, uma vez que constitui um insumo básico da atividade sócio-econômica mundial. Para o planejamento e a produção de energia elétrica no Brasil são empregadas, atualmente, técnicas avançadas e adequadas à realidade do sistema elétrico nacional, levando-se em conta fatores diversos como sociais, econômicos e ambientais (VIEIRA, 2007).

O processo de tomada de decisões na área de energia pode implicar em alto custo financeiro, social e ambiental. Portanto, é necessário um adequado planejamento da operação para retirar o máximo de benefícios dos recursos que compõem o sistema (VIEIRA, 2007).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define: “Os empreendimentos hidrelétricos com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, com área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km<sup>2</sup>, serão considerados como aproveitamentos com características de pequenas centrais hidrelétricas.” (ANEEL, 2010).

A fim de assegurar investimentos necessários para expansão do parque gerador, diversificação da matriz energética e buscar o desenvolvimento sustentável foram criados incentivos legais para investimentos em fontes de energias alternativas.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), conforme descrito no Decreto nº 5.025, de 2004, foi instituído com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) (MME, 2010).

Apesar de ser uma fonte alternativa com incentivos legais, conforme mencionado acima, as PCHs, como todos os empreendimentos de geração, acarretam em danos para o meio ambiente. Entre os danos causados pelas PCHs pode-se citar (NILTON, 2009):

- Inundação de áreas;
- Perda de vegetação e da fauna terrestres;
- Interferência na migração dos peixes;
- Mudanças hidrológicas a jusante da represa;
- Alterações na fauna do rio;
- Perdas de heranças históricas e culturais, alterações em atividades econômicas e usos tradicionais da terra;
- Perda da biodiversidade, terrestre e aquática;
- Efeitos sociais por realocação.

Com o crescimento do consumo de energia elétrica estimado em 5% ao ano, as PCHs se configuram como uma fonte importante para atender a demanda brasileira, pois apresentam menor investimento e impacto ambiental, ainda apresentam as vantagens de necessitarem apenas de autorização da ANEEL para implantação, a redução das tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição e a isenção do pagamento da compensação financeira pelo uso de recursos hídricos (PORTAL PCH, 2010).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica, a potência instalada das PCHs no Brasil aumentou mais de 300% entre 2001 e 2009, passando de 855MW para 2953MW. Sua representação no montante da energia elétrica no SIN passou de 1,14% para 2,77% (ANEEL, 2010).

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) as PCHs somadas terão capacidade instalada de 8330MW em 2030, quase três vezes mais que o instalado até 2009 e sua representação será de aproximadamente 8% (EPE, 2010).

Nesse contexto, este trabalho trata do estudo dos parâmetros necessários para otimização da operação de PCHs em funcionamento e verificar quais os tipos de medições e ensaios que deverão ser realizados para obtenção dos parâmetros.

## 1.2 PROBLEMA

Atualmente não é observada existência de um planejamento de operação para que as PCHs operem no ponto ótimo de funcionamento, acarretando que estas possam estar operando fora do ponto de maior rendimento devido a:

- Falta de conhecimento dos parâmetros operacionais;
- Indisponibilidade de dados reais para fazer a otimização uma vez que muitas PCHs foram construídas há muitos anos, sofrendo assim desgastes mecânicos, alterações de projeto e outros fatores que alteraram seu rendimento original.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Fazer um estudo sobre os parâmetros operacionais considerados para a otimização da operação energética de PCHs, levando em conta as perdas envolvidas no processo de transformação da energia bem como um estudo de como obter estes dados em campo. Além de simulações considerando um cenário de afluências.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar o funcionamento das usinas hidrelétricas;
- Pesquisar quais os parâmetros operacionais que devem ser levados em conta para encontrar o ponto de maior rendimento de uma PCH;
- Verificar metodologia de medições que são realizadas em campo;
- Fazer simulações da operação de uma PCH levando em conta a variação do rendimento e um cenário de afluências do rio onde a mesma está inserida.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

A demanda de energia elétrica no Brasil aumenta de 4 a 5% ao ano (ONS, 2010). Para atender essa demanda são investidos milhões de reais na construção de novos empreendimentos de geração para garantir a continuidade do fornecimento de energia de maneira satisfatória.

O custo de implantação de um MW instalado em uma PCH é aproximadamente 5 milhões de reais além de todos os impactos sociais e ambientais causados pela instalação de uma usina elétrica (PORTAL PCH, 2010).

Se o potencial instalado nas PCHs do Brasil for otimizado através de uma operação mais eficiente, de modo a aumentar a produção em 3%, seria possível obter 90 MW a mais, considerando o potencial instalado de 2009. A inclusão desta potência no sistema reduziria a necessidade de construção de novas instalações. Seria possível uma economia em investimentos da ordem de 450 milhões de reais, isto sem considerar a redução nos impactos ambientais, sociais, tempo de construção da nova usina entre outros fatores econômicos. Se esse cálculo for feito com a projeção do potencial instalado das PCHs em 2030, a economia poderia chegar a 1,25 bilhões de reais.

Um melhor despacho das unidades geradoras, considerando a utilização dos fatores de perdas de rendimento das máquinas, possibilitará obter um maior aproveitamento dos recursos dos empreendimentos em operação, resultando em um aumento do ganho financeiro, além da redução de impactos ambientais e investimentos em construções de novos empreendimentos.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho está dividido em quatro etapas distintas:

Na primeira etapa é apresentada a literatura referente ao funcionamento das usinas hidrelétricas e pequenas centrais hidrelétricas bem como suas perdas no processo de geração de energia elétrica.

Na segunda etapa são levantados os parâmetros necessários para que possa ser realizada uma otimização operacional energética das PCHs.

Na terceira etapa são verificados quais os ensaios e medições que devem ser realizados em campo para obtenção dos parâmetros.

Na quarta etapa são feitas simulações com dados hidrológicos para verificar possíveis ganhos na geração total de energia ao longo de um período, encontrando assim os resultados e conclusões do trabalho.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1: Tema do Trabalho de Conclusão de Curso;

Capítulo 2: Produção Hidráulica de Energia Elétrica e as Perdas Associadas;

Capítulo 3: Classificação e Operação das Turbinas Hidráulicas;

Capítulo 4: Ensaio e Metodologias para Medição das Grandezas;

Capítulo 5: Simulações de Despacho de Energia;

Capítulo 6: Perspectivas e Conclusões.

## 2 PRODUÇÃO HIDRÁULICA DE ENERGIA ELÉTRICA E AS PERDAS ASSOCIADAS

Um aproveitamento hidráulico para geração de energia elétrica é composto basicamente por: uma barragem formadora de um reservatório; uma tomada d'água e condutos forçados que levam a água do reservatório até a casa de força; a casa de força, situada num nível mais baixo, onde estão instalados os grupos turbina-gerador e outros equipamentos auxiliares; além de um canal de restituição, através do qual a água é reconduzida ao rio ou a outro curso d'água, como mostrado na Figura 1.

No processo de geração de energia elétrica, a energia potencial da água armazenada no reservatório é transformada em energia cinética e energia de pressão dinâmica pela passagem da água pelos condutos forçados. Ao fazer o acionamento da turbina, essa energia é convertida em energia mecânica, que por sua vez é transmitida pelo eixo ao gerador. Nesse último, a energia mecânica é transformada em energia elétrica, a qual passa por uma subestação (SE) elevadora de tensão, sendo então injetada no sistema de transmissão que a fará chegar aos centros consumidores (FORTUNATO, NETO, ALBUQUERQUE, 1990).

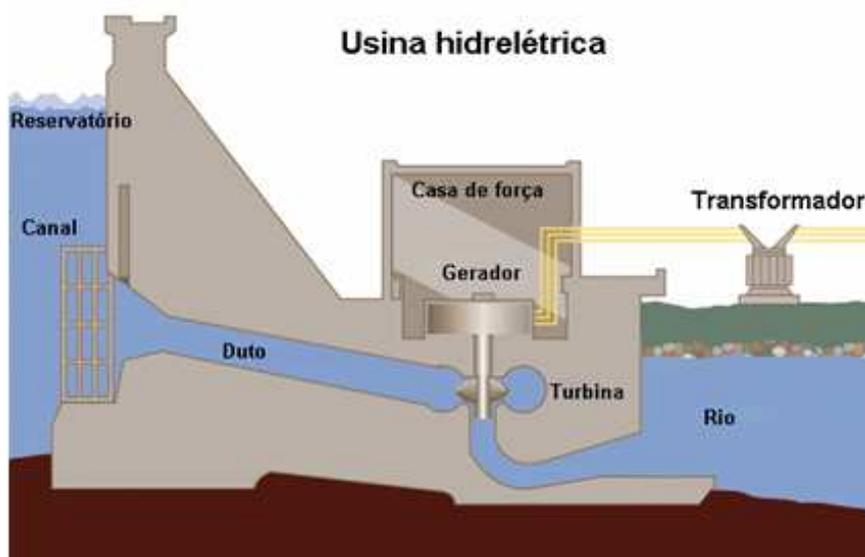


Figura 1 – Esquemático de uma usina hidrelétrica.

Fonte: Vieira (2007, p. 32).

## 2.1 PCHs QUANTO A CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO

As PCHs podem ser divididas de acordo com a capacidade de regularização em (ELETROBRÁS, 2012):

- A Fio d'água;
- De acumulação, com Regularização Diária do Reservatório;
- De acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.

### 2.1.1 PCH a Fio d'água

É utilizada quando

as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista. (ELETROBRÁS, 2012)

As PCHs a fio d'água possuem este nome porque operam através de um fio d'água e o reservatório não possibilita regularizar o fluxo d'água. O reservatório criado pela barragem é desconsiderado (PORTAL PCH, 2012).

### 2.1.2 PCH de Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório

É utilizada quando

as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto. (ELETROBRÁS, 2012)

O reservatório será o responsável por fornecer a vazão adicional que falta para operação máxima da PCH. (ELETROBRÁS, 2012)

### 2.1.3 PCH de Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório

É utilizada seguindo o mesmo critério da PCH de acumulação com regularização do reservatório, porém, considera os dados de vazões médias mensais e não diárias. (ELETROBRÁS, 2012)

## 2.2 PCHs QUANTO AO SISTEMA DE ADUÇÃO

É utilizada seguindo o mesmo critério da PCH de acumulação com regularização do reservatório, porém, considera os dados de vazões médias mensais e não diárias.

São divididas em dois tipos:

- Adução em baixa pressão através de canal em escoamento livre;
- Adução em baixa pressão através de tubulação.

Para definição do tipo devem-se verificar as condições geológicas e topográficas do local e fazer um comparativo econômico entre eles. Usualmente a opção de tubulação é utilizada para sistemas que possuem adução curto e para sistemas com adução longa utiliza-se a opção de canais. (ELETROBRÁS, 2012)

## 2.3 PCHs QUANTO A POTÊNCIA INSTALADA E QUANTO A QUEDA DO PROJETO

As PCHs podem ser classificadas conforme a queda de projeto e potência instalada conforme pode ser verificado na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das PCHs quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto.

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	POTÊNCIA - P (kW)	QUEDA DE PROJETO - $H_d$ (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
MINI	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
PEQUENAS	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2012).

## 2.4 POTÊNCIA GERADA

A potência gerada numa usina hidrelétrica é uma função da vazão turbinada e da altura de queda, que por sua vez, é uma função não-linear do volume armazenado e da vazão defluente. A potência produzida numa unidade geradora pode ser dada através da seguinte relação matemática (ARCE, 2006):

$$P_i = g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot \eta_{tur_i} \cdot \eta_{ger_i} \cdot h_{l_i} \cdot q_{t_i} \quad (1)$$

- $P_i$  é a potência gerada na máquina  $i$  ( $MW$ )
- $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
- $\rho$  é o peso específico da água ( $kg/m^3$ )
- $\eta_{tur_i}$  é o rendimento da turbina  $i$  (%)
- $\eta_{ger_i}$  é o rendimento do gerador  $i$  (%)
- $h_{l_i}$  é a altura de queda líquida na máquina  $i$  ( $m$ )
- $q_{t_i}$  é a vazão turbinada na máquina  $i$  ( $m^3/s$ )

## 2.5 ALTURA DE QUEDA LÍQUIDA

A altura de queda líquida é função do nível de montante do reservatório, do nível de jusante e das perdas hidráulicas nos condutos forçados, de acordo com a expressão abaixo: (SALMAZO, 1997).

$$h_{l_i} = n_m - n_j - h_{ph_i} \quad (2)$$

$h_{l_i}$  é a altura da queda líquida ( $m$ )

$n_m$  é o nível de montante ( $m$ )

$n_j$  é o nível de jusante ( $m$ )

$h_{ph_i}$  é a altura de perda hidráulica da máquina  $i$  ( $m$ )

A perda hidráulica é a redução da energia potencial pelo atrito da água nas paredes do conduto forçado e depende de forma direta da vazão turbinada. A equação é dada por (SALMAZO, 1997):

$$h_{ph_i} = k \cdot q_{t_i}^2 \quad (3)$$

$k$  é a constante característica do conduto forçado ( $s^2/m^2$ )

## 2.6 O NÍVEL DE JUSANTE

O nível de jusante é representado por uma função polinomial, dada por (SALMAZO,1997):

$$n_j = a_0 + (a_1 \cdot q_d) + \dots + (a_n \cdot q_d^n) \quad (4)$$

$$q_d = \sum_{i=1}^{nm} q_{t_i} + q_v \quad (5)$$

$n_j$  é o nível de jusante ( $m$ )

$a_0 \dots a_n$  são os coeficientes da função polinomial

$q_v$  é a vazão vertida ( $m^3/s$ )

$q_d$  é a vazão defluente ( $m^3/s$ )

$nm$  é o número de máquinas da usina

## 2.7 RENDIMENTO DO CONJUNTO TURBINA-GERADOR

O rendimento da turbina hidráulica é uma função não linear dependente da vazão turbinada e da altura de queda líquida. Na Figura 2 pode ser visto o rendimento de uma turbina hidráulica, que pela sua forma é conhecida como Curva Colina.

A transformação da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador não se verifica de maneira completa, devido a que nessa transformação também há perdas nos enrolamentos, perdas mecânicas provocadas pelo atrito nas escovas do sistema de excitação, perdas nos mancais e sistema de ventilação. Verificam-se também perdas provocadas pela histerese e correntes de Foucault, originadas pela variação da densidade de fluxo magnético no ferro do gerador (ARCE, 2006).

Os geradores também apresentam variações de rendimento em função da potência gerada, como mostrado pela Figura 3.

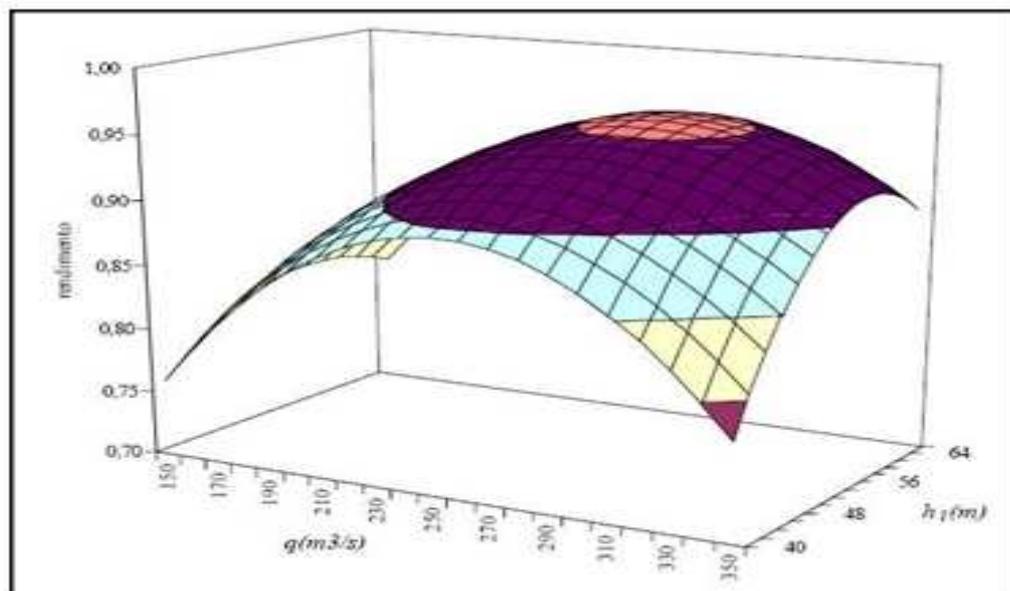


Figura 2 – Exemplo da curva colina de uma turbina hidráulica.

Fonte: Arce (2006, p. 26).

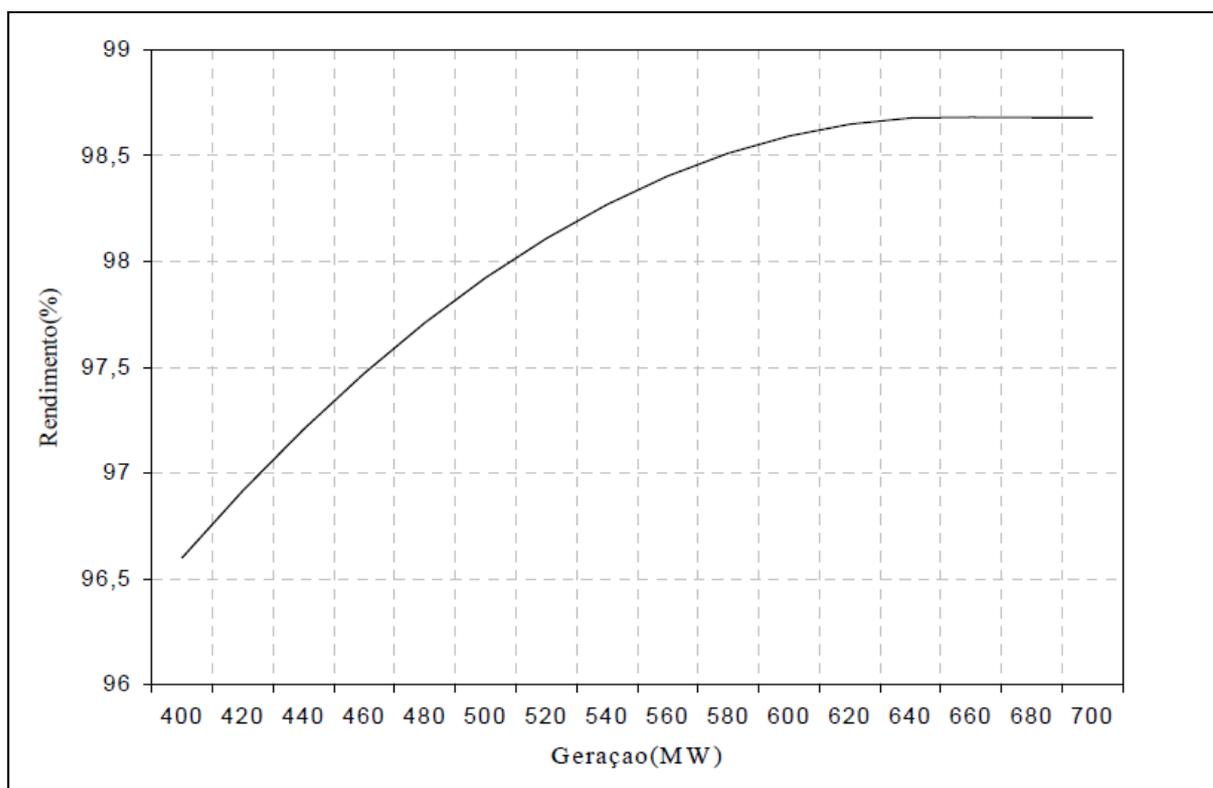


Figura 3 – Exemplo da curva de rendimento de um gerador de Itaipu.

Fonte: Arce (2006, p. 28).

Define-se como rendimento do conjunto turbina-gerador da unidade geradora  $i$  ( $n_i$ ), o produto do rendimento da turbina pelo rendimento do gerador. A Equação é dada abaixo:

$$n_i = n_{tur_i} \cdot n_{ger_i} \quad (6)$$

## 2.8 PERDA TOTAL NA GERAÇÃO

Foram apresentadas anteriormente as variáveis que compõem a função de geração de energia, sem destacar como a variação de cada uma delas impacta na produção total. Para permitir analisar este comportamento é necessário expressar todas as perdas associadas em uma mesma unidade dimensional, o MW. Para isso, têm-se as formulações que seguem:

### 2.8.1 Perda Hidráulica

A perda hidráulica é dada pela redução da altura de queda em função da perda hidráulica nos condutos, sendo definida por:

$$P_{he_i} = g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot \eta_i \cdot h_{ph_i} \cdot q_{t_i} \quad (7)$$

$P_{he_i}$  representa a perda hidráulica na máquina  $i$  (MW)

### 2.8.2 Perda pela Elevação do Nível Jusante

A elevação do nível de jusante causa uma redução da altura de queda líquida e, portanto uma redução da potência gerada. A perda de potência ocorre em relação à potência correspondente ao nível de referência (sem perda) quando a defluência é nula. Para usinas equipadas com turbinas que não operam afogadas, como as turbinas Pelton, a variação do nível no canal de fuga não altera a altura de queda líquida, e conseqüentemente não acarreta em acréscimo de perdas durante a produção de energia. A redução de potência gerada, decorrente da elevação do nível de jusante é dada abaixo (SALMAZO, 1997):

$$p_{j_i} = (n_j(q_d) - n_j(0))g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot \eta_i \cdot q_{t_i} \quad (8)$$

$p_{j_i}$  representa a perda por elevação do nível de jusante na máquina  $i$  ( $MW$ )

A influência da vazão vertida ( $q_v$ ) no nível de jusante depende das características de projeto da usina no que se refere à localização do vertedouro, pois quando o vertimento se dá em um ponto distante das descargas das máquinas a influência pode ser nula (SALMAZO, 1997).

### 2.8.3 Perda pela Variação de Rendimento do Conjunto Turbina-Gerador

A operação da unidade geradora fora do seu ponto de melhor rendimento (dado pela curva colina) causa uma perda no processo de produção de energia elétrica. Para se determinar esta perda, foi considerado como valor de referência (perda nula) o ponto de maior rendimento ( $\eta_B$ ), o distanciamento deste ponto é que indica a redução de potência, dada então por:

$$p_{r_i} = (\eta_{B_i} - \eta_i) \cdot g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot h_{l_i} \cdot q_{t_i} \quad (9)$$

$p_{r_i}$  representa a perda pelo distanciamento do ponto de maior rendimento do conjunto turbina-gerador ( $MW$ )

$\eta_{B_i}$  representa o ponto de maior rendimento do conjunto turbina-gerador da máquina  $i$ .

### 2.8.4 Cálculo da Perda Total na Geração

Supondo um dado número de máquinas sincronizadas, o cálculo da perda total na geração pode ser obtido através de um procedimento iterativo, conforme apresentado em (SALMAZO, 1997):

1 – Inicia-se com a vazão turbinada com um valor mínimo definido de modo que a potência gerada seja factível segundo diagrama de Hill ou curva colina da unidade geradora.

2 – Estima-se um rendimento, próximo ao rendimento mínimo da máquina.

3 – Encontra-se o nível de jusante pela equação (4):

$$n_j = a_0 + (a_1 \cdot q_d) + \dots + (a_n \cdot q_d^n)$$

4 – Encontra-se a perda hidráulica pela equação (3):

$$h_{ph_i} = k \cdot q_{t_i}^2$$

5 – Encontra-se a altura líquida pela equação (2):

$$h_{l_i} = n_m - n_j - h_{ph_i}$$

6 – Encontra-se a potência gerada pela equação (1):

$$P_i = g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot \eta_{tur_i} \cdot \eta_{ger_i} \cdot h_{l_i} \cdot q_{t_i}$$

7 – A partir do par altura líquida e potência, utilizando o diagrama de Hill encontra-se o rendimento, equação (6):

$$n_i = n_{tur_i} \cdot n_{ger_i}$$

8 – Transformam todas as perdas para unidade de potencia (MW), utilizando as (7), (8) e (9).

$$P_{he_i} = g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot \eta_i \cdot h_{ph_i} \cdot q_{t_i}$$

$$p_{j_i} = (n_j(q_d) - n_j(0)) g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot \eta_i \cdot q_{t_i}$$

$$p_{r_i} = (\eta_{B_i} - \eta_i) \cdot g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot h_{l_i} \cdot q_{t_i}$$

As perdas podem ser apresentadas em forma de gráfico como na figura abaixo:

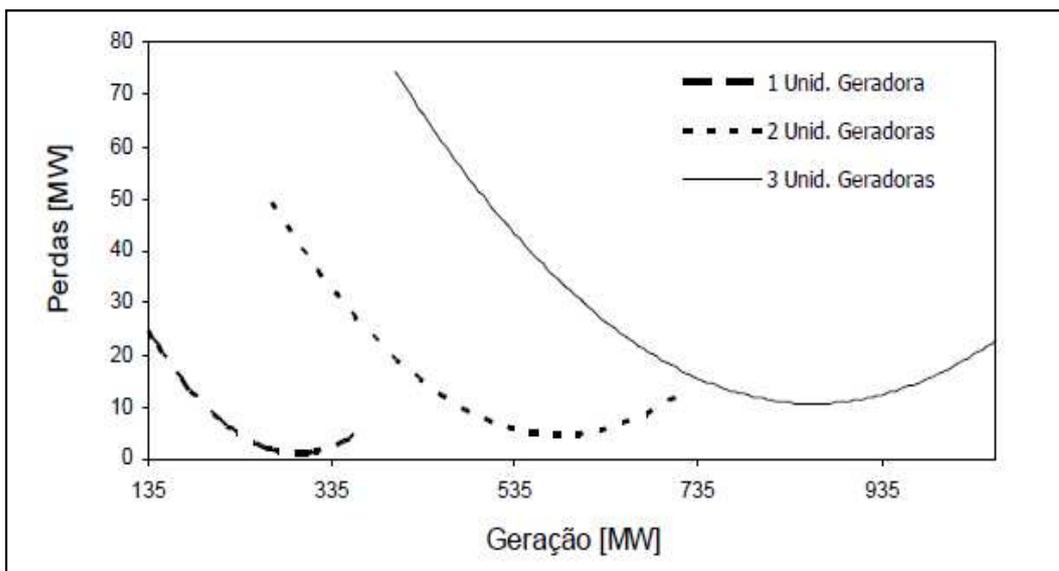


Figura 4 - Total de Perdas na Usina Serra da Mesa.

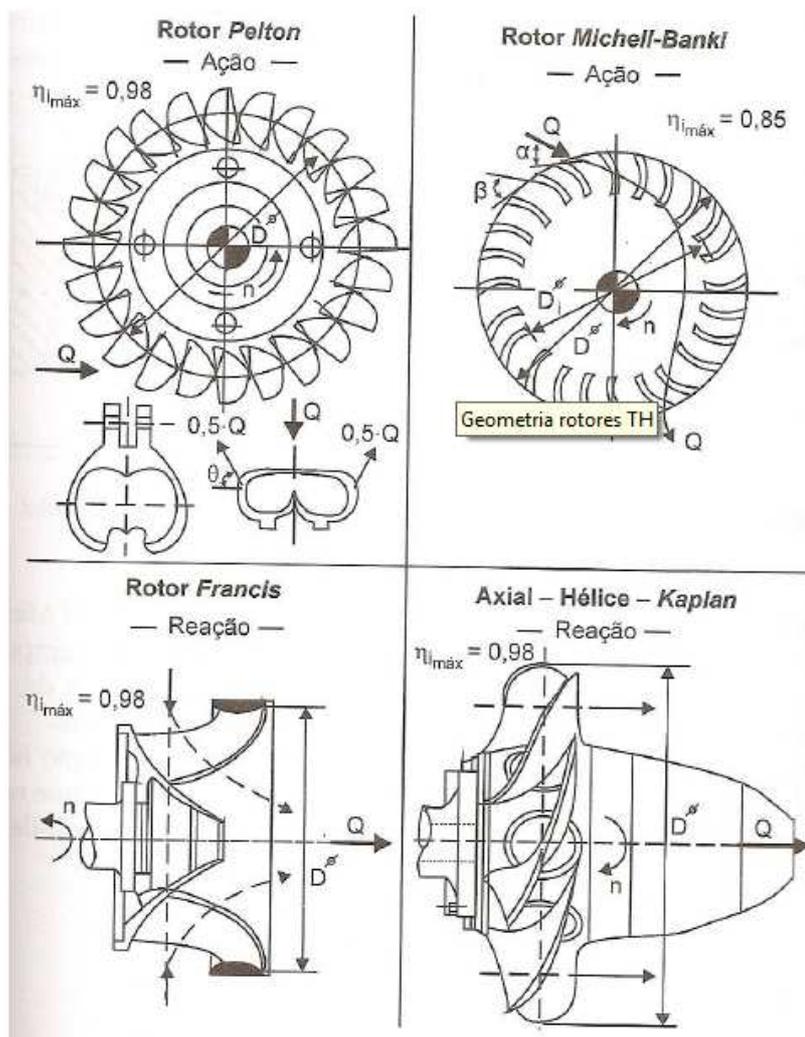
Fonte: Arce (2006, p. 48).

### 3 CLASSIFICAÇÃO E OPERAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

Para verificar o tipo de turbina a ser utilizada na PCH é necessário verificar como elas são classificadas e como operam.

As turbinas hidráulicas podem ser classificadas em:

1. De reação;
2. De ação.



**Figura 5 – Geometria dos Rotores de Turbinas Hidráulicas.**

Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, (2012, p.313)

Segundo Viana (2010), uma turbina é constituída basicamente por cinco partes: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, rotor e eixo, tubo de sucção.

### Caixa espiral

É uma tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Esta parte fica integrada à estrutura civil da usina.

O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina.

É fabricada com chapas de aço carbono soldada em segmentos. A caixa espiral conecta-se ao conduto forçado na secção de entrada, e ao pré-distribuidor na secção de saída.

### Pré-distribuidor

A finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuidor. É composta de dois anéis superiores, entre os quais são montados um conjunto palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, para não gerar perda de carga e não provocar turbulência no escoamento. É uma parte sem movimento, soldada à caixa espiral e fabricada com chapas ou placas de aço carbono.

### Distribuidor

O distribuidor é composto de uma série palhetas móveis, acionado por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina.

Todas as palhetas têm o seu movimento conjugado, isto é, todas se movem ao mesmo tempo e de maneira igual.

O acionamento é feito por um ou dois pistões hidráulicos.

O distribuidor controla a potência da turbina pois regula vazão da água. É um sistema que pode ser operado manualmente ou em modo automático, neste caso tornando o controle da turbina praticamente isento de interferência do operador.

### Rotor e eixo

O rotor da turbina é onde ocorre a conversão de energia hídrica em potência de eixo.

### Tubo de sucção

Duto de saída da água, geralmente com diâmetro final maior que o inicial, desacelera o fluxo da água após esta ter passado pela turbina, devolvendo-a ao rio parte jusante da casa de força.

Pode-se escolher qual o tipo de turbina que melhor se adéqua para cada tipo de usina. Cada um destes tipos é adaptado para funcionar com uma determinada faixa de altura de queda. As vazões volumétricas podem ser igualmente grandes em qualquer uma delas, mas a potência será proporcional ao produto da queda líquida (H) e da vazão (Q).

Na Figura 6 pode-se observar o tipo de turbina adequada a cada vazão e altura de queda líquida.

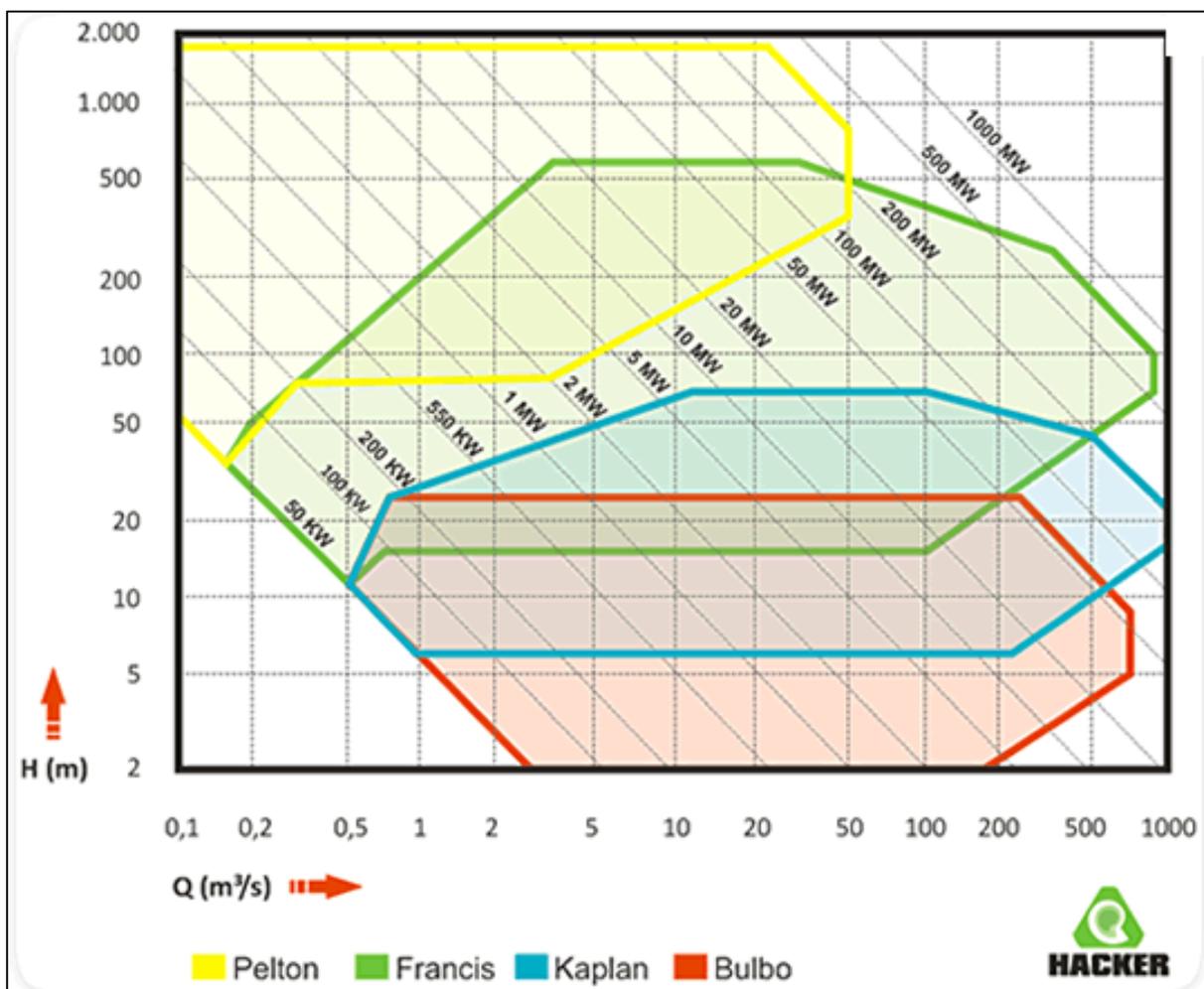


Figura 6 – Tipo de turbina em função da vazão (Q) e queda líquida (H).

Fonte: Hacker (2012).

### 3.1 TURBINAS HIDRÁULICAS DE AÇÃO

As turbinas hidráulicas de ação têm o princípio de funcionamento baseado na transformação de pressão e energia cinética do fluxo d'água em trabalho mecânico, por intermédio do rotor (sistema rotativo hidromecânico). (SOUZA; FUNCHS; SANTOS, 1983, p.133).

A água pressurizada transfere energia de pressão no injetor, não ocorrendo transformação de pressão nas pás do rotor, sendo a energia cinética da água a responsável pelo trabalho. (COSTA, 2012)

As principais turbinas de reação são:

- Turbinas Pelton;
- Turbinas Michell Banki.

### 3.1.1 Turbinas Pelton

Seu princípio de funcionamento é baseado na transformação da energia potencial da queda em energia cinética no jato injetor, após isto a energia cinética é convertida em mecânica no rotor da turbina. Esta turbina é utilizada para quedas entre 100m a 500m e potências de 500 a 12.500kW nos casos das PCHs (ELETROBRÁS, 2012).

Segundo Sousa (2012, p.7), conforme a figura 7, as turbinas Pelton são compostas por:

- Rotor, o qual possui pás ou conchas que servem para absorver a energia cinética proveniente do jato de água que sai do bocal;
- Conduto forçado para alimentar um ou mais jatos de água;
- Bocal que converte a pressão d'água em velocidade, sendo constituído por uma agulha móvel que funciona como reguladora da vazão;

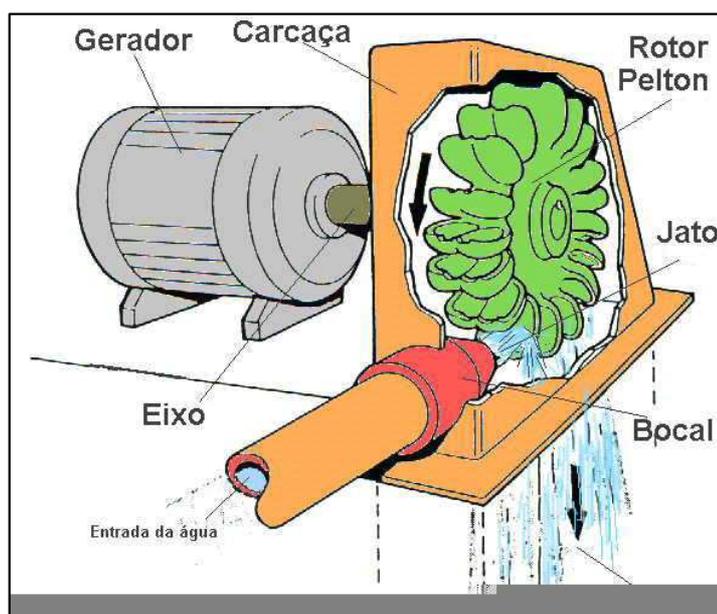


Figura 7 – Turbina Pelton Horizontal com um jato.

Fonte: Sousa (2012, p.6).

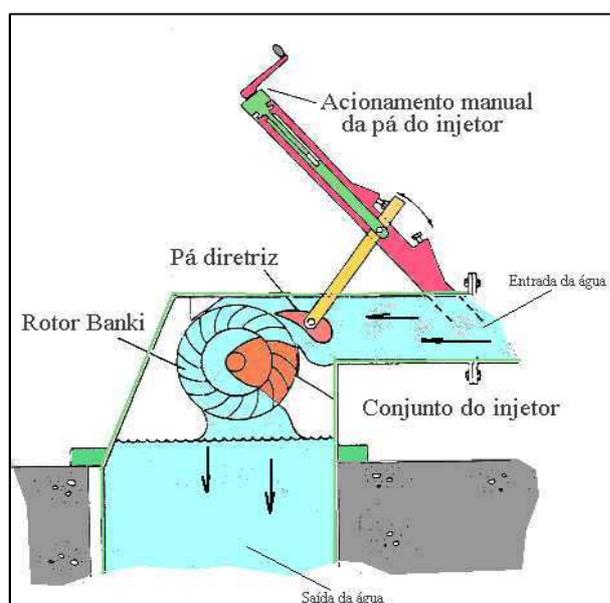
Elas podem ser divididas em eixo vertical, caracterizada por possuir três a seis jatos e eixo horizontal, caracterizada por possuir um a dois jatos. (SOUZA; FUNCHS; SANTOS, 1983)

### 3.1.2 Turbinas Michell Banki

É uma turbina conhecida como turbina fluxo cruzado, possui sempre o eixo na horizontal e é utilizada para quedas entre 3m a 100m e potências de no máximo 2MW. (SOUZA; FUNCHS; SANTOS, 1983, p.133)

Conforme Figura 8, seu princípio de funcionamento é

a admissão se efetua primeiramente por um aparato que dirige a água até o rotor, o qual é construído em forma de tambor; a água circula pelas pás, sai delas com uma certa velocidade e atravessa o interior do rotor, passando novamente nas pás opostas e efetuando um novo trabalho. (MELLO JÚNIOR, 2000)



**Figura 8 – Esquema funcionamento turbina Michell Banki.**

**Fonte: Sousa (2012, p.8).**

## 3.2 TURBINAS HIDRÁULICAS DE REAÇÃO

As turbinas hidráulicas de reação têm o princípio de funcionamento baseado na transformação somente da energia cinética do fluxo d'água em trabalho mecânico, por intermédio do rotor (sistema rotativo hidromecânico). (SOUZA; FUNCHS; SANTOS, 1983, p.133).

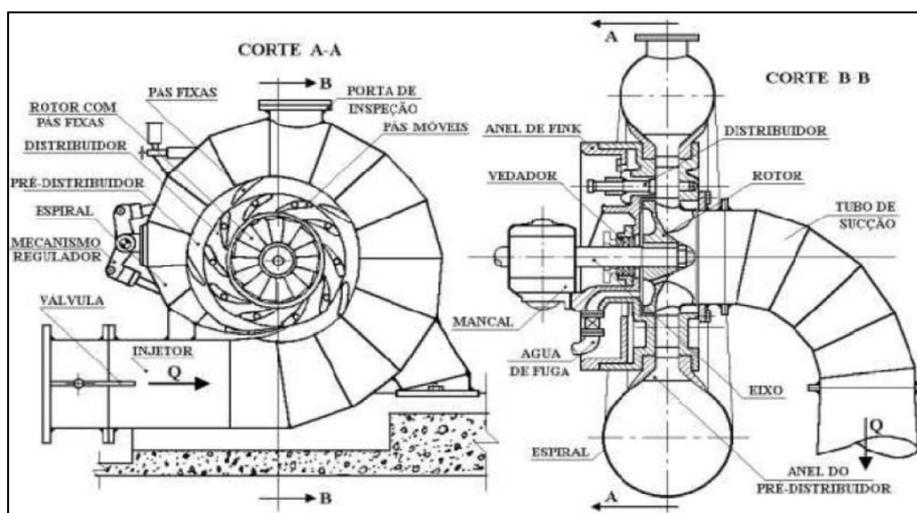
A água pressurizada entra no rotor, preenchendo todo o espaço que ele ocupa, e transfere energia cinética e de pressão às pás do rotor. (COSTA, 2012)

As principais turbinas de reação são:

- Turbinas Francis;
- Turbinas Hélice e Kaplan;
- Turbinas Bulbo;
- Turbinas tipo “S”;
- Turbinas Straflo.

### 3.2.1 Turbinas Francis

A água pressurizada entra através do injetor em um tubo em forma de espiral que cerca as pás móveis e passa por pás fixas na direção radial para dentro da turbina. O rotor é acionado pela água que exerce pressão nas pás móveis. Conforme a Figura 9, as aletas-guia móveis formam o sistema distribuidor que controla, através da posição, a velocidade da turbina. (COSTA, 2012)



**Figura 9 – Turbina Francis de eixo horizontal e caixa espiral.**

**Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI (2012, p.315).**

As turbinas Francis podem ser do tipo horizontal, que são apoiadas em mancais de deslizamentos radiais, ou vertical, que possui mancais guias de escora radial. Ainda, segundo a Eletrobrás (2012), podem ser classifica-las em:

- Turbina Francis Espiral – É caracteriza por possuir uma caixa espiral a montante do conduto forçado. Dentro da caixa estão as pás do distribuidor. É utilizada para quedas entre 15 a 250m e potências entre 500 kW a 15 MW.
- Turbina Francis Caixa Aberta – É construída sem um conduto forçado e caixa espiral e possui o conduto de sucção, o distribuidor e o rotor ligados diretamente com o tubo de sucção d'água. É utilizada para quedas de até 10m e potências entre 500 kW a 1,8 MW.

O rotor, dependendo da rotação específica assumida pode ser classificado como do tipo lento, normal ou rápido.

### 3.2.2 Turbinas Hélice e Kaplan

A geometria da turbina é semelhante a Francis, porém o rotor da Hélice e Kaplan são compostos por um cubo com pás, conforme Figura 10, e

estas pás podem ser fixadas rigidamente ao cubo, recebendo o rotor axial resultante a denominação de rotor Hélice [...]. No caso de as pás terem movimento em relação ao cubo, o rotor denomina-se Kaplan. (SILVA; MADRUGA; GUEDE, 2009, p.1)

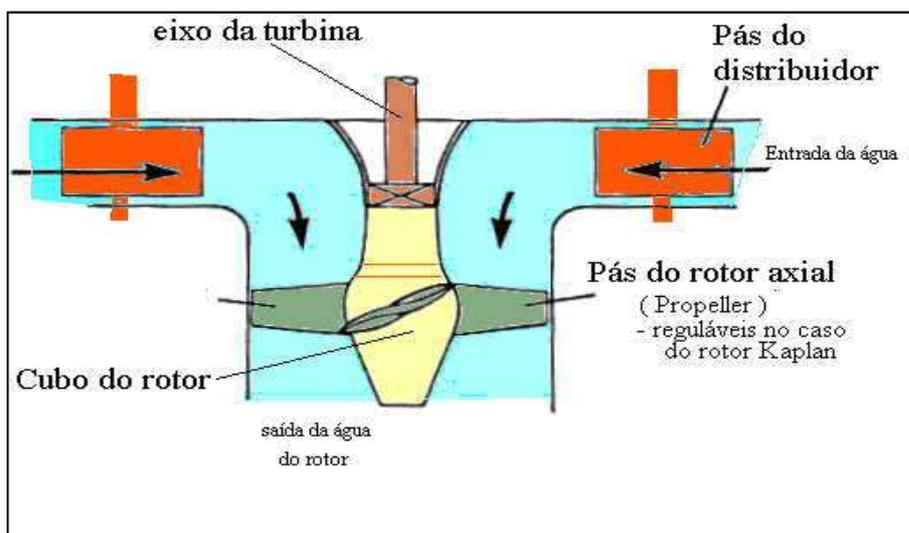


**Figura 10 – Rotor Turbina Hélice e Kaplan.**

**Fonte: HACKER (2012).**

É uma turbina classificada como de reação, na qual o fluxo d'água tem direção radial no distribuidor, aproximadamente axial na entrada do rotor, porém para a turbina Kaplan as pás têm passo regulável, podendo ser ajustada em pleno funcionamento, e na turbina Hélice as pás são fixas. Conforme Figura 11, no caso das turbinas Kaplan o mecanismo que permite variar o ângulo de inclinação das pás

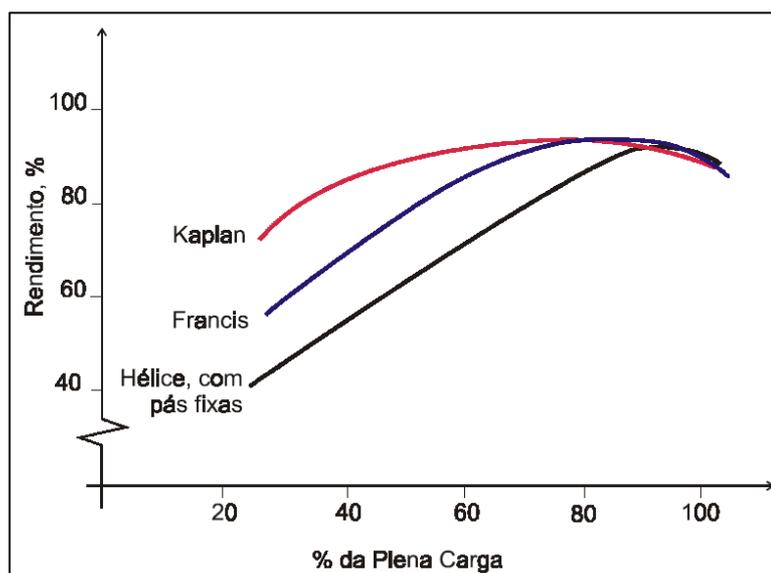
conforme a vazão, sem variação apreciável do rendimento, fica alojado numa peça com formato de ogiva e seu comando é realizado pelo regulador automático de velocidade. Esta máquina exige alta tecnologia para a sua fabricação e é indicada para baixas quedas e grandes vazões. (JUSTINO, 2006).



**Figura 11 – Esquemática do funcionamento de uma Turbina Hélice e Kaplan.**

**Fonte: Sousa (2012, p.10).**

As turbinas normalmente possuem o eixo vertical, mas podem ser do tipo horizontal. Nas turbinas Kaplan a possibilidade de variação das pás possibilita um rendimento melhor com menos carga que comparado com outras turbinas, como pode ser verificado na Figura 12.



**Figura 12 – Comparação Rendimento X % Plena Carga das Turbinas Kaplan, Francis e Hélice.**

**Fonte: Costa (2012, p.6).**

### 3.2.3 Turbinas Bulbo

É uma versão compacta da turbina Kaplan. Conforme Figura 13, o gerador é conectado diretamente no eixo do rotor e posicionado na mesma linha da turbina quase na posição horizontal e é envolvido por um bulbo que o protege da água que passa ao seu redor antes de alcançar as pás da turbina. É utilizada normalmente em baixas quedas e para PCHs a fio d'água. (SOUSA, 2012)

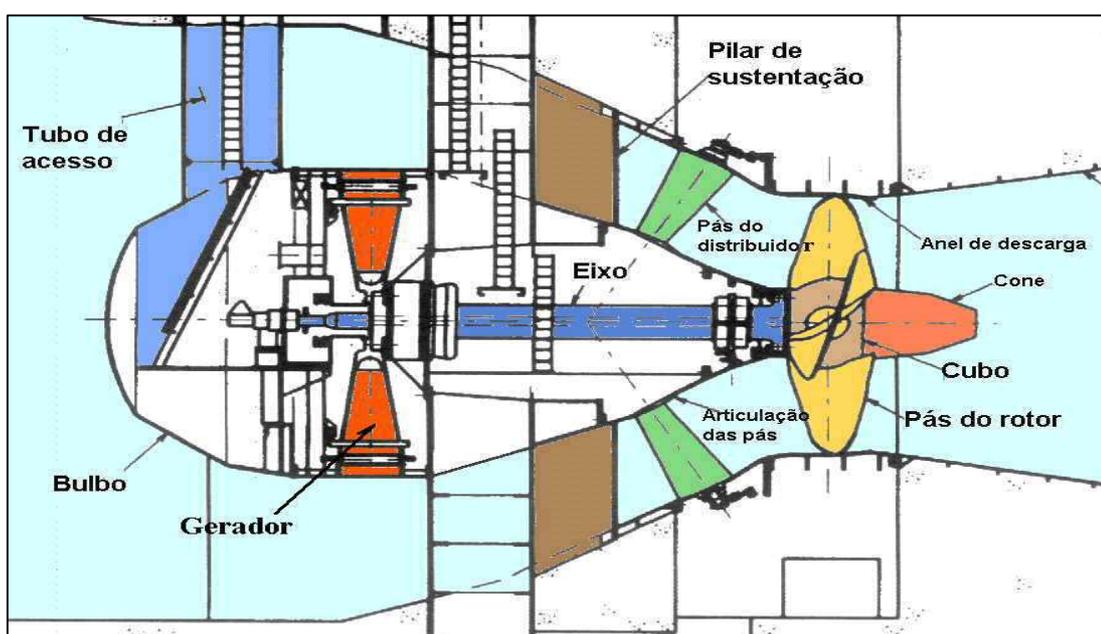
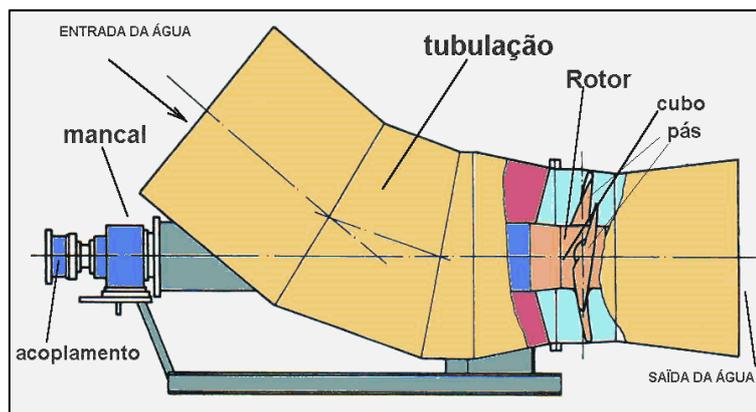


Figura 13 – Esquemático do funcionamento de uma Turbina Bulbo.

Fonte: Sousa (2012, p.14).

### 3.2.4 Turbinas Tipo “S”

É conhecida como turbina tipo “S” por possuir a tubulação de entrada de água em forma de “S”, podendo ser colocada na posição de eixo inclinado ou horizontal. Conforme Figura 14, é construída com o eixo entre o gerador e rotor ligado em contato com o fluxo de água. É utilizada normalmente em baixas quedas, entre 5 a 25m. (ELETROBRÁS, 2012)



**Figura 14 – Esquemático do funcionamento de uma Turbina tipo “S”.**

**Fonte: Sousa (2012, p.13).**

Segundo Sousa (2012, p.13), a turbina tipo “S” pode ser dividida em função da altura de queda e vazão em quatro tipos:

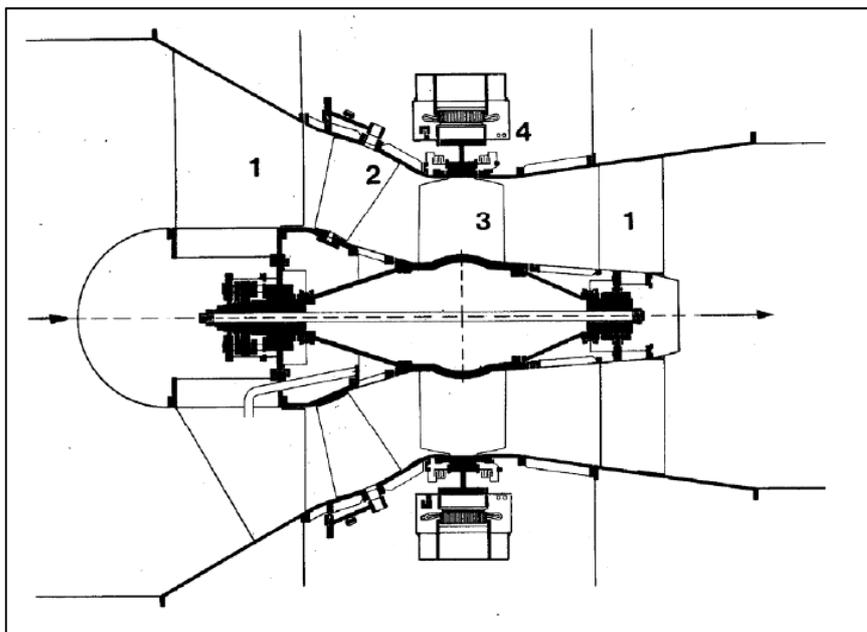
- Rotor de pás fixas e distribuidor móvel;
- Rotor de pás fixas e distribuidor fixo;
- Rotor de pás móveis e distribuidor móvel;
- Rotor de pás móveis e distribuidor fixo.

### 3.2.5 Turbinas Straflo

O termo Straflo é derivado do inglês, “*straight flow*”, que significa escoamento retilíneo. Segundo Cordeiro (2012, p.89)

[...] as trajetórias das partículas líquidas são hélices cilíndricas, que em projeção meridiana são retas paralelas ao eixo. Neste tipo de turbina o indutor do alternador é colocado na periferia do rotor da turbina formando um anel articulado nas pontas das pás da hélice, as quais podem ser de passo variável, análogas às das turbinas Kaplan. Por esta razão é também denominada turbina geradora de anel ou periférica.

A Figura 15 mostra o corte longitudinal da turbina Straflo, onde o alternador é colocado na periferia do rotor da turbina. A turbina pode ser fabricada com eixo horizontal ou inclinada e é utilizada para baixa quedas, entre 3 e 40m. (CORDEIRO, 2012)



**Figura 15 – Corte longitudinal da Turbina Straflo, eixo horizontal. Componentes: (1) pás diretrizes fixas, (2) pás diretrizes móveis do distribuidor, (3) pás fixas do rotor e (4) gerador.**

Fonte: Macintyre (1983, p.266).

### 3.3 OPERAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

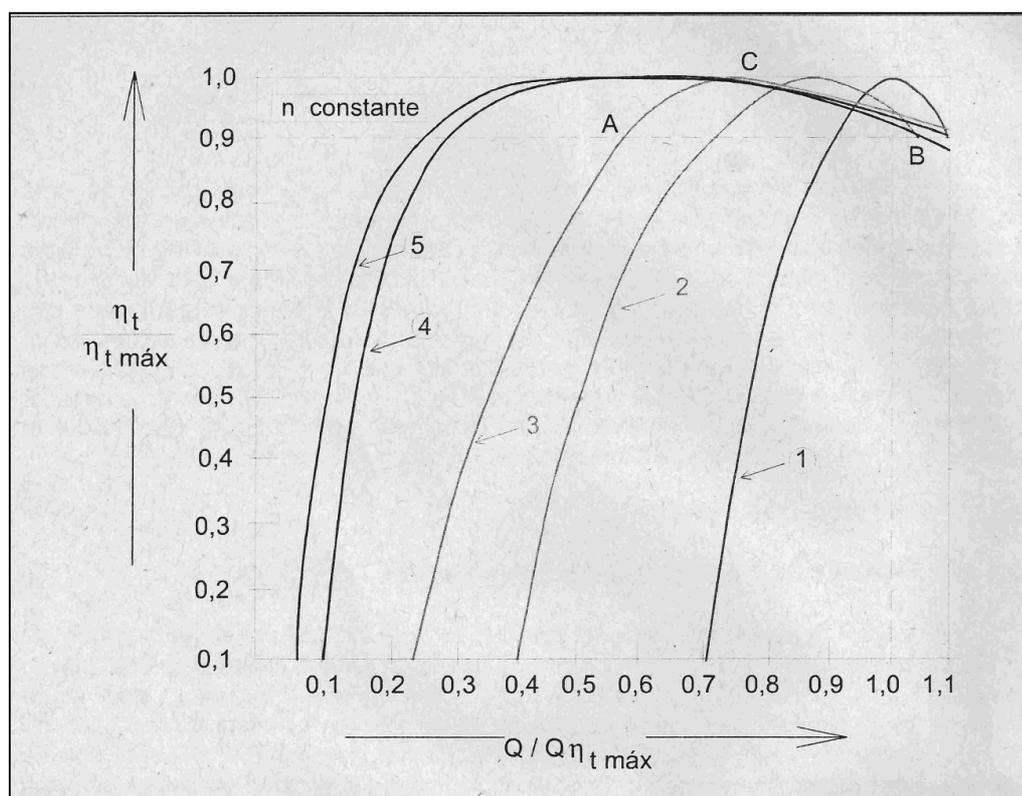
A geração de energia elétrica em centrais hidrelétricas é realizada à rotação constante em função da frequência fixa (60Hz) do sistema interligado brasileiro. Para suprir a demanda da energia com uma rotação constante, as turbinas hidráulicas variam a potência de eixo através do controle da vazão. O sistema de variação de vazão, bem como o comportamento da máquina hidráulica é diferente para cada tipo de turbina. Na rotação constante, sem cavitação a turbina tem uma queda líquida e uma vazão em que opera com seu rendimento máximo. Com a variação desses valores de vazão e queda líquida a turbina opera com rendimentos mais baixos podendo ter cavitação, vibração e outros problemas que acarretem no desgaste da máquina (VIANA, 2010).

#### 3.3.1 Rendimento da Turbina em Função da Vazão

Na Figura 16 apresenta-se o rendimento total de vários tipos de turbinas relativo ao rendimento máximo ( $\eta_t / \eta_{tm\acute{a}x}$ ) em função da vazão da turbina relativa a

vazão para o rendimento máximo ( $Q/Q_{\eta_{t\text{máx}}}$ ), operando na rotação constante e igual a ( $n_0$ ), para a altura constante ( $H_0$ ). No caso das turbinas Francis, o rotor lento funciona em uma faixa maior de vazão em relação ao rápido, com pequena queda de rendimento.

Entretanto, as turbinas Kaplan e Pelton possuem um patamar mais achatado de rendimento, favorecendo uma variação maior de vazão, com diminuição mínima de rendimento (VIANA, 2010).



**Figura 16 – Rendimento das turbinas em função da vazão  $n_0$  e  $H_0$  constantes.**

**Hélice-1, Francis rápida-2, Francis lenta-3, Kaplan-4, Pelton-5.**

**Fonte: Viana (2010).**

### 3.3.2 Rendimento da Turbina em Função da Altura

A Figura 17 mostra o gráfico de rendimento ( $\eta_t$ ) em função da relação ( $H/H_0$ ) para as turbinas Francis lenta e rápida, Pelton, na rotação constante e igual a nominal, onde  $H$  é a altura de queda líquida e  $H_0$  é a altura de queda líquida de rendimento máximo. Nesta figura pode-se ver que a turbina que melhor se comporta em relação ao rendimento é a turbina Hélice, sendo a pior a Francis lenta (VIANA, 2010).

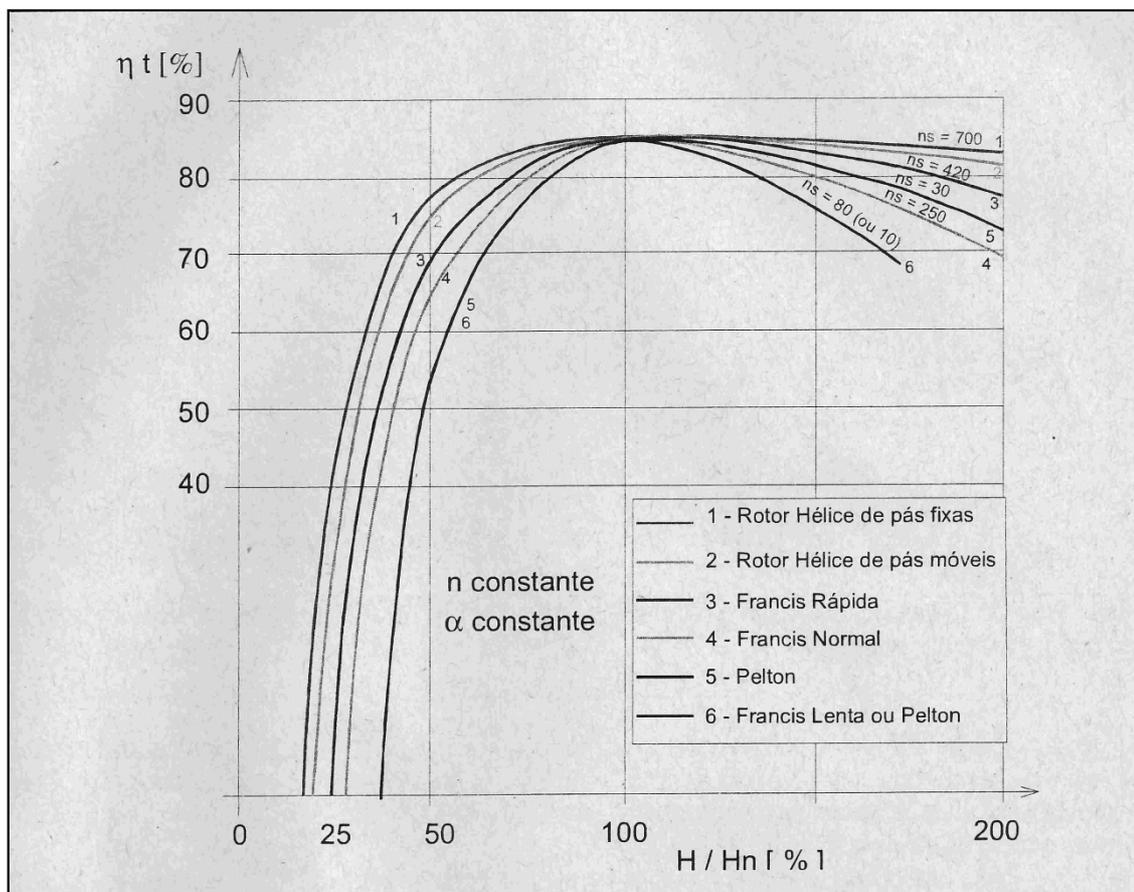


Figura 17 – Curvas de ( $\eta_t$ ) em função de ( $H/H_n$ ) para turbinas.

Fonte: Viana (2010).

### 3.3.3 Limites de Operação das Turbinas

Cada turbina tem um comportamento distinto e seus limites de operação devem ser analisados, uma vez que, se não respeitados, poderá existir diminuição excessiva do rendimento da turbina e desgastes prematuros devidos a anomalias hidráulicas que podem ocorrer.

A Figura 18 mostra os limites de operação de uma turbina Francis normal, onde a parte hachurada, corresponde a pontos de operação isentos de cavitação e vórtices de núcleo na saída do rotor. Na faixa sobre a linha **a** estará ocorrendo deslocamento da água na entrada das pás do rotor no lado de sucção, onde ocorre a cavitação. A linha **b**, região de aparecimento de trança na sucção da turbina, enquanto a linha **c** há deslocamento na entrada de pás do rotor no lado da pressão. Estes tipos de cavitação citados acima são diferentes de cavitação superficial, que

ocorre quando a pressão da água atinge a pressão de vaporização, e pode ser controlada pela altura geométrica de sucção (VIANA, 2010).

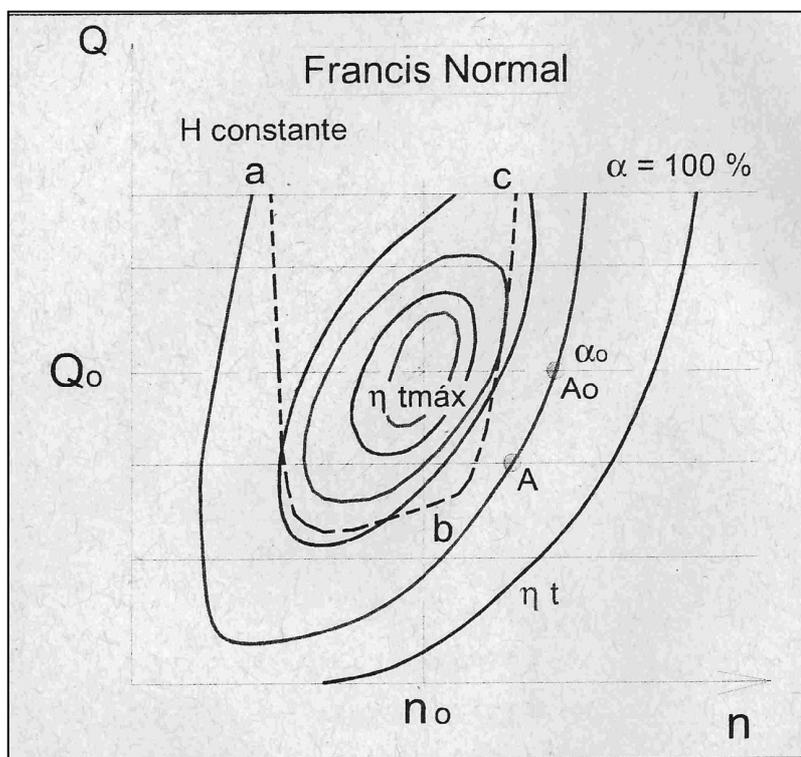


Figura 18 – Limites de operação de uma turbina Francis Normal.  
Fonte: Viana (2010).

#### 4 ENSAIOS E METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS

Nos capítulos 2 e 3 foram apresentadas as variáveis que influenciam nas perdas envolvidas no processo de transformação da energia e quais os parâmetros necessários para otimizar a operação energética, além dos tipos de turbinas e suas faixas de operação e rendimento.

Como apresentando, cada tipo de turbina é melhor indicada para cada tipo de projeto, no entanto, após definida a turbina, deve-se operá-la aproveitando seu melhor rendimento de modo a se otimizar o uso da água. Porém, muitas usinas em operação não possuem mais seus dados de projeto ou mesmo, após diversas alterações, desgastes e recuperações sofridas ao longo dos anos, tiveram alterados seus projetos, dificultando a obtenção de parâmetros para auxiliar no melhor aproveitamento dos recursos físicos.

Com isto, para permitir a otimização da geração das PCHs que já se encontram em operação, e que possuem dados confiáveis de projeto, é necessário fazer ensaios para encontrar esse ponto.

#### 4.1 ENSAIOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS

No projeto de uma turbina hidráulica, o fabricante, deve fornecer os valores de altura e vazão, com o máximo rendimento possível. Porém a máquina trabalhará dentro de outras faixas de valores com rendimento variável.

O objetivo dos ensaios é estudar o comportamento da turbina hidráulica trabalhando em diversas condições de funcionamento.

##### 4.1.1 Normas para Ensaio de Turbinas

Existem três normas para ensaios de campo de turbinas hidráulicas:

- CEI / IEC 60041 (1991): *“Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pumpturbines”*;
- ABNT NBR 11.374 / NB 228 (1990): “Turbinas Hidráulicas – Ensaio de Campo”;
- ASME PTC 18 (1992) – *“Performance Test Codes - Hydraulic Turbines”*;

Apesar do mesmo objetivo as normas diferem quanto aos métodos de medição, tolerâncias, etc.

##### 4.1.2 Finalidade dos Ensaio

Os ensaios podem ser realizados para diversos fins, podendo ser os seguintes:

###### Ensaio Corrente de Máquinas de Pequena Potência

Este ensaio não exige grande precisão. É o caso dos ensaios feitos visando o controle de qualidade do produto.

### Ensaio de Estudo e Desenvolvimento

Visa a pesquisa para melhoria do projeto. Devem ser realizados com equipamentos de alta precisão, são normalmente realizados nas indústrias e em laboratórios. É feito quase sempre em modelo reduzido.

### Ensaio de Recepção

Visa verificar se as condições da máquina estão dentro das especificadas pelo fabricante. É realizado na frente do cliente para atender cláusulas contratuais. Além disso, podem ser feitos ensaios periódicos para analisar as falhas e os desgastes.

### Ensaio de Formação Profissional

São ensaios com finalidades didáticas e de demonstração na formação profissional, realizados em universidades ou laboratórios conveniados a estas.

### Ensaio Visando Estudo das Condições de Cavitação

Pode fazer parte da recepção da turbina conforme contrato estabelecido. Os ensaios podem ser realizados no banco de ensaios do fabricante, seja em plataformas projetadas especialmente ou no próprio local de funcionamento.

#### 4.1.3 Tipos de Ensaios

Os ensaios quanto ao estado são classificados em dois tipos.

#### Ensaio em Estado de Equilíbrio

As leituras são realizadas dentro de um intervalo de tempo que as grandezas sofram o mínimo de variação possível. Consegue-se uma aproximação do estado de equilíbrio quando a variação das grandezas é menor que a precisão dos equipamentos.

## Ensaio em Estado Transitório

Procura-se analisar os eventos que ocorrem entre os estados de equilíbrio. Esses ensaios são mais difíceis de serem realizados e normalmente são necessários usos de aparelhos de medição com registradores e analisadores.

Como apresentado, os ensaios podem ter diversas finalidades. No presente trabalho busca-se um ensaio para traçar as curvas de rendimento da unidade geradora para encontrar o ponto de maior rendimento, ou seja, o ponto ótimo de operação.

## 4.2 CAMPOS DE FUNCIONAMENTO

### 4.2.1 Campo Básico de Funcionamento das Turbinas

São diagramas que retratam o comportamento de uma turbina bem como o relacionamento de interdependência entre as grandezas que caracterizam seu funcionamento.

Nos ensaios em estado de equilíbrio é fundamental traçar o campo básico de funcionamento, diagrama topográfico ou diagrama de colinas.

O campo citado é a representação plana de várias variáveis, sendo escolhidas duas como básicas e as demais mantidas constantes.

No ensaio de uma turbina hidráulica devem-se fazer leituras de vazão, pressão, rotação e potência efetiva. Assim escolhem-se três variáveis, vazão (Q), altura de queda líquida (H) e rotação (n). Como variáveis derivadas tem-se  $P_h$  e  $\eta_t$ . Escolhem-se duas como sendo básicas e dessas duas, uma será dependente e a outra independente. Escolhe-se normalmente como variável independente n e dependente Q. Sendo assim traça-se o gráfico Q x n com curvas de rendimento constante.

Uma vez feito o ensaio e obtido os diversos valores lidos e calculados plota-se um gráfico Q x n. Ligando-se os pontos correspondentes a cada valor de vazão

obtém-se uma família de curvas  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ . Unindo-se os pontos de mesmo rendimento, aparece a família de curvas  $\eta_{t1}, \eta_{t2}, \dots, \eta_{tn}$ .

A Figura 19 apresenta os diagramas de colina das turbinas convencionais (VIANA, 2010).

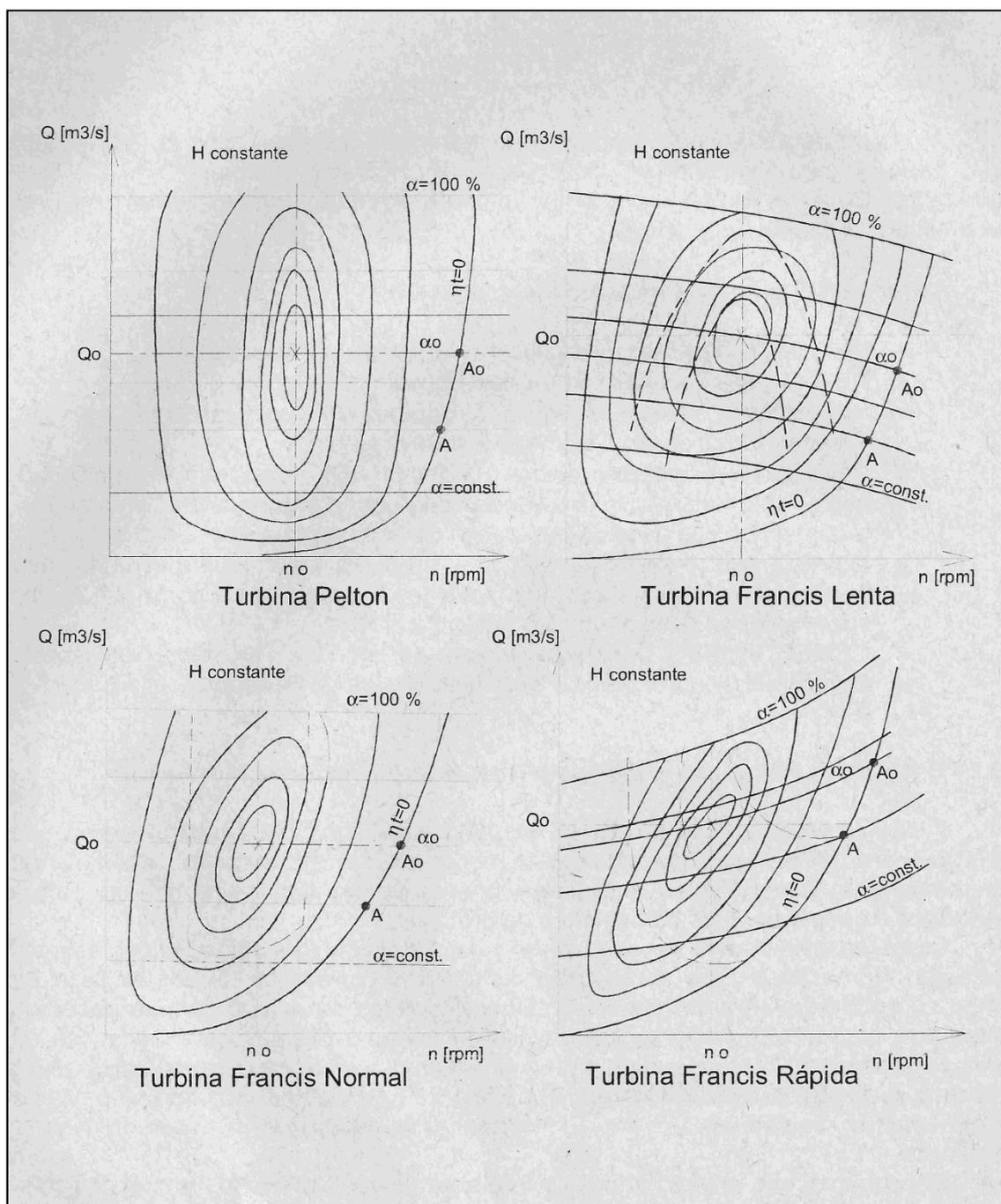


Figura 19 – Diagrama de Colina  $Q \times n$ , com curvas de  $\alpha$  a  $\eta_t$  constantes, para  $H$  constante.  
Fonte: Viana (2010).

### 4.3 MEDIÇÃO DE VAZÃO

Para medição de vazão destacam-se:

- Método de Gibson (Pressão por Tempo);
- Método dos Molinetes;
- Método Ultrassônico;
- Método de Winter-Kennedy;
- Método da Diluição.

#### 4.3.1 Método de Gibson (Pressão por Tempo)

Segundo Justino (2006, p. 67) em 1923, Norman Rothwell Gibson, criou o Método de Gibson usado para a medição de vazão em condutos forçados de seção transversal ou variável, porém não divergente. Ele mede a diferença de pressão que existe entre dois pontos da tubulação através de transdutores permitindo que seja registrado um diagrama pressão por tempo.

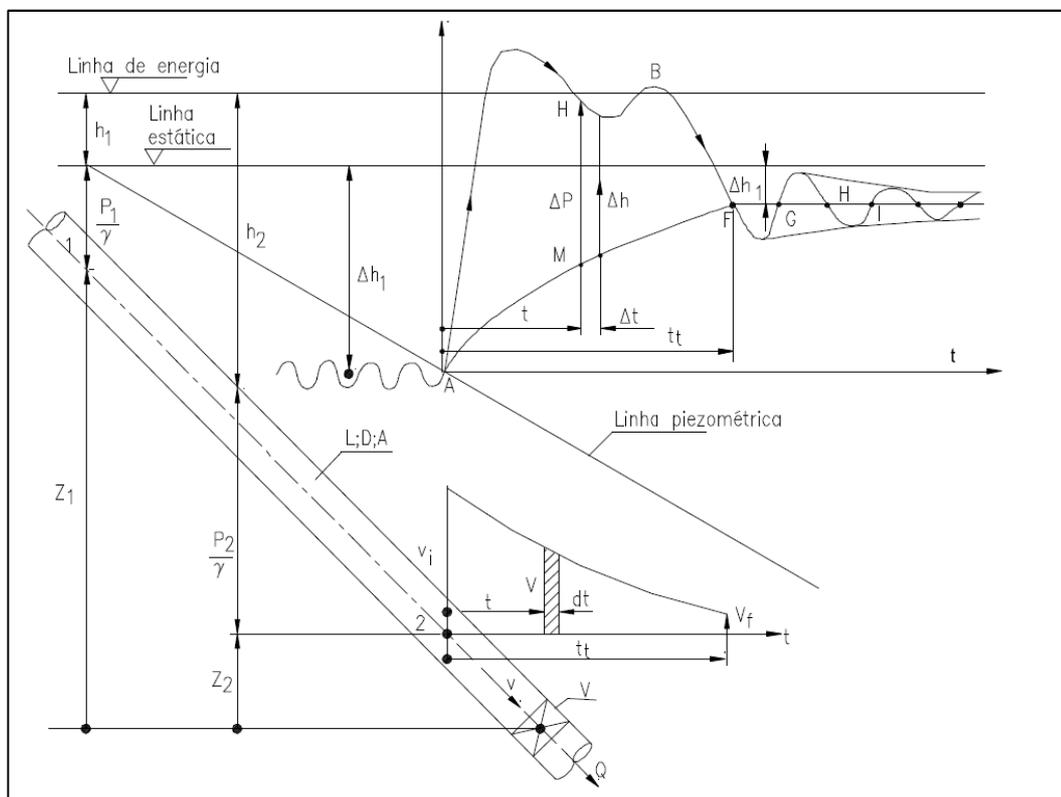
Para equacionar o método devem-se definir algumas variáveis, são elas:

- $V_1$  é a velocidade inicial (m/s)
- $V_2$  é a velocidade final (m/s)
- $\Delta p$  é o aumento de energia (m)
- $A_d$  é a área do diagrama, delimitada pelo segmento (A,B,F) ( $m^2$ )
- $L$  é o comprimento de uma tubulação reta considerando um trecho 1- 2 (m)
- $A$  é a área da seção transversal ( $m^2$ )
- $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
- $D$  é o diâmetro interno (m)
- $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ )
- $V$  é a velocidade média (m/s)
- $q$  é a vazão residual (m/s)

$$v_i - v_f = \frac{g}{L} \cdot \int_0^{t_v} \Delta p \cdot dt = \frac{gA_d}{L} \quad (12)$$

$$Q = \frac{gA_dA}{L} + q \quad (13)$$

Conforme a Figura 20 consideramos uma abertura na válvula V durante um tempo  $t_v$ (s) onde a velocidade decresce de  $V_i$  para  $V_f$  (m/s) ocorrendo assim o Golpe de Ariete, representado pelo aumento de energia  $\Delta p$  (m) entre os pontos 1 e 2 que varia entre os pontos (A,B,F). (JUSTINO, 2006)



**Figura 20 – Medição da vazão através do Método de Gibson**

**Fonte: Justino (2006, p.68).**

Portanto, deverá ser medida a diferença de pressão existente entre os dois pontos da tubulação 1 e 2, que ocorre durante o transitório de desaceleração do fluido. Hoje em dia, esta medição poderá ser feita utilizando um transdutor diferencial de pressão ou dois transdutores de pressão manométrica. Após a aquisição de dados deve-se utilizar um software que irá subtrair os dois sinais.

Algumas características deste método são (ANDRADE, MARTINEZ, FILHO, AGUIRRE, 2010, p.75):

:

- Precisão de mais ou menos 1,5%;
- Facilidade na operação;
- Equipamentos simples a serem instalados (transdutores de pressão);
- Custo para instalação dos instrumentos baixo-médio;

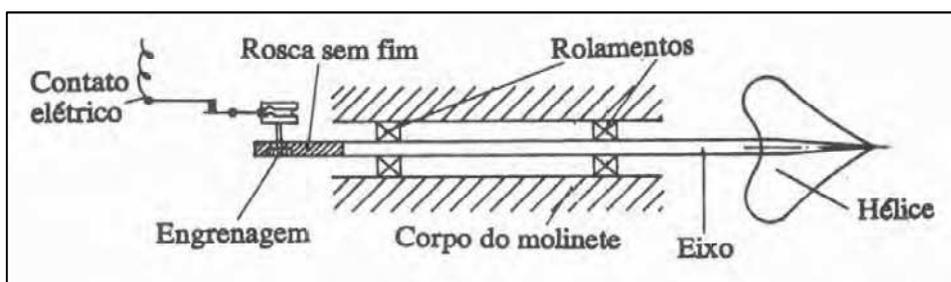
- Diâmetro mínimo de aplicação 3m;
- A operação do sistema deverá ser interrompida, não podendo operar normalmente enquanto durar as medições;
- Realizado para ensaios.

#### 4.3.2 Método dos Molinetes

Segundo a norma NBR 11374/NB-228 este método exige a utilização de molinetes, adequadamente colocados em determinados pontos, para medição da velocidade da água. A disposição e a quantidade deverão ser definidas de tal modo que haja pontos suficientes para determinar com precisão a vazão média na seção transversal.

Conforme a Figura 21 os molinetes hidrométricos são equipamentos compostos por uma hélice e um sistema de “conta-giros”, o qual mede a velocidade do fluxo d’água que passa por ele. Para obter os dados do aparelho deve-se (JUSTINO, 2006):

1. Verificar qual o tempo gasto para a hélice dar um determinado número de rotações;
2. Definir qual a quantidade de voltas que o “conta-giros” deverá dar para enviar um sinal ao operador;
3. Determinar o número de rotações por segundo ( $n$ ) marcando o tempo entre alguns sinais.



**Figura 21 – Corte de um Molinete.**

**Fonte: Justino (2006, p.71).**

Segundo Justino, após coletado os dados, juntamente com a curva de calibração do molinete, deve-se calcular a velocidade longitudinal da corrente líquida.

$$v = a.n + b \quad (14)$$

- $V$  é a do fluxo (m/s)
- $n$  é o numero de rotações da hélice por segundo (rps)
- $a, b$  são as constantes do molinete (retiradas da curva de calibração)

Conforme Figura 22 é possível observar que a vazão é o somatório da multiplicação da velocidade média ( $V_z$ ) com o valor da área da seção ( $A_z$ ) em todos os pontos ( $z$ ).

$$Q = \Sigma A_z \cdot V_z \quad (15)$$

- $Q$  é a vazão (m<sup>3</sup>/s)
- $A_z$  é a área de seção no ponto (m<sup>2</sup>)
- $V_z$  é a velocidade medida no ponto (m/s)

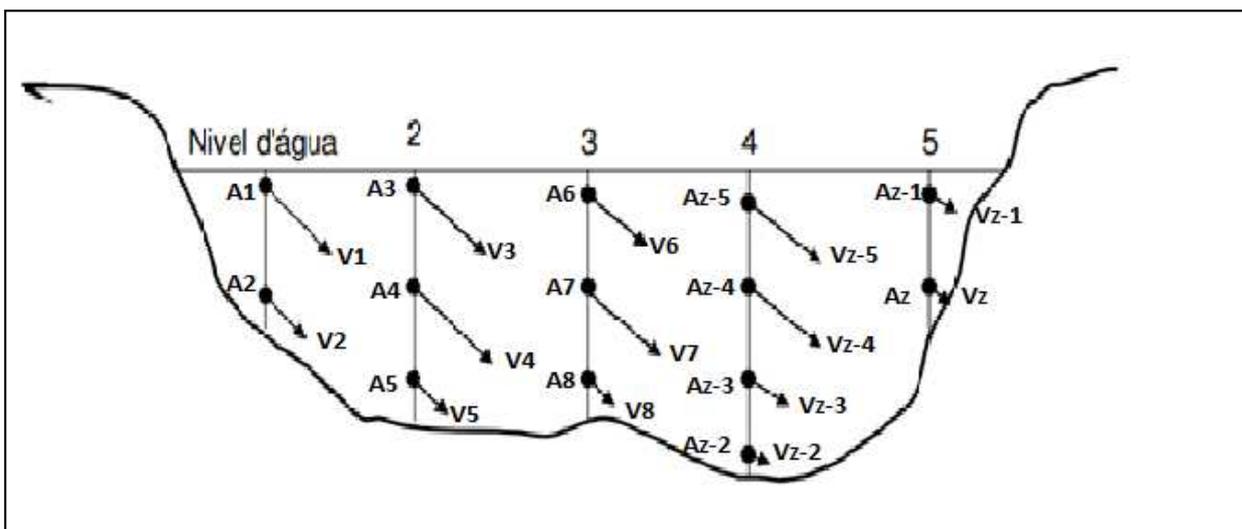


Figura 22 – Seção transversal com representação da velocidades nos pontos.

Fonte: Corrêa (2010, p.02).

A distância recomendada entre cada seção vertical pode ser verificada pela Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Distância recomendada entre cada seção vertical.

Largura do rio (m)	Distância entre as seções verticais (m)
<3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1,0
15 a 30	2,0
30 a 50	3,0
50 a 80	4,0
80 a 150	6,0
150 a 250	8,0
>250	12,0

Fonte: Corrêa (2010, p.02).

Segundo Corrêa o número e a profundidade recomendada em cada seção vertical de acordo com a profundidade do rio podem ser verificados na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Número e profundidade recomendada em cada seção vertical de acordo com a profundidade do rio.

Profundidade (m)	Número de Pontos	Profundidade dos Pontos
0,15 a 0,60	1	0,6p
0,61 a 1,20	2	0,2p e 0,8p
1,21 a 2,00	3	0,2p; 0,6p e 0,8p
2,01 a 4,00	4	0,2p; 0,4p; 0,6p e 0,8p
>4,01	6	S; 0,2p; 0,4p; 0,6p; 0,8p e F

Fonte: Corrêa (2010, p.03).

Considerando as seguintes variáveis:

- $S$  é a superfície do canal (mm)
- $F$  é o fundo do canal (m)
- $p$  é a profundidade do canal (m)

A norma NBR 11374/NB-228 estabelece que os molinetes utilizados são de sinalização elétrica e escoamento axial. O molinete poderá ser instalado em canais abertos, em condutos forçados de seção circular ou em tomadas d'água de turbinas.

#### 4.1.2.1 Instalação do Molinete em canal aberto

Os aparelhos serão instalados com seu eixo paralelo ao eixo do conduto forçado ou canal. A largura mínima do canal deverá ser de 0,8m ou oito vezes o diâmetro da hélice do molinete instalado. A distância do eixo do molinete mais próximo à parede ou do fundo do canal não poderá exceder 0,2m e deverá ser no mínimo 0,75 vezes o diâmetro da hélice do molinete. Para a verificação da quantidade de aparelhos a serem instalados usamos a seguinte fórmula:

$$24.\sqrt[3]{A} < z < 36.\sqrt[3]{A} \quad (16)$$

- $A$  é a área da seção transversal ( $m^2$ )
- $z$  é o número mínimo e máximo de molinetes

#### 4.1.2.2 Instalação do Molinete em condutos forçados de seção circular

Este método é usado em condutos forçados de seção circular que apresentam diâmetro interno superior a 1,2m. Para instalação do molinete em cruzeta fixa o diâmetro do conduto deverá ser maior que 1,4m ou quatorze vezes o diâmetro da hélice do aparelho instalado. Para a verificação da quantidade de aparelhos a serem instalados na cruzeta usamos a seguinte fórmula:

$$4.\sqrt{R} < z < 5.\sqrt{R} \quad (17)$$

- $R$  é raio interno do conduto (m)
- $z$  é o número mínimo e máximo de molinetes, para cada braço da cruzeta

#### 4.1.2.3 Instalação do Molinete na tomadas d'água da turbina

Método usado em usinas que apresentam baixa queda, onde a medida pode ser feita na tomada d'água da turbina. Para a correta medição é necessário estabilidade no escoamento, a variação no nível da água no processo de medição não poderá variar mais que 1% do nível médio. Para tomadas d'água com grandes seções de entrada podem ser feitas medições simultâneas, segundo um plano horizontal ou vertical, reduzindo o tempo de duração do ensaio.

Algumas características deste método são (ANDRADE, MARTINEZ, FILHO, AGUIRRE, 2010, p.75):

- Precisão de mais ou menos 5%;
- Equipamentos complexos a serem instalados (suportes para os molinetes);
- Custo para instalação dos instrumentos alto;
- Diâmetro mínimo de aplicação 1,2m;
- Poderá exigir uma parada longa da máquina dependendo de onde será instalado o instrumento para medição;
- Mais indicado para somente ensaios e não medição contínua.

#### 4.3.3 Método Ultrassônico

O método ultrassônico funciona usando o princípio de propagação das ondas sonoras nos meios com uma frequência entre 150kHz e 5MHz. O instrumento de medição funciona calculando a velocidade média e usando o princípio de conservação de massa, a vazão. O instrumento a ser estudado baseia-se no princípio de funcionamento de Tempo de Trânsito.

Segundo Justino (2006, p. 77), “Os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito baseiam-se na medição dos tempos que ondas acústicas são emitidas simultaneamente no sentido do escoamento e contra o mesmo”. Conforme Figura 23, o valor da vazão é obtido pela diferença de tempo de trânsito da onda ultrassônica no sentido de jusante e no sentido de montante.

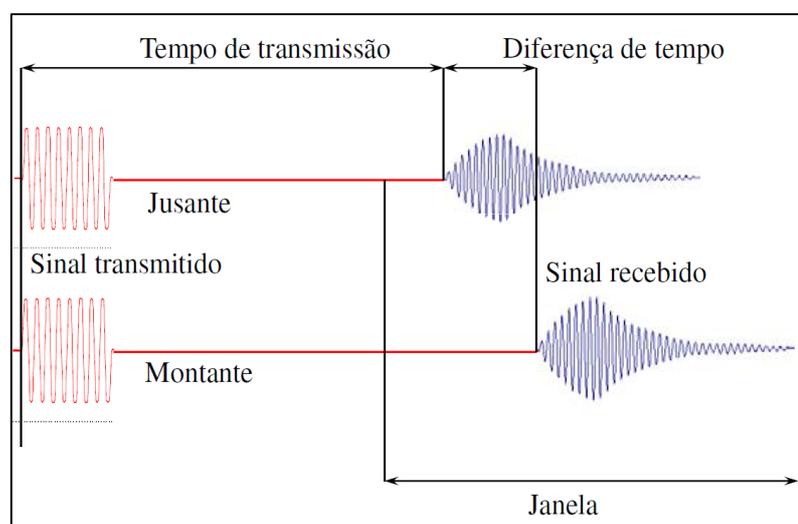


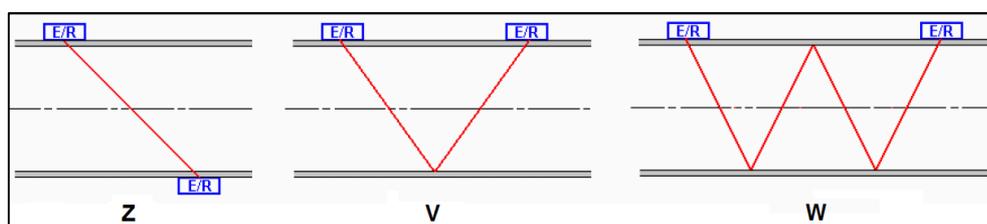
Figura 23 – Diferença de tempo no medidor ultrassônico.

Fonte: Forghieri (2009, p. 38).

Ainda podem-se classificar os instrumentos em dois tipos:

- O medidor de vazão ultrassônico não intrusivo, onde o sistema emissor/receptor é colocado externamente ao tubo (instalação móvel);
- O medidor de vazão ultrassônico intrusivo, onde o sistema emissor/receptor é colocado internamente ao tubo (instalação fixa);

A medição do sinal poderá ser feita dependendo da escolha do trajeto da onda ultrassônica que passa dentro da tubulação, conforme observado na Figura 24, podendo ser classificadas em três tipos: “Z”, “V” e “W”. Sendo que o E/R se refere ao emissor/receptor.



**Figura 24 – Tipos de medições dos medidores de vazão ultrassônicos.**

**Fonte: Justino (2006, p.79).**

A escolha do tipo de medição depende da tubulação e pretende mensurar tempos maiores que o de amostragem do instrumento. Se a tubulação for de diâmetro pequeno é recomendado usar as configuração “V” e “W”, pois assim irá aumentar o caminho de propagação. Já em tubulações com diâmetros maiores recomenda-se o uso da configuração “Z”, pois já existe um caminho longo o suficiente para a medição. (JUSTINO, 2006)

Algumas características deste método são (ANDRADE, MARTINEZ, FILHO, AGUIRRE, 2010, p.76):

- Excelente precisão de aproximadamente 0,5%;
- Custo dos instrumentos e a instalação destes é baixo;
- Necessita de mão-de-obra especializada para instalação e operação;
- Uso em tubulações de grandes diâmetros;
- Quando instalado não interfere no processo;
- Utilização tanto para ensaios como para medições permanentes.

#### 4.3.4 Método de Winter-Kennedy

Este método é usado para medição da vazão na turbina hidráulica, seu princípio de funcionamento é “equacionar a vazão e a diferença de pressão estática entre duas tomadas de pressão localizadas no raio interno da caixa espiral, próximo ao rotor da turbina, e no raio externo da caixa espiral, longe do rotor”. (JUSTINO, 2006)

Pode-se observar a localização das tomadas de pressão em turbinas com caixa espiral conforme Figura 25 a seguir:

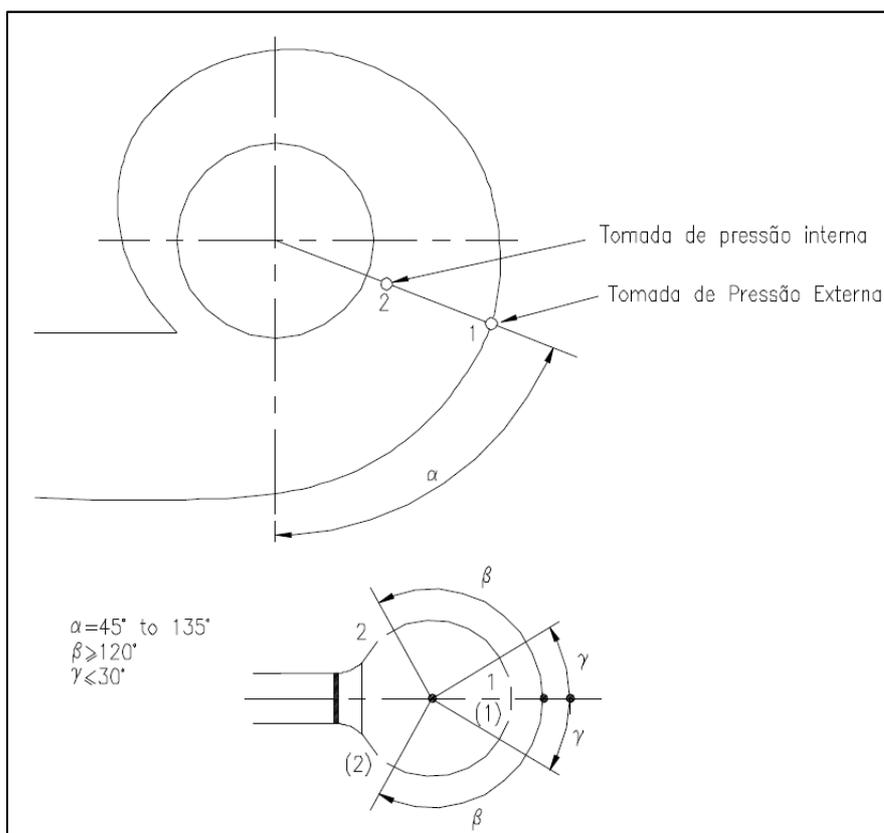


Figura 25 – Localização das tomadas de pressão em turbinas com caixa espiral

Fonte: Justino (2006, p.80).

A equação do método é:

$$Q = C \cdot \Delta p^n \quad (18)$$

- $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ )
- $\Delta p$  é a diferença de pressão entre os pontos de Winter-Kennedy ( $Pa$ )
- $C$  é a constante obtida de Winter-Kennedy ( $ms^{-1} \cdot Pa^{-n}$ )
- $n$  é o expoente obtido durante a calibração do método (Valores próximo ou iguais a 0,5)

Este método exige a construção de um modelo reduzido para ser feito um ensaio que serve para obter o valor da constante C, que faz uma relação entre a diferença de pressão entre dois pontos e a vazão.

Algumas características deste método são (ANDRADE, MARTINEZ, FILHO, AGUIRRE, 2010, p.74):

- Precisão de aproximadamente 1,2%;
- Principal dificuldade é a necessidade de construção de um modelo reduzido, sendo assim, recomendado para novos projetos;
- Existindo um modelo reduzido, o custo dos instrumentos de tomada de pressão e a instalação destes é baixo;
- Operação fácil;
- Uso em tubulações de qualquer diâmetro;
- Quando instalado não interfere no processo;
- Utilização usualmente para medições permanentes.

#### 4.3.5 Método da Diluição

Segundo a NBR 11374/NB-228 este método é utilizado para canais ou condutos longos. Uma solução concentrada de produto químico deve ser colocada, a uma vazão conhecida e constante, continuamente no escoamento principal de água e posteriormente é determinada a concentração deste produto à jusante do ponto onde ele foi colocado. A leitura da nova concentração do produto deverá ser feita a uma distância suficiente para que haja uma mistura homogênea do produto com a água. Sendo assim, a vazão pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$Q = q \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \quad (19)$$

- $Q$  é a vazão a ser medida ( $m^3/s$ )
- $q$  é a vazão da solução concentrada ( $m^3/s$ )
- $C_0$  é a concentração do produto na água natural ( $mg/l$ )
- $C_1$  é a concentração do produto na solução injetada na água ( $mg/l$ )
- $C_2$  é a concentração do produto na mistura resultante ( $mg/l$ )

Devem ser recolhidas, continuamente, amostras em no mínimo cinco pontos pelo período de cinco minutos. Após a coleta de dados deve-se montar uma curva

da concentração das amostras colhidas depois do ponto de injeção do produto, onde no eixo das abscissas coloca-se o tempo e no eixo das ordenadas o valor das ordenadas. A solução deverá ser, preferencialmente, não tóxica, quimicamente estável, não estar contida na água natural e estar homogênea no produto. Ainda, recomenda-se que no preparo do produto químico seja utilizado as seguintes dosagens e substâncias:

- Bicromato de sódio - 2(mg/L)
- Cloreto de sódio – 0,2(mg/L)
- Solução – concentração livre (mg/L)

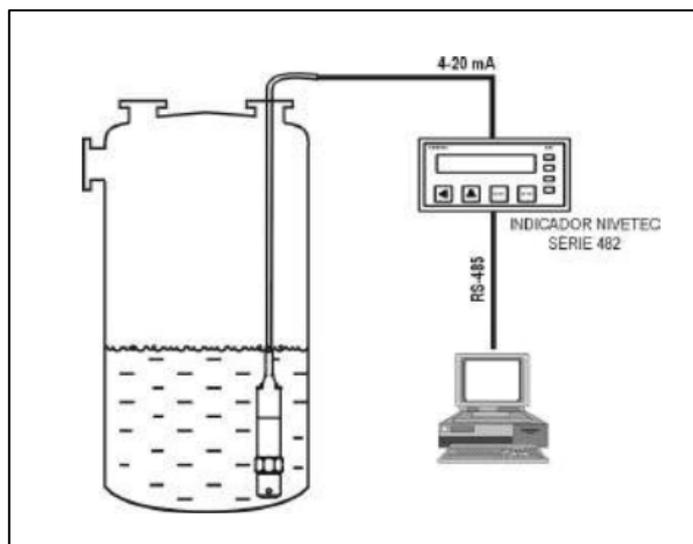
#### 4.4 MEDIÇÃO DO NÍVEL A JUSANTE E A MONTANTE

Para determinar o valor de altura de queda bruta devem-se verificar qual o nível de montante e jusante. Para isso pode-se utilizar o medidor de nível, o qual substitui o uso de limnímetros.

O medidor de nível pode ser classificado de duas formas: Medidor de Nível Hidrostático e Medidor de Nível Ultrassônico. A seguir serão mostrados seus princípios de funcionamento e suas aplicações.

##### 4.4.1 Método de Nível Hidrostático

Segundo Silva (2010, p.42), o princípio de funcionamento deste instrumento se baseia na medição da diferença de pressão entre a coluna d'água e a pressão atmosférica e posteriormente esta diferença é convertida em um sinal elétrico (4-20mA), proporcional ao nível do reservatório. O cabo do sensor é composto por um tubo que compensa a pressão do ambiente, chamado de tubo de respiro. Possui as características de ser um instrumento de baixo custo de instalação e fácil operação. Sua principal aplicação é para medição de níveis em reservatório e poderá ser utilizado para medição do nível do reservatório da PCH. Sua instalação pode ser feita conforme Figura 26.

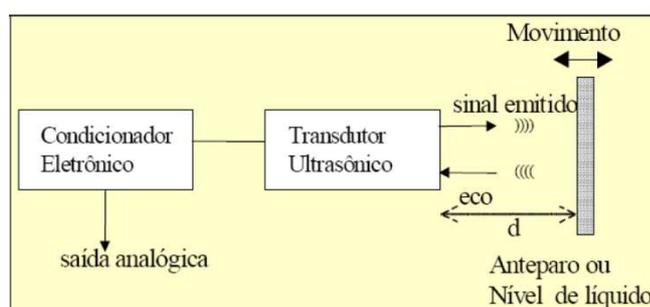


**Figura 26 – Instalação do Medidor de Nível Hidrostático**  
**Fonte: Silva (2010, p.44).**

#### 4.4.2 Método de Nível Ultrassônico

O medidor é baseado no princípio de ultrassom, fazendo a medição do nível sem a existência de contato do sensor com o líquido. Conforme a Figura 27 pode-se observar como ele funciona e seu princípio de funcionamento é utilizar

um circuito eletrônico que fornece um trem de pulsos para excitar um transdutor piezo elétrico o qual gera uma frente de onda de pressão acústica que se propaga no ar até atingir um anteparo plano ou a parte superior do fluido. Parte da energia acústica retorna para o transdutor em forma de um eco após um certo intervalo de tempo. Medindo-se este intervalo de tempo e conhecendo a velocidade do som no ar pode-se calcular a distância entre o transdutor e o anteparo. (SILVA; MADRUGA; GUEDE, 2009, p.1)



**Figura 27 – Medição pelo Método Ultrassônico.**  
**Fonte: SILVA; MADRUGA; GUEDE (2009, p.2).**

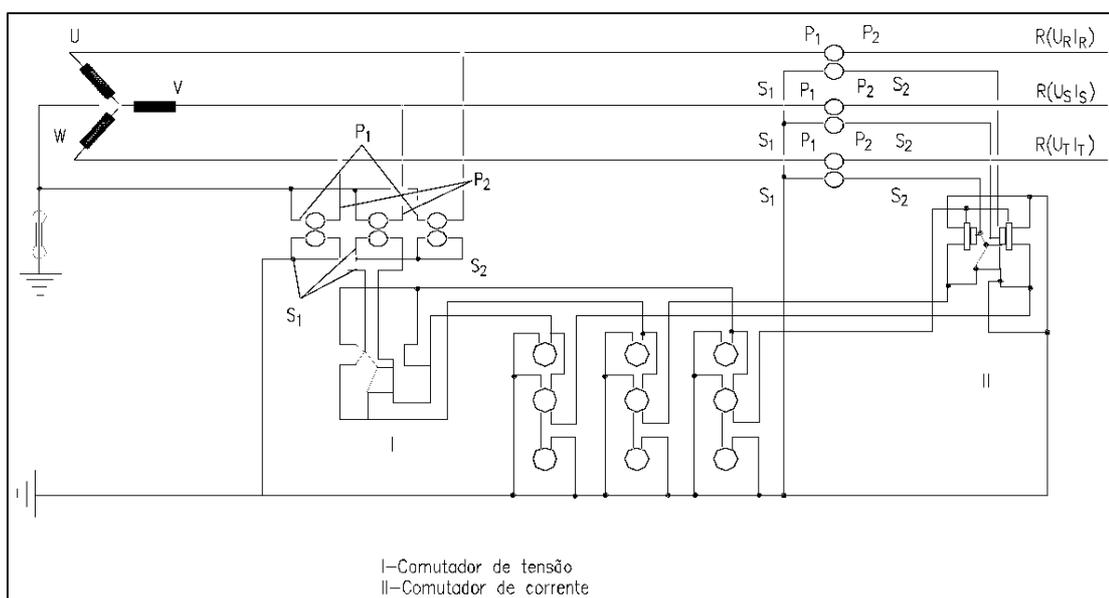
Este instrumento poderá ser utilizado para a medição do tanto do nível a montante como do nível a jusante da PCH.

#### 4.5 MEDIÇÃO INDIRETA DA POTÊNCIA ATIVA DO GERADOR

Segundo Justino (2006, p.90), a medição da potência ativa, deve ser feita nos terminais do gerador. Caso isto não ocorra, é necessário acrescentar as perdas existentes entre o ponto de instalação do aparelho de medida e os terminais do gerador. Os dados poderão ser coletados pelos seguintes equipamentos: wattímetro; transformador de corrente; transformador de comando. Sendo estes previamente calibrados e com classe de precisão 0,2.

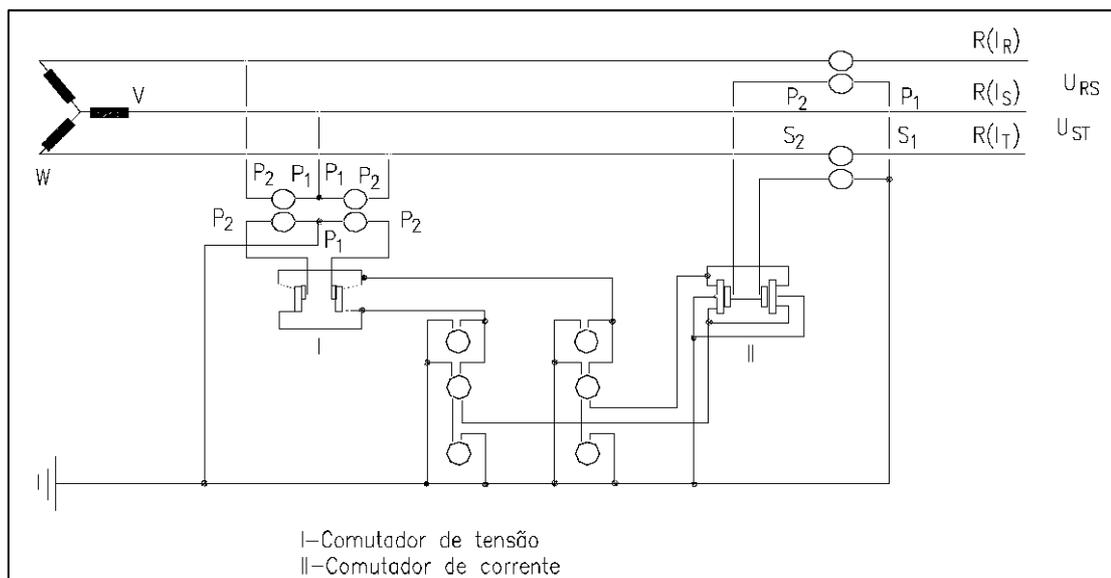
Podem-se considerar dois tipos distintos de instalação dos instrumentos para a medição, são elas:

- O neutro do gerador é encaminhado para fora da instalação e conectado à terra ou à rede, é necessário a utilização do método três wattímetros (Figura 28);
- O neutro do gerador é encaminhado para fora da instalação e não é conectado à terra ou à rede durante a medição, é possível a utilização do método três wattímetros ou dois wattímetros (Figura 29);



**Figura 28 – Método dos dois wattímetros com medição do neutro.**

**Fonte: Justino (2006, p.90).**



**Figura 29 – Método dos dois wattímetros sem medição do neutro.**

Fonte: Justino (2006, p.91).

#### 4.6 RENDIMENTO DA TURBINA HIDRÁULICA

O método utilizado faz com que a turbina opere da carga contratual até o regime de estabilidade elétrica e hidráulica. Para isso, devem-se seguir os seguintes passos (SOUZA; FUNCHS; SANTOS, 1983, p.429):

1. Verificar qual a potência hidráulica;
2. Medir a potência ativa do gerador, operando com fator de potência nominal;
3. Obter a potência no eixo da turbina através da divisão da potência ativa pelos rendimentos mecânicos e do grupo gerador;
4. O rendimento será obtido através do resultado da divisão entre as potências no eixo e hidráulicas.

##### 4.6.1 Obtenção dos Parâmetros

Para obtenção dos parâmetros recomenda-se que a altura de queda líquida e a rotação sejam constantes ao longo dos ensaios. Os parâmetros a serem obtidos são:

- Altura de queda líquida ( $h_{li}$ );
- Vazão Turbinada ( $q_{t_i}$ );
- Potência Hidráulica ( $p_i$ );
- Potência Ativa do Gerador ( $P_{el}$ );
- Rendimento Elétrico do Gerador ( $\eta_{el}$ ).

#### 4.7.1.1 Altura de queda líquida ( $h_{li}$ )

Através da medição do nível de montante ( $n_m$ ) e jusante ( $n_j$ ) vistos visto no capítulo 4.5 e altura de perda hidráulica ( $p_{hi}$ ), obtem-se a altura de queda líquida ( $h_{li}$ ) conforme a equação 2:

$$h_{li} = n_m - n_j - p_{hi} \quad (2)$$

#### 4.7.1.2 Vazão Turbinada ( $q_{ti}$ )

Para verificar qual a vazão turbinada ( $q_{ti}$ ) deve-se utilizar um dos métodos descritos no capítulo 4.4.

#### 4.7.1.3 Potência Hidráulica ( $p_i$ )

Através das medições obtêm-se os valores da altura de queda líquida ( $h_{li}$ ) e da vazão turbinada ( $q_{ti}$ ). Portanto deve-se aplicar a equação 10 para obtenção da potência hidráulica ( $p_i$ ).

$$p_i = g \cdot \rho \cdot 10^{-6} \cdot h_{li} \cdot q_{ti} \quad (10)$$

#### 4.7.1.4 Potência Ativa do Gerador ( $P_{el}$ )

Para verificar qual a potência ativa do gerador ( $P_{el}$ ) deve-se utilizar um dos métodos descritos no capítulo 4.6.

#### 4.7.1.5 Rendimento Elétrico do Gerador ( $\eta_{el}$ )

As curvas de rendimento elétrico do gerador ( $\eta_{el}$ ) deverão ser verificadas com o fornecedor do grupo gerador (SOUZA; FUNCHS; SANTOS, 1983, p.432).

#### 4.7.1.6 Potência no Eixo da Turbina ( $P_e$ )

Através da medição encontra-se o valor da potência ativa do gerador ( $P_{el}$ ) e juntamente com as curvas de rendimento elétrico do gerador ( $\eta_{el}$ ) calcula-se a potência no eixo da turbina ( $P_e$ ) através da fórmula:

$$P_e = \frac{P_{el}}{\eta_{el}} \cdot 100 \quad (20)$$

#### 4.7.1.6 Rendimento da Turbina ( $\eta_t$ )

O rendimento da turbina ( $\eta_t$ ) é obtido pela divisão da potência no eixo da turbina ( $P_e$ ) pela potência hidráulica ( $p_i$ ).

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_i} \quad (21)$$

## 5 SIMULAÇÕES

Os estudos apresentados nos capítulos anteriores mostram os parâmetros operacionais que devem ser levados em conta para otimização da operação energética de PCHs bem como a sua medição em campo.

Conhecendo-se o ponto de maior rendimento de uma unidade geradora é possível executar o planejamento e a operação em tempo real da máquina dentro do ponto ótimo, ou seja, o maior valor de potência por unidade de vazão.

Porém a tomada de decisão no planejamento da operação leva em conta vários aspectos como as aflúncias do rio onde se encontra a usina, uma vez que, operar abaixo da potência nominal das unidades geradoras pode acarretar no vertimento turbinável do reservatório.

### 5.1 EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

Esta equação representa a evolução do armazenamento ao longo do período de estudo: o volume final a cada estágio é obtido somando-se ao volume inicial a aflúncia durante o estágio e subtraindo-se os volumes turbinado, vertido, evaporado e de demais usos (KELMAN, 2003):

$$v_{t+1} = v_t + a_t - u_t - w_t - e_t(v_t, v_{t+1}) - r_t \quad (22)$$

$t = 1, 2, 3, \dots, T$ .

$t$  indexa os estágios (por exemplo, mês)

$T$  duração do estudo (número de meses do registro histórico)

$v_t$  armazenamento do reservatório no início do mês  $t$  ( $m^3$ ).

$v_{t+1}$  armazenamento ao final do mês  $t =$  início do mês  $t+1$  ( $m^3$ ).

$a_t$  aflúncia natural ao longo do mês ( $m^3$ ).

$u_t$  volume turbinado ao longo do mês ( $m^3$ ).

$w_t$  volume vertido ( $m^3$ ).

$e_t(v_t, v_{t+1})$  evaporação ( $m^3$ ) – proporcional ao produto da área do reservatório ( $km^2$ ), a qual depende do armazenamento, pelo respectivo coeficiente mensal de evaporação ( $mm$ ).

$r_t$  demandas adicionais de água (irrigação, abastecimento, etc.) ( $m^3$ ).

Limites de armazenamento e turbinamento.

$$v_t \leq \bar{v} \text{ para } t = 1, \dots, T$$

$$u_t \leq \bar{u} \text{ para } t = 1, \dots, T$$

onde:

$\bar{v}$  – armazenamento máximo ( $m^3$ ).

$\bar{u}$  – máximo volume turbinado ao longo do mês ( $m^3$ ).

Para simulação do presente trabalho não são levadas em conta a evaporação do reservatório e demandas adicionais da água simplificando assim a equação para:

$$v_{t+1} = v_t + a_t - u_t - w_t \quad (23)$$

A base temporal utilizada na análise é a mensal.

Para simulação devem-se utilizar os dados do reservatório bem como do empreendimento de geração. No caso da simulação aqui apresentada usa-se um empreendimento fictício com base nos dados de empreendimentos reais.

## 5.2 DADOS DA PCH

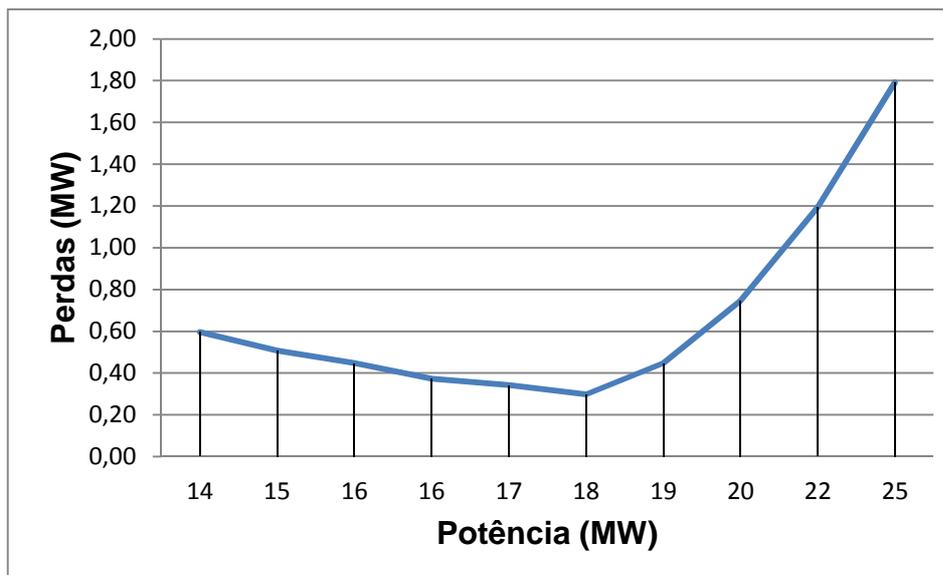
Nome da PCH: Quedas da UTFPR.

Reservatório:

- Volume mínimo: 29,48  $hm^3$
- Volume máximo: 86,25  $hm^3$
- Volume útil: 56,77  $hm^3$

Unidade Geradora:

- Potência nominal: 25  $MW$
- Curva de Perdas:



**Figura 30 – Total de perdas em função da potência instantânea gerada.**

**Fonte: Autoria própria.**

Utilizando um polinômio interpolador de grau 4 obtém-se a equação da curva de perdas:

$$y = -0,0009x^4 + 0,0661x^3 - 1,7662x^2 + 20,373x - 85,305 \quad (24)$$

y representa as perdas em *MW*.

x representa a potência instantânea gerada em *MW*.

### 5.3 METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO

Para facilitar a visualização das perdas, a simulação é feita considerando quatro cenários, no caso 2 com o máximo rendimento e no caso 4 com o máximo valor de perdas. Em todos os casos inicia-se com 50% do volume útil do reservatório e esgota-se até o mínimo operacional no final do período estudado. Considera-se também que para gerar 1 *MW* é necessário 1  $m^3/s$  mais as perdas associadas.

Também é arbitrado um número de horas de operação referente ao mês estudado para controlar o nível do reservatório assim como nos casos reais. Na simulação não é considerada a variação na curva de perdas em função da variação da queda líquida.

Caso 1:

Reservatório com 50% do volume útil:  $57,87 \text{ hm}^3$

Potência instantânea gerada:  $14 \text{ MW}$ .

Perda de potência instantânea:  $0,6 \text{ MW}$ .

Tabela 4 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 1.

Mês	Vazão Afluente (m³/s)	Potência Gerada (MW)	Vazão Defluente (m³/s)	Volume (hm³)	Energia Gerada (MWh)	Tempo de Operação (h)
JAN	8,80	14,00	14,60	57,87	7700,00	550
FEV	9,91	14,00	14,60	52,09	7420,00	530
MAR	8,91	14,00	14,60	50,28	7420,00	530
ABR	7,14	14,00	14,60	45,85	7420,00	530
MAI	8,81	14,00	14,60	36,76	7140,00	510
JUN	9,92	14,00	14,60	33,11	7140,00	510
JUL	10,53	14,00	14,60	32,38	7140,00	510
AGO	8,90	14,00	14,60	33,24	7140,00	510
SET	10,70	14,00	14,60	29,83	7420,00	530
OUT	13,86	14,00	14,60	30,10	7980,00	570
NOV	10,41	14,00	14,60	36,57	7560,00	540
DEZ	8,73	14,00	14,60	35,55	7714,00	551
				29,53	89194,00	

Fonte: Autoria própria.

No final do período o nível do reservatório é  $29,53 \text{ hm}^3$  e a energia total gerada é  $89194 \text{ MWh}$ .

Caso 2: Ponto de maior rendimento.

Reservatório com 50% do volume útil:  $57,87 \text{ hm}^3$

Potência instantânea gerada:  $18 \text{ MW}$ .

Perda de potência instantânea:  $0,3 \text{ MW}$ .

Tabela 5 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 2.

Mês	Vazão Afluente (m <sup>3</sup> /s)	Potência Gerada (MW)	Vazão Defluente (m <sup>3</sup> /s)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Energia Gerada (MWh)	Tempo de Operação (h)
JAN	8,80	18,00	18,30	57,87	7740,00	430
FEV	9,91	18,00	18,30	52,67	7740,00	430
MAR	8,91	18,00	18,30	50,39	7740,00	430
ABR	7,14	18,00	18,30	45,49	7650,00	425
MAI	8,81	18,00	18,30	36,26	7650,00	425
JUN	9,92	18,00	18,30	31,41	7560,00	420
JUL	10,53	18,00	18,30	29,81	6840,00	380
AGO	8,90	18,00	18,30	32,45	6840,00	380
SET	10,70	18,00	18,30	30,81	7650,00	425
OUT	13,86	18,00	18,30	30,94	8100,00	450
NOV	10,41	18,00	18,30	37,72	7992,00	444
DEZ	8,73	18,00	18,30	35,83	7992,00	444
				29,53	91494,00	

Fonte: Autoria própria.

No final do período o nível do reservatório é  $29,53 \text{ hm}^3$  e a energia total gerada é  $91494 \text{ MWh}$ .

## Caso 3:

Reservatório com 50% do volume útil:  $57,87 \text{ hm}^3$

Potência instantânea gerada:  $22 \text{ MW}$ .

Perda de potência instantânea:  $1,2 \text{ MW}$ .

Tabela 6 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 3.

Mês	Vazão Afluente (m³/s)	Potência Gerada (MW)	Vazão Defluente (m³/s)	Volume (hm³)	Energia Gerada (MWh)	Tempo de Operação (h)
JAN	8,80	22,00	23,20	57,87	7260,00	330
FEV	9,91	22,00	23,20	53,44	7260,00	330
MAR	8,91	22,00	23,20	51,92	7480,00	340
ABR	7,14	22,00	23,20	46,95	6820,00	310
MAI	8,81	22,00	23,20	39,83	7040,00	320
JUN	9,92	22,00	23,20	36,25	7260,00	330
JUL	10,53	22,00	23,20	34,77	7480,00	340
AGO	8,90	22,00	23,20	34,04	6820,00	310
SET	10,70	22,00	23,20	31,55	7700,00	350
OUT	13,86	22,00	23,20	30,44	8800,00	400
NOV	10,41	22,00	23,20	33,46	7700,00	350
DEZ	8,73	22,00	23,20	31,59	6600,00	300
				29,48	88220,00	

Fonte: Autoria própria.

No final do período o nível do reservatório é  $28,48 \text{ hm}^3$  e a energia total gerada é  $88220 \text{ MWh}$ .

Caso 4: Ponto de menor rendimento.

Reservatório com 50% do volume útil:  $57,87 \text{ hm}^3$

Potência instantânea gerada:  $25 \text{ MW}$ .

Perda de potência instantânea:  $1,8 \text{ MW}$ .

Tabela 7 – Simulação de perdas de geração em função da potência gerada no caso 4.

Mês	Vazão Afluente (m <sup>3</sup> /s)	Potência Gerada (MW)	Vazão Defluente (m <sup>3</sup> /s)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Energia Gerada (MWh)	Tempo de Operação (h)
JAN	8,80	25,00	26,80	57,87	7000,00	280
FEV	9,91	25,00	26,80	53,99	7000,00	280
MAR	8,91	25,00	26,80	53,02	7000,00	280
ABR	7,14	25,00	26,80	49,43	7000,00	280
MAI	8,81	25,00	26,80	41,18	7000,00	280
JUN	9,92	25,00	26,80	37,32	7000,00	280
JUL	10,53	25,00	26,80	36,38	7000,00	280
AGO	8,90	25,00	26,80	37,04	7750,00	310
SET	10,70	25,00	26,80	30,52	7500,00	300
OUT	13,86	25,00	26,80	29,71	8000,00	320
NOV	10,41	25,00	26,80	35,26	7500,00	300
DEZ	8,73	25,00	26,80	33,67	7025,00	281
				29,51	86775,00	

Fonte: Autoria própria.

No final do período o nível do reservatório é  $29,51 \text{ hm}^3$  e a energia total gerada é  $86775 \text{ MWh}$ .

Nos casos apresentados foram arbitrados dados para que não houvesse a necessidade de vertimento. Na simulação não são consideradas as perdas associadas aos processos de paradas e partidas das unidades geradoras.

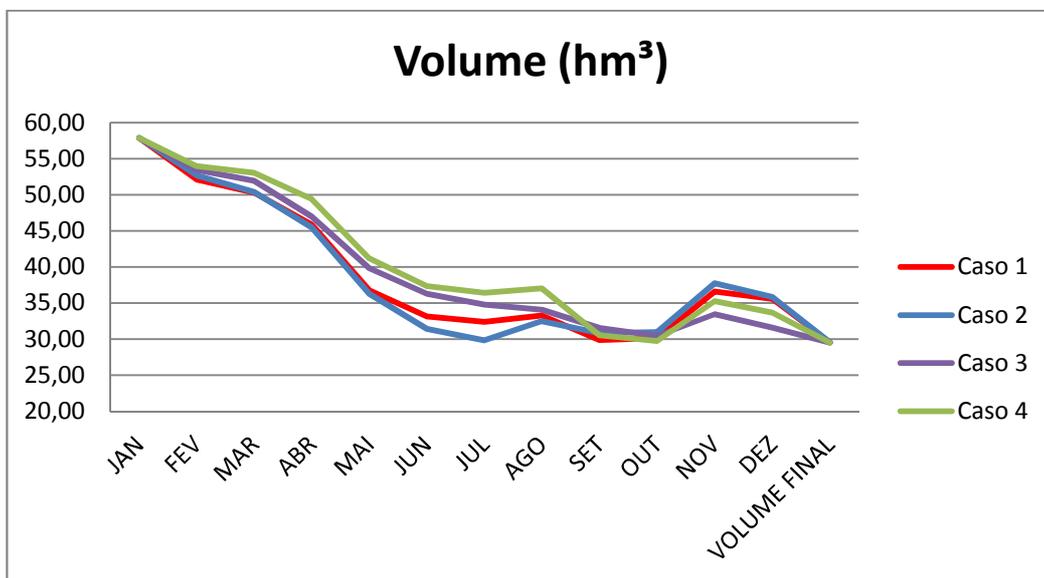


Figura 31 – Volume do reservatório em função do período de estudo.

Fonte: Autoria própria.

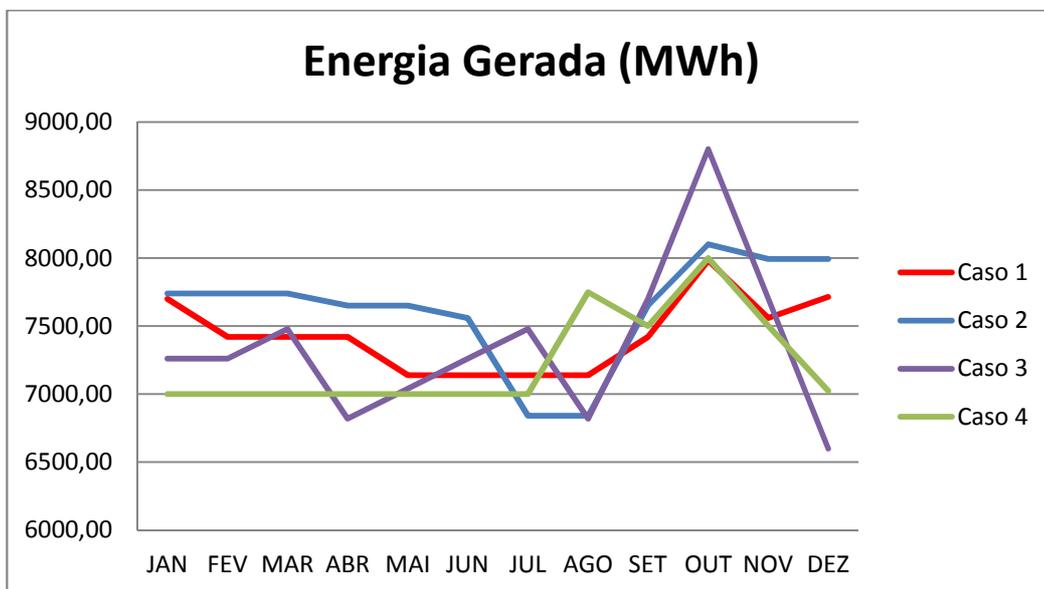


Figura 32 – Energia gerada em função do período do estudo.

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que a operação de todos os casos foi definida para se chegar ao final do período com o reservatório esgotado, próximo ao mínimo operacional de 29,48  $hm^3$ .

A diferença de energia gerada entre o caso de menor e maior rendimento foi de 4719  $MWh$  no período de um ano, ou seja, um aumento da energia gerada em 5,4%.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

Foi apresentado o estudo dos parâmetros operacionais que devem ser levados em conta para otimização energética de uma PCH bem como a obtenção desses dados em campo. Foram analisadas as variáveis da função geração e as perdas associadas na transformação da energia para chegar a potência de operação onde haverá as menores perdas na geração da energia.

Mesmo encontrando o ponto de maior rendimento das PCHs existia a dúvida se as aflúncias do rio onde se encontra a PCH permitiria uma operação dentro do ponto ótimo sem o desperdício de energia através do vertimento. Os casos estudados com valores arbitrados de uma PCH mostraram que foi possível otimizar a operação sem vertimento no período considerado no estudo.

O trabalho aborda as PCHs devido à flexibilidade no despacho, uma vez que, não estão incluídas no despacho centralizado do ONS permitindo assim uma operação dentro dos valores de maior rendimento e não somente as necessidades do sistema. Dentro desse contexto os estudos de caso poderiam possivelmente ser realizados por uma PCH e dificilmente por uma UHE.

Os dados considerados nas simulações foram arbitrados baseados em PCHs que já se encontram em operação. Na simulação apresentada o volume mínimo do reservatório é  $29,48 \text{ hm}^3$ , o volume máximo é  $86,25 \text{ hm}^3$ , o volume útil é  $56,77 \text{ hm}^3$  e a potência nominal do gerador é  $25 \text{ MW}$ . Foi verificado que a PCH operando no caso de maior rendimento, com uma potência gerada de  $18 \text{ MW}$ , fornece uma energia gerada de  $91494 \text{ MWh}$ , no período do estudo, enquanto se ela operar no ponto de menor rendimento, com uma potência gerada de  $25 \text{ MW}$ , ela irá fornecer  $86775 \text{ MWh}$ . A diferença entre operar no ponto de menor e maior rendimento é de  $4719 \text{ MWh}$ , chegando a uma diferença de  $5,4\%$  entre os casos.

Sendo assim verifica-se que ganhos reais em PCHs em operação podem ser obtidos, se for utilizada a metodologia apresentada que irá obter o valor das grandezas reais e após isto o valor das perdas chegando por fim a verificação do ponto de menor e maior rendimento da PCH.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho não foram consideradas medições em campo para chegar aos valores de perdas. Sugere-se fazer as medições em campo das grandezas para chegar aos valores reais de rendimento do grupo gerador e a curva de perdas do mesmo.

Outra oportunidade de estudo é a simulação com dados reais de uma PCH em operação. Assim pode-se chegar a valores reais de ganhos de energia gerada.

## 7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em: 10 out. 2010.

\_\_\_\_\_. Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Brasília, 2003.

\_\_\_\_\_. Atlas de Energia Elétrica no Brasil. Brasília, 2008, 3 ed.

ARCE E., A. S., **Despacho Ótimo de Unidades Geradoras em Sistemas Hidrelétricos via Heurística Baseada em Relaxação Lagrangeana e Programação Dinâmica**. Tese de Doutorado. UNICAMP. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11374/NB-228: Turbinas Hidráulicas – Ensaio de Campo**. Rio de Janeiro, 1990.

CCEE. Disponível em:

<[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/quem-somos/razaode-ser?\\_afzLoop=209959597135000&\\_afzWindowMode=0&\\_afzWindowId=a99Inhi6w\\_168#%40%3F\\_afzWindowId%3Da99Inhi6w\\_168%26\\_afzLoop%3D209959597135000%26\\_afzWindowMode%3D0%26\\_adf.ctrl-state%3Da99Inhi6w\\_184](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-somos/razaode-ser?_afzLoop=209959597135000&_afzWindowMode=0&_afzWindowId=a99Inhi6w_168#%40%3F_afzWindowId%3Da99Inhi6w_168%26_afzLoop%3D209959597135000%26_afzWindowMode%3D0%26_adf.ctrl-state%3Da99Inhi6w_184)>. Acesso em: 20 jun. 2012.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. Disponível em:

< <http://www.cerpch.unifei.edu.br/>>. Acesso em: 10 set. 2012.

CONCEIÇÃO CHAGAS, Eduardo H. **A medição de energia elétrica no ambiente competitivo do setor elétrico brasileiro, contemplando as relações Geração-Transmissão e Transmissão-Distribuição**. 2004. 164 f. Dissertação (Curso de Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) - Universidade Salvador, UNIFACS, Salvador, 2004.

COSTA. Antonio Simões. **Turbinas Hidráulicas e Condutos Forçados**. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/turb-hidr-2003.pdf>>.

Acesso em: 20 out. 2012.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Disponível em:

<[http://www.eletronbras.gov.br/EM\\_Programas\\_PCH-COM/capitulos.asp](http://www.eletronbras.gov.br/EM_Programas_PCH-COM/capitulos.asp)>.

Acesso em: 21 out. 2012.

ENECEL. Consumidor Cativo. Disponível em:

<[http://www.enecel.com.br/principal.php/?id=consumidor\\_cativo](http://www.enecel.com.br/principal.php/?id=consumidor_cativo)>

Acesso em: 29 ago. 2012

\_\_\_\_\_. Consumidor Livre. Disponível em:

<[http://www.enecel.com.br/principal.php/?id=consumidor\\_livre](http://www.enecel.com.br/principal.php/?id=consumidor_livre)>

Acesso em: 29 ago. 2012

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Disponível em:

<[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>.

Acesso em: 10 out. 2010.

FORGHIERI, Andres. **Eficiência Operacional em Redução de Perdas de Água**.

Disponível em:

<[http://www.aesabesp.org.br/arquivos/etbs/17-macromedidores-andres\\_digitrol.pdf](http://www.aesabesp.org.br/arquivos/etbs/17-macromedidores-andres_digitrol.pdf)>

Acesso em: 20 out. 2012.

FORTUNATO, L. A. M., NETO, T. A. A., ALBUQUERQUE, J. C. R., PEREIRA, M. V. F. **Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica**. EDUFF, Niterói, RJ. 1990.

HACKER. **Turbinas Kaplan**. Disponível em:

<[http://www.hacker.ind.br/produtos\\_turbinas\\_kaplan\\_turbinas.php](http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_kaplan_turbinas.php)>

Acesso em: 22 out. 2012.

\_\_\_\_\_. **Turbinas Hidráulicas**. Disponível em:

<[http://www.hacker.ind.br/produtos\\_turbinas\\_hidraulicas.php](http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_hidraulicas.php)>

Acesso em: 30 out. 2012.

JUSTINO, Lucimary Aparecida. **Estudos de Procedimentos de Ensaios de Campo em Turbinas Hidráulicas para PCH**. Dissertação de Mestrado. UNIFEI. 2006.

LIMA, A. Energia Assegurada. Disponível em:

<<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/assegurada.htm>>.

Acesso em: 13 ago. 2012.

MACINTYRE, A.J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Ed. Guanabara Dois. Rio de Janeiro, Brasil: 1983, p. 649.

MELLO JÚNIOR, Antonio Gonçalves de. **A Turbina de Fluxo Cruzado (Michell-Banki) Como Opção Para Centrais Hidráulicas de Pequeno Porte**. Dissertação de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo 2000.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Disponível em:

< <http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 12 out. 2010

NILTON, C.L., **O Impacto das Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs no Meio Ambiente**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFLA. 2009.

ELITE ENERGIA. O que é Mercado Livre. Disponível em:

<[http://www.eliteenergia.com.br/mercado\\_livre.asp](http://www.eliteenergia.com.br/mercado_livre.asp)>.

Acesso em: 25 jul. 2012.

PORTAL PCH. Disponível em:

<[http://portalpch.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3667:3105-2010-pchs-dificil-viabilizacao&catid=1:ultimas-noticias&Itemid=98](http://portalpch.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=3667:3105-2010-pchs-dificil-viabilizacao&catid=1:ultimas-noticias&Itemid=98)>.

Acesso em: 13 out. 2010.

\_\_\_\_\_. **O que é uma PCH?**. Disponível em:

<[http://www.portalpch.com.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=7](http://www.portalpch.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=7)>

Acesso em: 30 out. 2012.

ONS. Procedimento de rede. Disponível em:

< <http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>.

Acesso em: 10 jul. 2012.

SALMAZO, C. T., **Modelo de Otimização Eletro-Energético de Curto Prazo (Pré-Despacho) Aplicado ao Sistema Copel**. Dissertação de Mestrado. UNICAMP. 1997.

SANTOS JUNIOR, Milton Francisco. **As opções de comercialização da energia proveniente de PCHs pertencentes a empresas estatais**. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 2008, Belo Horizonte. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008.

SILVA, Rafael Castro, **Projeto para o Sensoriamento e Automação do Cana de Adução de uma Pequena Central Hidrelétrica**. Monografia de graduação em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal Ouro Preto 2010.

SOUZA, Zulcy; FUCHS, Rubens D.; SANTOS, Afonso H. M. **Centrais Hidro e Termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá-MG: Escola Federal de Engenharia, 1983.

SOUZA, Zulcy; SANTOS, Afonso H. Moreira; BORTONI, Edson da Costa. **Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

VIANA, A. N. C.; **Operação de Turbinas Hidráulicas e Reguladores de Velocidade**. Apostila, FUPAI, 2010.

VIEIRA, D.P., **Modelo Econômico de Programação Diária da Geração Considerando os Custos de Parada e Partida e Operação como Compensador Síncrono**. Dissertação de Mestrado. UTFPR 2007.