

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Lucimary Aparecida Justino

**ESTUDOS DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS
DE CAMPO EM TURBINAS HIDRÁULICAS
PARA PCH**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como requisito parcial à obtenção do título de ***Mestre em Engenharia da Energia***

Orientador: Prof. Augusto Nelson Carvalho Viana, Dr.

Itajubá, 24 de março de 2006.

JUSTINO, Lucimary Aparecida. *Estudos de Procedimentos de ensaios de Campo em Turbinas Hidráulicas para PCH*. Itajubá. UNIFEI, 2006. 140 pp. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá).

Orientador: Augusto Nelson Carvalho Viana

Palavras Chaves: Turbina Hidráulica, Ensaio de Campo, Pequena Central Hidrelétrica-PCH.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Lucimary Aparecida Justino

**ESTUDOS DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS
DE CAMPO EM TURBINAS HIDRÁULICAS
PARA PCH**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 24 de março de 2006, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia da Energia*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana

Prof^a. Dr^a. Yvone de Faria Lemos De Lucca

Prof. Dr. Alexandre Augusto Barbosa

Itajubá

2006

Dedicatória

Primeiramente, a Deus pelas bênçãos recebidas
e aos meus pais, pela crença, incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

A todos que direta ou indiretamente me auxiliaram, debateram, citaram, elogiaram e criticaram com o intuito de contribuir na execução deste trabalho, e em particular gostaria de citar:

- Primeiramente, o professor Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana, pelo exemplo de profissionalismo e apoio constantes na carreira universitária e também, por ser mais que um orientador, um amigo que me auxiliou, acreditou e cobrou com equilíbrio e respeito.

- Todos os professores do Mestrado, que me mostraram um modo diferente de ver as coisas, de forma crítica; além de transmitirem, com interesse e eficiência, conhecimentos aplicados neste trabalho e a serem empregados na carreira profissional. Agradeço ainda a todos os colegas do curso de Mestrado que deram suas contribuições durante os Seminários realizados;

- À Banca que qualificou e comentou meu trabalho, dirigindo-o na direção correta, para que pudesse ter aplicação prática, como era meu objetivo. São os professores, Alexandre Augusto Barbosa e Yvone de Faria Lemos De Lucca.

- Aos meus pais, irmão e irmã, que acreditaram e me estimularam nos momentos mais difíceis;

- À empresa VA TECH Hydro Brasil que colaborou enormemente para o enriquecimento deste trabalho.

E por fim agradeço a Deus, que me deu a luz necessária para finalizá-lo.

“A mente que se abre às novas idéias jamais volta ao seu tamanho inicial”

Albert Einstein

SUMÁRIO

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Sumário.....	vi
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Preliminares.....	1
1.2. Justificativa e relevância.....	1
1.3. Definição do problema de pesquisa.....	2
1.4. Objetivos.....	3
1.5. Metodologia e Estrutura da Dissertação.....	3
2. A CARACTERIZAÇÃO DAS PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS NO BRASIL.....	5
2.1. Considerações Preliminares.....	5
2.2. Definição de Pequena Central Hidrelétrica – PCH.....	6
2.3. Principais Vantagens das PCH's.....	6
2.4. Classificação das Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH's.....	8
2.4.1 – Centrais quanto à capacidade de regularização.....	8
2.4.2.- Centrais quanto ao sistema de adução.....	10
2.4.3 – Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto.....	10
2.5. Arranjos Convencionais de Aproveitamentos Hidrelétricos.....	11
2.5.1 – Central Hidrelétrica de Derivação.....	11
2.5.2 – Central Hidrelétrica de Desvio.....	12
2.5.3 – Central Hidrelétrica de Represamento.....	14
2.6. Componentes Básicos das Pequenas Centrais Hidrelétricas.....	15
2.7. Turbinas Hidráulicas Aplicáveis.....	16
2.8. Parâmetros Utilizados na Avaliação de Centrais Hidrelétricas.....	28
2.9. Considerações Finais.....	33

3. NORMAS APLICÁVEIS A ENSAIOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS.....	35
3.1. Considerações Preliminares.....	35
3.2. CEI / IEC 60041 (1991) – “ Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines” da “ International Electrotechnical Commission” (I. E. C.).....	37
3.3. NBR 11.374 / NB 228 (1990) – Turbinas Hidráulicas – Ensaio de Campo.....	39
3.4. ASME PTC 18 (1992) – “ Hydraulic Turbines – Performance Test Codes”.....	40
3.5. Considerações Finais.....	41
 4. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TURBINA HIDRÁULICA.....	 42
4.1. Considerações Preliminares.....	42
4.2. Procedimento geral para a realização dos ensaios de campo em turbinas hidráulicas.....	42
4.2.1 Preparação dos Ensaio.....	43
4.2.2 Detalhes de medição.....	43
4.2.3 Instrumentos.....	44
4.2.4 Determinação das Grandezas e das Incertezas das Medidas.....	44
4.2.4.1 Roteiro para Determinação das Grandezas.....	45
4.2.4.2 Equacionamento da Incerteza das Medições Realizadas.....	53
4.2.5 Registros manuais e aquisição de dados.....	57
4.2.6 Resultados.....	61
4.2.7 Relatório Final.....	62
4.2.8 Contestação ou repetição de ensaios.....	62
4.3 Métodos normalizados para medição das grandezas.....	63
4.3.1 Métodos de medida da vazão.....	63
4.3.1.1 Método da Cortina Salina.....	64
4.3.1.2 Método de Gibson.....	67
4.3.1.3 Método dos Molinetes.....	70
4.3.1.4 Método da Diluição.....	73
4.3.1.5 Método do Vertedor.....	74
4.3.1.6 Método Ultrassônico.....	77
4.3.1.7 Método de Winter-Kennedy.....	80

4.3.1.8	Análise Comparativa dos Métodos de Medida da Vazão.....	81
4.3.2	Métodos para Medição da Altura de Queda Líquida.....	85
4.3.3	Medidas de Pressão.....	86
4.3.4	Potência Mecânica.....	89
4.3.4.1	Métodos indiretos de medição da potência.....	89
4.3.4.2	Perdas Mecânicas.....	92
4.4	Index Test – Teste de Índice.....	93
4.4.1	Condições gerais do Index Test.....	94
4.4.2	Medição da vazão relativa.....	94
4.5	Considerações Finais.....	96
5.	ENSAIOS DE CAMPO EM PCH's.....	98
5.1	Considerações Preliminares.....	98
5.2	Estudo de Caso 1.....	98
5.2.1	Características Gerais da PCH	98
5.2.2	Procedimento de Teste.....	100
5.2.3	Parâmetros Registrados e Calculados.....	102
5.2.4	Comparação com os Valores Garantidos.....	104
5.3	Estudo de Caso 2.....	106
5.3.1	Características Gerais da PCH.....	106
5.3.2	Procedimento de Ensaio.....	108
5.3.3	Parâmetros registrados e calculados.....	108
5.3.4	Comparação com os valores garantidos.....	110
5.4	Considerações Finais.....	112
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	113
6.1	Conclusões.....	113
6.2	Recomendações para Futuros Trabalhos.....	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
	ANEXO I	119
	ANEXO II	127
	ANEXO III	130

RESUMO

Um contrato de fornecimento de equipamentos para Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH contém as garantias de potência e de rendimento da turbina hidráulica, podendo conter também garantias adicionais referentes à variação de rotação e de pressão, rotação de disparo e ensaio por cavitação.

Para a determinação do desempenho das turbinas hidráulicas para comprovação das garantias contratuais são realizados os ensaios em campo, que são métodos bastante utilizados pelas empresas como ferramenta para comprovação das garantias contratuais em substituição ao ensaio do modelo reduzido, que apresenta um custo extremamente elevado.

Nas usinas hidrelétricas, o rendimento da turbina representa o percentual de energia hidráulica que é passível de ser transformada em energia elétrica. Na compra da turbina, o fabricante deve garantir o rendimento especificado. Se os valores de rendimento ficarem abaixo do esperado, os prejuízos serão enormes, daí a importância de existirem métodos precisos e confiáveis para a sua medição.

Uma grandeza que influencia fortemente no valor do rendimento obtido é a vazão. Este trabalho apresenta as diferentes metodologias de medição de vazão em turbinas hidráulicas, aplicáveis em ensaios de campo de PCH e apresenta também os procedimentos utilizados, para que, em casos específicos de PCH's, sem prejuízo da qualidade, os ensaios de campo possam ser executados de modo que as garantias sejam comprovadas com custos compatíveis com o investimento feito.

Exemplificando o acima exposto, serão apresentados também, dois estudos de casos em PCH's, onde foram realizados ensaios de campo para comprovação das garantias contratuais.

ABSTRACT

A supply contract of equipments for Small Hydro Power, contain the power and turbine efficiency guarantees and can contain adds guarantees referring to a rotation and pressure variation, runaway speed and cavitations test.

To the determination about the hydraulics turbines performance for contractual guarantees are realized the field acceptance test, that are methods quite a lot used for enterprises like tools to prove the contractual guarantees in substitution to Model Test, that showed a cost extremely high.

In the field acceptance test are measures of some values that added to the others, possibility obtain the turbine efficiency.

In the Small Hydro Power, the turbine efficiency represents the hydraulic power percentage that is subject to be transformed in electrical power. In the turbine purchase, the manufacturer has to guarantee the efficiency specified if it is become down to expected, the damages are enormous, then the importance to exist precise methods and reliable for your measurement.

The method accuracy of the discharge measurement that has, between another problems, the calibration and installation, that influence hard the value of the efficiency obtained. This work shows the different methodologies about discharge measurement in hydraulic turbines, that can be apply in Small Hydro Power field tests and shows too the procedures used that in specifics cases of Smal Hydro, without quality damage, the site tests could be executed the form that the guarantees will be approve with compatible cots with the investment done.

As an example for said above, are show two Cases in Small Hydro where did realized field acceptance tests to assure the contractual guarantees.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

2.1	Corte esquemático de uma Central Hidrelétrica de Derivação, mostrando seus principais componentes.....	12
2.2	Esquema de uma Central Hidrelétrica de Desvio.....	13
2.3	Corte esquemático de uma Central de Represamento, mostrando seus principais componentes.....	14
2.4	Corte esquemático de uma Central de Desvio, mostrando o sistema de baixa pressão com câmara de carga.....	15
2.5	Escolha da turbina em função das condições hidráulicas e topográficas Catálogo VA TECH Hydro Brasil Ltda.....	17
2.6	Turbinas Hidráulicas – Rotação Específica.....	17
2.7(a)	Grupo Gerador da PCH Alto Jauru, consórcio Toshiba – VA TECH Hydro.....	18
2.7(b)	Desenho esquemático de um grupo gerador com volante de inércia.....	18
2.8	Turbina Francis Caixa Aberta – Grupo Gerador da MCH Boa Vista Catálogo BEE – Indústria e Comércio de Equipamentos Ltda.....	19
2.9	Turbina Francis Gêmea.....	20
2.10	Rotor de dupla sucção de uma turbina do tipo.....	20
2.11(a)	Grupo gerador da PCH Alto Fêmeas – Catálogo VA Tech Hydro.....	21
2.11(b)	Concepção da linha de eixo de um grupo gerador com turbina de dupla sucção.....	21
2.12	Instalação com turbina do tipo Pelton.....	22
2.13	Turbinas Michel –Banki.....	22
2.14	Rotor de uma Turbina Hélice.....	23
2.15(a)	Casa de Máquinas da UHE Salto Grande – Catálogo VA Tech Hydro.....	24
2.15(b)	Descida do rotor de uma das turbinas da UHE Candonga – Catálogo VA Tech Hydro.....	24
2.16	Turbina Tubular com o gerador instalado a montante da turbina.....	25
2.17	Turbina Tubular com o gerador instalado a jusante da turbina.....	25
2.18(a)	Descida do cubo da roda. Fase da montagem de uma das turbinas Bulbo da UHE Igarapava – Catálogo VA Tech Hydro Brasil Ltda.....	26
2.18(b)	Corte esquemático de um grupo gerador com turbinas Bulbo.....	26
2.19	Instalação com turbina do tipo Bulbo em poço (ou “Pit”).....	27

CAPÍTULO 4

4.1	Desenho representativo de uma turbina de reação (Francis, Hélice, Kaplan) - Caixa espiral de seção retangular em concreto: tubo de sucção curvo.....	47
4.2	Desenho representativo de uma turbina de reação caixa espiral de seção circular.....	48
4.3	Desenho representativo de uma turbina de reação, eixo horizontal.....	49
4.4	Instalação de turbina imersa com tubo de sucção curvo.....	49
4.5	Instalação com turbina fechada com tubo de sucção reto.....	50
4.6	Desenho representativo de uma turbina de ação (Pelton).....	51
4.7	Esquema Genérico de Aquisição de Dados.....	59
4.8	Disposição do reservatório e da tubulação utilizados no método da Cortina Salina....	64
4.9	Curva Característica de um ensaio pelo método da mancha salgada.....	66
4.10	Características geométricas, cinemáticas e dinâmicas do método de Gibson.....	68
4.11(a)	Molinete Hidrométrico preso à haste.....	71
4.11(b)	Diferentes tipos de “conta-giros”.....	71
4.11(c)	Lastro (formato de um peixe).....	71
4.11(d)	Molinete preso a cabo com lastro.....	71
4.12	Corte Esquemático de um Molinete.....	71
4.13	Tipos de Molinetes para escoamento axial e oblíquo.....	72
4.14	Vertedores Retangulares.....	75
4.15	Dimensões de um vertedor: s=altura da crista; h=altura da carga.....	75
4.16(a)	Medidor de vazão ultrassônico não intrusivo – Catálogo Panametrics.....	78
4.16(b)	Medidor de vazão ultrassônico intrusivo.- Catálogo Ultraflux.....	78
4.17	Características dos Medidores de Vazão Ultrassônicos por tempo de trânsito.....	79
4.18	Localização das tomadas de pressão para o método de Winter-Kennedy em turbinas com caixa espiral metálica.....	80
4.19	Localização das tomadas de pressão para o método de Winter-Kennedy em turbinas com caixa espiral em concreto.....	80
4.20	Viabilidade técnica e econômica dos métodos de medição de vazão.....	83
4.21	Transmissor de nível hidrostático para leitura de profundidade ou níveis de Reservatórios – Catálogo Hytronic.....	86
4.22	Transdutores de Pressão – Catálogo Hytronic.....	87
4.23	Tomada de pressão.....	88
4.24(a)	Tomadas de pressão ligadas a manômetro por meio de tubos separados.....	88
4.24(b)	Tomadas de pressão ligadas a manômetro através de um coletor anelar.....	88

4.25	Medida da potência nos terminais do gerador pelo método dos três wattímetros.....	90
4.26	Medida de potência nos terminais do gerador pelo método dos dois wattímetros.....	91
4.27	Localização das tomadas de pressão em turbinas axiais.....	95

CAPÍTULO 5

5.1	Desenho de Implantação da Turbina – Estudo de Caso 1.....	99
5.2	Desenho de implantação da turbina – Estudo de Caso 2.....	107

ANEXO III

III.1	Diferenciação entre exatidão e precisão.....	132
--------------	--	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

2.1 - Classificação das PCH's quanto à potência e quanto à queda de projeto.....	11
--	----

CAPÍTULO 4

4.1	Modelo de Folha de Registro dos Resultados.....	60
4.2	Número de pontos de medida.....	75
4.3	Limites das Dimensões do Vertedor.....	75
4.4	Quadro comparativo dos métodos de medição de vazão.....	8 2

CAPÍTULO 5

5.1	Garantias para queda líquida nominal de 44,70m.....	99
5.2	Dimensões de projeto do Estudo de Caso 1 – PCH Alto Jauru.....	100
5.3	Valores registrados para a Máquina 1.....	102
5.4	Valores registrados para a Máquina 2.....	102
5.5	Valores calculados para a Máquina 1.....	10 3
5.6	Valores calculados para a Máquina 2.....	103
5.7	Valores corrigidos para $H_n = 44,70$ [m] – Máquina 1.....	104
5.8	Valores corrigidos para $H_n = 44,70$ [m] – Máquina 2.....	104
5.9	Garantias de Potência e Rendimento para a queda líquida nominal de 87,79 m.....	106
5.10	Dimensões de projeto da PCH Cote.....	107
5.11	Média dos valores registrados durante o ensaio.....	108
5.12	Valores Calculados.....	109
5.13	Valores Calculados corrigidos.....	109

ANEXO I

I.1	Valores registrados para o ponto de 100% da carga do Grupo Gerador 1.....	120
-----	---	-----

ANEXO III

III.1	Valor do Fator de Abrangência (k_p) que produz um intervalo de confiança $\pm k_p.S(x_i)$ tendo uma probabilidade de confiança p , assumido uma distribuição normal para as medidas X_i	139
-------	---	-----

III.2	Expressão do Resultado de Medição quanto a natureza da grandeza e o número de medidas.....	139
III.3	Fator de Student (t_p) a partir da distribuição t de Student para graus de liberdade Φ que define um intervalo $\pm t_p(\Phi).u$ que abrange uma probabilidade de confiança p da distribuição das medidas x_i	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Caracteres alfabéticos

a	Posição do instrumento de medida [m]
a ₁	Cota do ponto 1 de entrada da turbina até o centro do manômetro [m]
A	Área da seção transversal do conduto forçado [m ²]
A ₁	Área de entrada da Caixa Espiral [m ²]
A ₂	Área de Saída do Tubo de Sucção [m ²]
b	Largura da crista do vertedor [m]
C	Constante obtida de Winter-Kennedy
C ₁	Concentração da substância química na solução injetada [mg/l]
C ₂	Concentração da substância química na mistura resultante [mg/l]
C ₀	Concentração da substância química na água natural [mg/l]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Altura da carga do vertedor [m]
h _b	Altura barométrica [m]
h _p	Altura de pressão ou altura piezométrica ou carga piezométrica [m]
h _s	Altura geométrica de sucção [m]
h _v	Altura dinâmica ou carga devido à velocidade [m]
h _t	Altura total ou carga total [m]
H	Altura de queda líquida [m]
H _b	Altura de queda bruta [m]
H _d	Altura de queda de projeto [m]
H _t	Altura efetiva ou altura de queda útil [m]
H _n	Altura de queda líquida nominal ou de referência [m]
H ₁	Carga estática [m.c.a]
H _r	Altura de queda garantida [m]
L	Distância das tomadas de pressão no conduto forçado – método de Gibson [m]
n	Rotação nominal da turbina [rpm]
n _r	Rotação garantida ou especificada da turbina [rpm]
n ₀	Velocidade de rotação em vazio ou sem carga [rpm]
n _R	Velocidade de rotação em disparo [rpm]
n ₁	Velocidade de rotação inicial [rpm]
n _{máx}	Sobre-rotação ou sobrevelocidade máxima instantânea [rpm]

n_s	Número específico de rotações relativo a potência [rpm]
n_q	Número específico de rotações relativo a vazão [rpm]
n_{qA}	Rotação específica adimensional
p_g	Pressão manométrica [Pa]
p_1	Pressão na entrada da turbina [Pa]
p_2	Pressão na saída da turbina [Pa]
P_h	Potência absorvida pela turbina ou potência hidráulica [kW]
P_e	Potência fornecida pela turbina ou potência efetiva ou potência de eixo [kW]
P_{el}	Potência elétrica ativa do gerador [kW]
P_r	Potência garantida nominal [kW]
P_0	Pressão estática sem rotação [Pa]
$P_{m\acute{a}x}$	Pressão instantânea máxima [Pa]
P_m	Perda no mancal de escora [kW]
P.R.	Plano de referência
q	vazão da solução química injetada [m ³ /s];
Q	Vazão da turbina [m ³ /s];
Q_r	Vazão garantida [m ³ /s];
Q_{OL}	Vazão do óleo do mancal [m ³ /s];
Q_A	Vazão de projeto ou aproveitamento [m ³ /s]
Q_o	Vazão em vazio [m ³ /s]
Q_r	Vazão garantida nominal [m ³ /s]
s	Altura da crista do vertedor [m]
$S(q)$	Desvio-padrão experimental
T	Temperatura da água [°C]
T_R	Tempo de reflexão [s]
u	Incerteza Expandida
$u(\overline{q})$	Desvio-padrão experimental da média ou incerteza padrão associada à média
$u_c(y)$	Incerteza Padrão Combinada
u_{eff}	Grau de liberdade efetivo
v	Velocidade média [m/s]
z	Altura potencial, carga de posição ou carga geodésica [m]
z_m	Nível d'água [m]
z_{w1}	Nível de água de montante com relação ao plano de referência [m]
z_{w2}	Nível de água de jusante com relação ao plano de referência [m]

z_w	Distância entre o nível de referência e o nível operacional da turbina [m]
h_1	Nível do medidor de pressão na entrada da turbina com relação ao nível de referência [m]
h_2	Nível do medidor de pressão na saída da turbina com relação ao nível de referência [m]
$(z_p)_{\max}$	Variação de pressão máxima [Pa]
x_n	Variação de velocidade de rotação permanente [rpm]
$(y_n)_{\max}$	Variação da velocidade de rotação máxima instantânea [rpm]
Z	Altitude [m]

Caracteres gregos

η_t	Rendimento da turbina [%]
η_r	Rendimento garantido da turbina [%]
η_{tw}	Rendimento médio ponderado da turbina [kW]
η_G	Rendimento do gerador [%]
ρ	Massa específica da água [kg/m ³]
ρ_s	Massa específica da solução salina [kg/m ³]
γ	Peso específico da água [N/m ³]
ϕ	Grau de liberdade para medidas diretas
ΔP	Diferença de pressão entre os pontos de Winter-Kennedy [m.c.a.]
ϕ_R	Diâmetro do rotor da turbina [m]
ϕ_{ce}	Diâmetro de entrada da caixa espiral [m]
ϕ_{cf}	Diâmetro do conduto forçado [m]
ϕ	Latitude [°]
ΔT_{TC}	Variação de temperatura no trocador de calor [°C]

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Preliminares

Os ensaios para a determinação do desempenho de turbinas hidráulicas podem ser realizados no laboratório de ensaio do fabricante ou no campo. Para a realização destes ensaios são consideradas duas hipóteses:

Primeira hipótese: as turbinas são de pequena capacidade, compatíveis com os recursos de que dispõe o laboratório de ensaio. É evidente que neste caso as turbinas podem ser ensaiadas diretamente.

Segunda hipótese: a capacidade e, portanto, as dimensões da turbina não permitem que esta possa ser ensaiada no laboratório. Recorre-se aos ensaios com o modelo reduzido da turbina no laboratório, além do ensaio de recepção da própria turbina após sua instalação na usina.

No caso de PCH's, a escolha de uma ou outra alternativa depende da tecnologia de que dispõe o fabricante da turbina, por exemplo, se possui ou não laboratório de ensaio e do custo envolvido na comprovação destas garantias.

Em PCH's é comum a eliminação do ensaio de modelo das turbinas hidráulicas devido ao alto custo envolvido, o que aumenta a importância dos ensaios de campo ou de recepção dos grupos, fazendo com que estes sejam realizados de uma maneira muito mais criteriosa.

1.2 Justificativa e relevância

A motivação para a realização deste trabalho surgiu da constatação da carência de trabalhos sobre o tema voltado para o segmento de pequenas centrais hidrelétricas, considerando as dificuldades e viabilidade econômica dos ensaios.

A crescente competitividade entre as empresas fornecedoras de equipamentos para PCH's aliada à alta exigência de seus clientes tem feito com que estas empresas

busquem uma maior eficiência em seus equipamentos, apresentando com isto um diferencial.

Dentro deste contexto, muito tem sido estudado com relação à determinação do rendimento de grupos geradores, sendo o maior desafio relativo à medição da vazão. As razões para preocupações com esta grandeza estão relacionadas aos problemas de calibragem, instalação e manutenção do equipamento de medição. Observa-se que existem muitos trabalhos de pesquisa sobre o assunto, bem como uma grande quantidade de metodologias para medição desta grandeza. Observa-se, ainda, que muitos destes métodos estão caindo em desuso e que existe uma carência de trabalhos que discutam a implementação de novos métodos de medição da vazão.

Uma outra razão igualmente importante, que justifica a preocupação com a correta determinação do rendimento das turbinas são as incertezas relativas a estas medições, já que uma variação de 1% no rendimento pode representar, em certos casos, um valor considerável de faturamento.

Além de que as Pequenas Centrais Hidrelétricas, aqui designadas pela sigla PCH têm despertado interesse devido ao PROINFA –Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia – instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, que tem como objetivo a diversificação da matriz energética brasileira e a busca por soluções de cunho regional com a utilização de fontes renováveis de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis.

O PROINFA promoverá a implantação de 3.300 MW de capacidade, em que a ELETROBRÁS contratará a compra de energia de 1.100MW de cada uma das três fontes: usinas eólicas, de biomassa e pequenas centrais hidrelétricas.

1.3 Definição do problema de pesquisa

Os testes de desempenho dos equipamentos ofertados são um conjunto de testes realizados no campo ou na fábrica, aplicados com o objetivo de se comprovar o cumprimento de garantias estabelecidas contratualmente. Estes testes são realizados em uma unidade geradora, seja durante o período de comissionamento, seja posteriormente, e permitem também a definição das faixas operativas e das restrições operacionais, onde aplicável.

Para a turbina, no caso de uma PCH, onde a realização do ensaio de laboratório é impraticável e um ensaio de modelo reduzido é economicamente inviável, os ensaios de campo devem ser realizados de uma maneira mais criteriosa.

Neste contexto, pretende-se, com o desenvolvimento deste trabalho, responder a seguinte questão: Quais os procedimentos a serem seguidos para que os ensaios de recepção possam ser realizados com um custo compatível com o investimento feito?

1.4 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são:

1. Estudo das diversas metodologias de ensaio em turbinas hidráulicas de PCH;
2. Estudar meios para que em casos específicos de PCH, sem prejuízo da qualidade, os ensaios de campo possam ser executados de modo que as garantias contratuais sejam comprovadas com custos compatíveis com o investimento feito.
3. Estudo comparativo dos diversos métodos de medição da vazão mais comumente empregados em PCH;

1.5 Metodologia e Estrutura da Dissertação

O trabalho aqui apresentado foi desenvolvido baseado na metodologia apresentada abaixo:

- Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto e posterior pesquisa e estudo comparativo das normas que regem os ensaios de turbinas hidráulicas;
- Em seguida, baseado nas normas estudadas, foi apresentado um procedimento de ensaio de campo em turbinas hidráulicas juntamente com o equacionamento e incerteza das grandezas a serem obtidas: vazão, altura de queda líquida, pressão, potência e rendimento;
- Complementando o trabalho, foram apresentados dois estudos de casos e finalmente, foram feitas as conclusões finais e recomendações para futuros trabalhos.

De acordo com a metodologia exposta acima, este trabalho foi estruturado em seis capítulos, distribuídos da seguinte forma:

§ Capítulo 1:

O *primeiro capítulo* apresenta a justificativa e relevância do crescente interesse pelo tema, além de apresentar a definição do problema de pesquisa, a metodologia utilizada, os objetivos da dissertação e a sua organização.

§ Capítulo 2:

O *segundo capítulo* apresenta as principais abordagens e definições sobre o tema “Pequena Central Hidrelétrica”, além de explorar os principais tipos de turbinas aplicáveis para este empreendimento.

§ Capítulo 3:

O *terceiro capítulo* apresenta as normas brasileiras e internacionais que regem os ensaios realizados em turbinas hidráulicas bem como suas principais particularidades.

§ Capítulo 4:

No *quarto capítulo* é apresentado o procedimento geral de ensaio de campo em turbinas, independente da norma utilizada, apresentando também os principais métodos de medição das grandezas e sua incerteza.

§ Capítulo 5:

No *quinto capítulo* são apresentados dois estudos de casos referentes a ensaios de campo realizados em PCH's.

No estudo de caso 1, os ensaios foram concluídos em quatro dias, sendo a norma escolhida para a sua realização a CEI/IEC 60041 (1991) e o método de medição de vazão utilizado foi o Método de Gibson.

No estudo de caso 2 foi realizado o *Index Test*. Tal teste foi desenvolvido conforme acordado entre cliente e fornecedor da turbina, sendo a vazão medida pelo método de Winter-Kennedy.

§ Capítulo 6:

No *sexto capítulo* são apresentadas as conclusões a respeito dos resultados das pesquisas realizadas, bem como suas limitações e recomendações para futuros trabalhos.

Capítulo 2

A CARACTERIZAÇÃO DAS PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS NO BRASIL

2.1 Considerações Preliminares

Neste capítulo serão abordadas as principais definições e características referentes a Pequenas Centrais Hidrelétricas, seus principais componentes e os principais parâmetros utilizados na sua avaliação.

2.2 Definição de Pequena Central Hidrelétrica – PCH

Não existe uma classificação para as Pequenas Centrais Hidrelétricas aceita internacionalmente.

No Brasil, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica - através da Resolução 394, de 04 de dezembro de 1998, definiu como centrais hidrelétricas com características de PCH, os empreendimentos hidrelétricos com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área total do reservatório igual ou inferior a 03 km², sendo esta área delimitada pela cota d'água associada à vazão de cheia com tempo de recorrência de 100 anos.

Com o intuito de explicitar os critérios e procedimentos a serem aplicados nos casos em que a área do reservatório for superior a 3,0 km², a ANEEL, em 09 de dezembro de 2003, através da Resolução número 652, estabeleceu que o aproveitamento hidrelétrico que não atender a condição para a área do reservatório informada, respeitados os limites de potência ($1.000 \text{ kW} < P \leq 30.000 \text{ kW}$) e modalidade de exploração (produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma), será considerado com características de PCH, caso se verifique pelo menos uma das seguintes condições:

- Atendimento a inequação:

$$A \leq \frac{14,3 \times P}{H_b} \quad (2.1)$$

Sendo:

P = potência elétrica instalada em [MW];

A = área do reservatório em $[\text{km}^2]$, definida como sendo a área da planta à montante do barramento, delimitada pelo nível d'água máximo normal de montante;

H_b = queda bruta em $[\text{m}]$, definida pela diferença entre os níveis d'água máximo normal de montante e normal de jusante, sendo que o nível d'água normal de jusante da casa de força é aquele determinado para a vazão correspondente ao somatório dos engolimentos máximos de todas as turbinas, sem considerar a influência da vazão vertida.

Ficando estabelecido adicionalmente que a área do reservatório não poderá ser superior a $13,0 \text{ km}^2$.

- Reservatório cujo dimensionamento, comprovadamente, foi baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica.

Na verificação da condição acima, a ANEEL articulará com a Agência Nacional de Águas – ANA, os Comitês de Bacia Hidrográfica, os Estados e o Distrito Federal, conforme for o caso, de acordo com a respectiva competência, quanto aos objetivos para definir as dimensões do reservatório destinado ao uso múltiplo.

Conforme exposto por Souza (2005), a resolução acima teve como principais consequências praticamente a eliminação das micro e minis centrais hidrelétricas sob aspectos legais gerais, de financiamento governamental, desestimulando os geradores, os usuários e os fabricantes brasileiros de equipamentos mecânicos, hidromecânicos e elétricos até a potência de $1.000 [\text{kW}]$ e, para as PCH's, houve a necessidade de inventário e projeto básico, executados e aprovados dentro de princípios pré-estabelecidos e necessidade de projeto ambiental detalhado para obtenção da licença para implantação.

2.3 Principais Vantagens das PCH's

De acordo com o Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas, elaborado pela ANEEL (2003), os empreendimentos hidrelétricos denominados PCH, apresentam várias vantagens e benefícios para o empreendedor, dentre eles, destacam-se:

- Autorização não-onerosa para explorar o potencial hidráulico, de acordo com a Lei 9.074 de 07 de julho de 1995 e Lei 9.427 de 26 de dezembro de 1996;
- Descontos não inferiores a 50% nos encargos de uso dos sistemas de transmissão e distribuição, de acordo com a Lei 10.438 de 26 de abril de 2002; Resolução ANEEL 281 de 01 de outubro de 1999 e Resolução ANEEL 219 de 23 de abril de 2003;

- Livre comercialização de energia com consumidores ou conjunto de consumidores reunidos por comunhão de interesses de fato ou de direito cuja carga seja igual ou superior a 500 kW, de acordo com a Lei 9.648 de 27 de maio de 1998 e Lei 10.438 de 26 de abril de 2002;
- Livre comercialização de energia com consumidores ou conjunto de consumidores reunidos por comunhão de interesses de fato ou de direito, situados em sistema elétrico isolado, cuja carga seja igual ou superior a 50 kW, de acordo com a Lei 10.438 de 26 de abril de 2002;
- Isenção relativa à compensação financeira pela utilização de recursos hídricos, de acordo com a Lei 7.990 de 28 de dezembro de 1989 e Lei 9.427 de 26 de dezembro de 1996;
- Participação no rateio da conta de consumo de combustível – CCC, quando substituir geração térmica a óleo diesel, nos sistemas isolados, de acordo com a Lei 10.438 de 26 de abril de 2002;
- Isenção de aplicação, anualmente, de no mínimo 1% da receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico – P&D, de acordo com a Lei 9.991 de 24 de julho de 2000;
- Comercialização das energias geradas pelas PCH's com concessionárias de serviço público tendo como teto tarifário o valor normativo estabelecido conforme a Resolução ANEEL 169 de 03 de maio de 2001;
- MRE – Mecanismo de Realocação de Energia para centrais hidrelétricas conectadas ao sistema interligado e não despachadas centralizadamente pelo ONS, de acordo com o Decreto 2.655 de 02 de janeiro de 2000 e Resolução ANEEL 169 de 03 de maio de 2001;
- PROINFA – Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica instituído com objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de produtores independentes autônomos, concebidos com base em PCH, fontes eólicas e biomassa, mediante procedimentos estabelecidos nas Leis 10.438 de 26 de abril de 2002 e 10.762 de 11 de novembro de 2003 e Decreto 4.541 de 23 de dezembro de 2002.

Porém, conforme exposto por Souza (1999), apesar das vantagens citadas acima, as PCH's só tornam-se empreendimentos economicamente atrativos quando algumas providências são tomadas, no sentido de minimizar os seus custos de investimento, operação e manutenção, entre os quais destacam-se:

- Minimização dos custos de projetos, realizando um projeto geral para implantação que permita um contrato em regime de empreitada integral por preço global fechado, ou seja, regime “Turn Key Job” ou, caso o contratante disponha de equipe competente para acompanhamento e fiscalização, contratos parcelados também em regime de empreitada integral por preço fechado os quais estarão inseridos dentro de um rígido cronograma fase/tempo;
- No projeto geral de implantação, maximizar o uso de soluções de engenharia que já tenham sido utilizadas com sucesso;
- Maximizar o uso de materiais e equipamentos padronizados e de fabricação em série;
- Maximizar o uso de obras de desvio como permanente e vice-versa;
- Procurar um arranjo para os componentes da PCH de modo a maximizar o uso do já existente no que se refere a vias de acesso, meios de comunicação, estruturas e disponibilidades dos vilarejos e/ou cidades da região, particularmente com relação a material e mão de obra.
- Eliminar os ensaios em modelos, substituindo-os, quando indispensáveis, por ensaios em campo.
- Alto nível de automatização para a etapa de operação, de modo a reduzir a valores compatíveis com a geração os custos fixos de mão de obra e os variáveis de manutenção.

2.4 Classificação das Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH’s

No Brasil, a ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S/A - editou um manual intitulado “Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas” (1999), que classifica as PCH’s, de acordo com os seguintes critérios:

- Centrais quanto à capacidade de regularização;
- Centrais quanto ao sistema de adução;
- Centrais quanto à potência instalada e a queda de projeto.

2.4.1 Centrais quanto à capacidade de regularização

Os tipos de PCH, quanto à capacidade de regularização do reservatório são:

- A Fio d’Água;
- De Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório;
- De Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.

PCH a Fio d'Água

Esses tipos de PCH's não dispõem de bacia de acumulação de relevância e utilizam a vazão proporcionada imediatamente pelo rio, nesse caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem. O sistema de adução deverá ser projetado para conduzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à demanda máxima. O aproveitamento energético local será parcial e o vertedouro funcionará na quase totalidade do tempo, extravasando o excesso de água.

Esse tipo de PCH apresenta, dentre outras, as seguintes simplificações:

- dispensa estudos de regularização de vazões;
- dispensa estudos de sazonalidade da carga elétrica do consumidor; e
- facilita os estudos e a concepção da tomada d'água.

No projeto:

- não havendo flutuações significativas do nível de água do reservatório, não é necessário que a tomada d'água seja projetada para atender a depleções do nível de água;
- do mesmo modo, quando a adução primária é projetada através de canal aberto, a profundidade do mesmo deverá ser a menor possível, pois não haverá a necessidade de atender às depleções;
- pelo mesmo motivo, no caso de haver necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio, a sua altura será mínima, pois o valor da depleção do reservatório que entra no cálculo dessa altura, é desprezível;
- as barragens serão normalmente baixas, pois têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução;
- como as áreas inundadas são pequenas, os valores despendidos com indenizações serão reduzidos.

PCH de Acumulação com Regularização Diária do Reservatório

As usinas de acumulação são as que possuem bacia de acumulação de grande capacidade, portanto, permitem operação com regularidade durante todo o transcurso do ano.

Esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência suficiente para suprir a demanda máxima do mercado

consumidor e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto, nesse caso, o reservatório fornecerá o adicional necessário de vazão regularizada.

PCH de Acumulação com Regularização Mensal do Reservatório

Este tipo de PCH considera dados de vazões médias mensais no seu dimensionamento energético, analisando as vazões de estiagem médias mensais, pressupondo-se uma regularização mensal das vazões médias diárias, promovida pelo reservatório.

2.4.2 Centrais quanto ao sistema de adução

Quanto ao sistema de adução, são considerados dois tipos de PCH:

- Adução em baixa pressão com escoamento livre em canal / alta pressão em conduto forçado;
- Adução em baixa pressão por meio de tubulação / alta pressão em conduto forçado.

A escolha de um ou outro tipo dependerá das condições topográficas e geológicas que apresente o local do aproveitamento, bem como de estudo econômico comparativo.

Para sistema de adução longo, quando a inclinação da encosta e as condições de fundação forem favoráveis à construção de um canal, este tipo, em princípio, deverá ser a solução mais econômica.

Para sistema de adução curto, a opção por tubulação única para os trechos de baixa e alta pressão, deve ser estudada.

2.4.3 Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto

As PCH's podem ser ainda classificadas quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto, como mostrado na Tabela 2.1, considerando-se os dois parâmetros conjuntamente, uma vez que um ou outro isoladamente não permite uma classificação adequada.

Tabela 2.1 - Classificação das PCH's quanto à potência 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: ELETROBRÁS - Diretrizes para Estudos e Projetos de PCH

Para as centrais com alta e média queda, onde existe um desnível natural elevado, a casa de força fica situada, normalmente, afastada da estrutura do barramento. Conseqüentemente, a concepção do circuito hidráulico de adução envolve, rotineiramente, canal ou conduto de baixa pressão com extensão longa.

Para as centrais de baixa queda, todavia, a casa de força fica, normalmente, junto da barragem, sendo a adução feita através de uma tomada d'água incorporada ao barramento.

2.5 Arranjos Convencionais de Aproveitamentos Hidrelétricos

Como indicação resumida sobre os arranjos convencionais de aproveitamentos hidrelétricos, cabe fazer a seguinte classificação (Macintyre, 1983):

- Central Hidrelétrica de Derivação;
- Central Hidrelétrica de Desvio
- Central Hidrelétrica de Represamento;

2.5.1 Central Hidrelétrica de Derivação

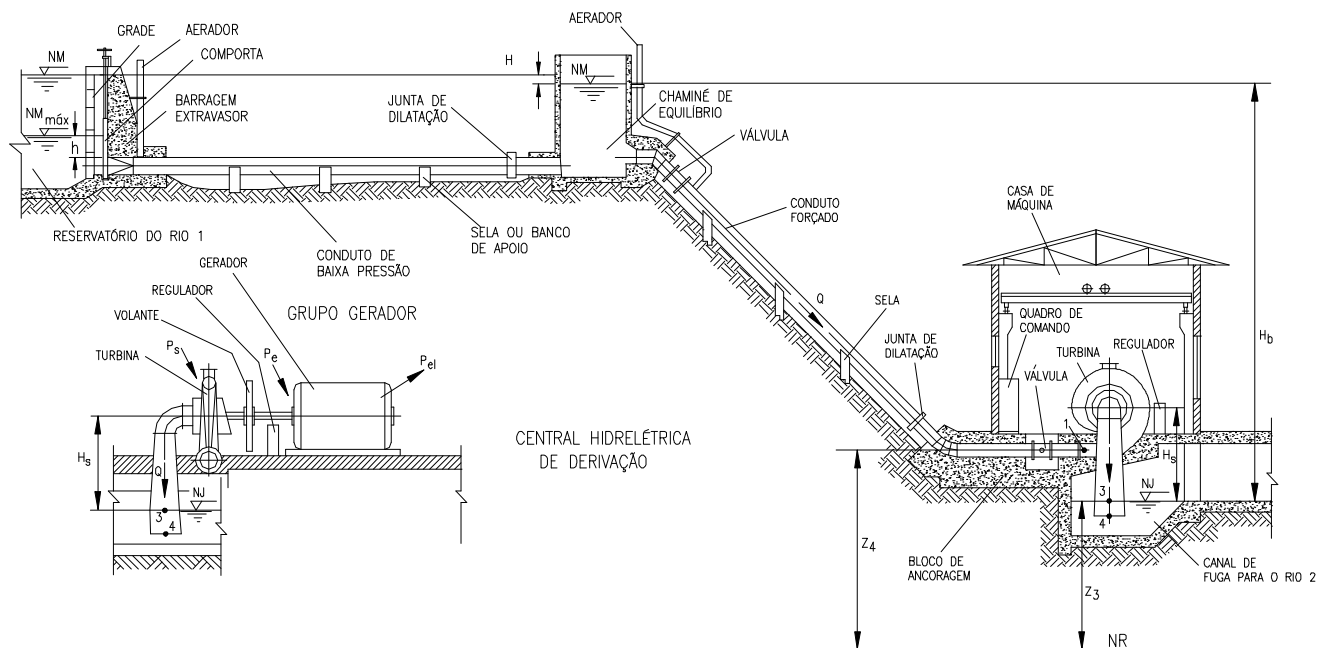
Desvia-se a água do rio e por uma tubulação ou túnel conduz-se a mesma até um reservatório ou um poço denominado “chaminé de equilíbrio”, do qual partem as tubulações até as turbinas, de onde a água segue até um outro rio. Em alguns casos, após a chaminé de equilíbrio, existe uma casa de válvulas, para isolar as tubulações de pressão (conduto forçado) quando necessário, ou realizar a interconexão de sistemas de adução diversos.

Este tipo de instalação apresenta dois trechos de tubulações separadas pela chaminé de equilíbrio: o trecho de baixa pressão, que vai da captação ou tomada d'água até a chaminé de equilíbrio e o trecho de alta pressão que liga a chaminé de equilíbrio à turbina.

A separação da tubulação em dois trechos impede que a onda de sobrepressão na água, provocada pela variação de vazão da turbina, que constitui a essência do golpe de aríete, se propague ao longo do trecho até a tomada d'água. Desta maneira, pode-se ter tubulação com menor espessura de chapa (ou outro material) no trecho mencionado, cujo diâmetro por vezes é consideravelmente maior que o trecho de alta-pressão. Isso resulta em considerável economia na instalação.

A Figura 2.1 abaixo apresenta um corte esquemático de uma Central Hidrelétrica de Derivação, mostrando seus principais componentes:

Figura 2.1 – Corte esquemático de uma Central Hidrelétrica de Derivação



Fonte: Bortoni, E.C., Souza, Z.; Santos, A. H. M.; Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação, 1999.

2.5.2 Central Hidrelétrica de Desvio

Constrói-se uma barragem que permite a água ser conduzida a um canal aberto, um túnel ou uma tubulação que neste caso se liga a uma chaminé de equilíbrio.

Desse ponto, ou de uma tomada d'água, a água é conduzida às turbinas por tubulações forçadas ou túneis forçados. A única ressalva é que, nas usinas de desvio, o rio jusante, onde a água é devolvida após passar pelas turbinas, é o mesmo da captação,

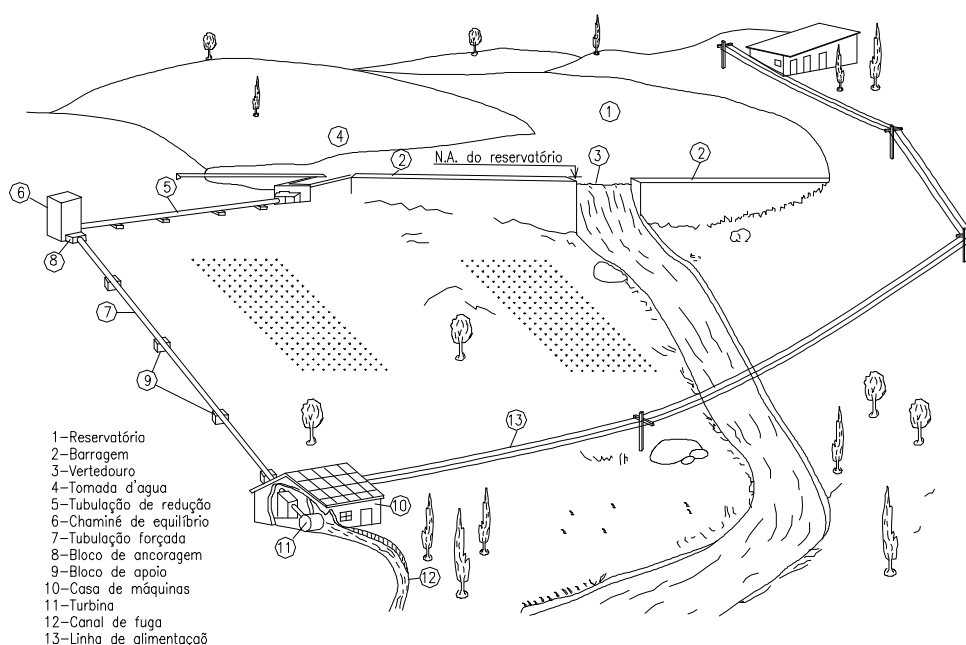
enquanto que nas de derivação o rio é outro. A Figura 2.2 apresenta um esquema de uma Central Hidrelétrica de Desvio.

É o arranjo típico das pequenas centrais e das centrais de altas quedas.

De acordo com Macintyre (1983), pode-se distinguir quatro casos típicos de usinas de desvio:

- Usinas com instalações de turbinas em poço aberto. Parte da água de um rio é desviada para um canal de acesso a céu aberto até o poço de uma instalação aberta de turbina Francis, hélice ou Kaplan. A água, após passar pela turbina, vai pelo tubo de sucção a um poço de escapamento, seguindo depois pelo canal de fuga até o rio, o qual é alcançado já em cota mais baixa.
- De uma barragem, a água é conduzida em canal aberto a uma tomada d'água e, daí, em tubulação forçada até a turbina, e em seguida ao mesmo rio, que se “desenvolveu” até chegar àquela cota mais baixa.
- Da barragem, a água segue em túnel até a tomada e, daí, até a turbina em tubulação forçada, tal como no caso anterior.
- Da barragem a água desce em um túnel na rocha até a turbina, colocada em caverna também na rocha, seguindo, após passar pela turbina, por outro túnel até o rio, já em nível baixo.

Figura 2.2 – Esquema de uma Central Hidrelétrica de Desvio



Fonte: Bortoni, E.C., Souza,Z; Santos, A. H. M.; Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação,1999.

2.5.3 Central Hidrelétrica de Represamento

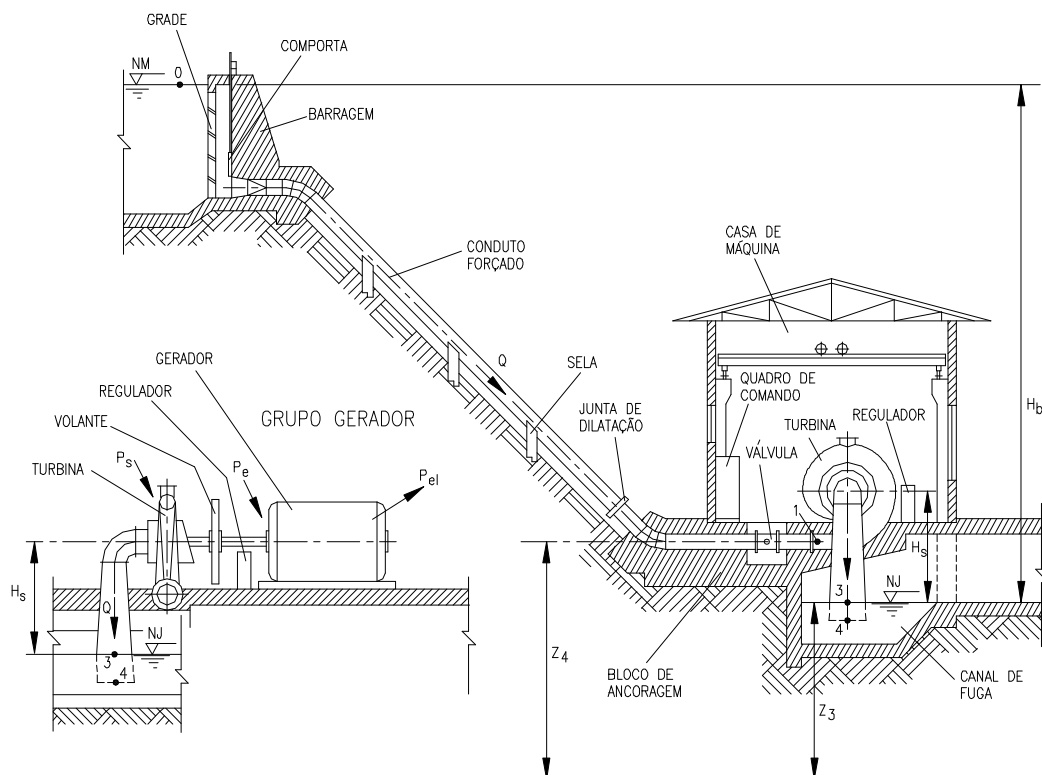
Este é um arranjo típico de centrais de baixa queda.

A Figura 2.3 mostra um corte esquemático de uma Central de Represamento, mostrando seus principais componentes.

Conforme exposto por Souza, Santos e Bortoni (1999), no que refere-se aos componentes, o arranjo Central de Desvio e Central de Derivação em relação ao arranjo da Central de Represamento acrescenta o sistema de baixa pressão que, junto ao sistema de alta pressão, poderá gerar transientes hidráulicos a serem criteriosamente considerados desde o início dos estudos para a implantação da Central Hidrelétrica, a fim de que seu projeto e construção sejam executados de modo que a operação possa ser feita com alto grau de confiabilidade.

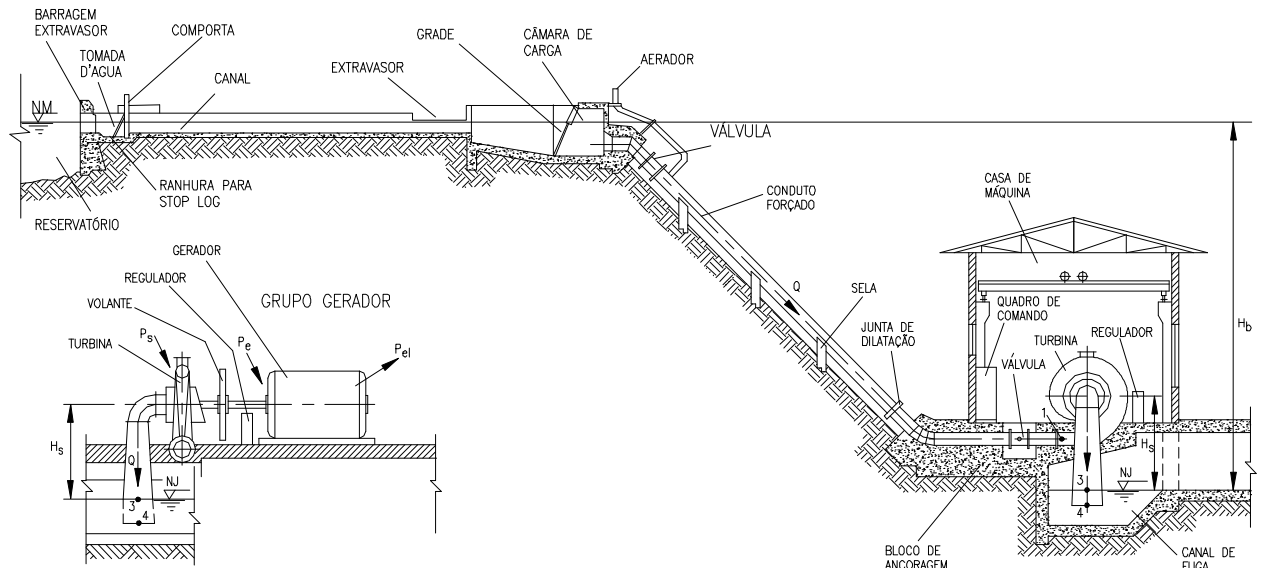
Os sistemas de baixa pressão podem ser compostos de tomada d'água, conduto de baixa pressão e chaminé de equilíbrio, como mostra a Figura 2.1, ou de tomada d'água, canal e câmara de carga com extravasor lateral, como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.3 - Corte esquemático de uma Central de Represamento



Fonte: Bortoni, E.C., Souza, Z.; Santos, A. H. M.; Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação, 1999.

Figura 2.4 – Corte esquemático de uma Central de Desvio



Fonte: Bortoni, E.C., Souza, Z.; Santos, A. H. M.; Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação, 1999.

2.6 Componentes Básicos das Pequenas Centrais Hidrelétricas

Considerando as pequenas centrais hidrelétricas esquematizadas acima, destacam-se os seguintes componentes (Souza, 1992):

A **barragem** é o elemento de uma central responsável em elevar e manter o nível a montante da casa de máquinas. Ela geralmente é composta por: vertedouros, comportas de fundo e desarenadora, válvulas, bacia de dissipação de energia e outros elementos para operação, controle, segurança e manutenção.

A **tomada d'água**, que é o elemento de transição entre a captação e a adução da água é composta por: grades, comportas, “stop logs”, desarenador, limpa grades, orientadores de fluxo, podendo conter vertedouros para cheias e outros elementos de operação, segurança e manutenção.

O **sistema de baixa pressão**, que pode ser composto por canal, túnel, tubulação de baixa pressão ou uma combinação destes elementos. No canal incluem-se outros componentes, tais como: bueiros, eventuais suportes, grades e vertedouros. Nas tubulações há o tubo de aeração, as portas de inspeção, as juntas de dilatação, os blocos de apoio e de ancoragem e as válvulas.

A **câmara de carga**, que é o elemento de transição para o conduto de alta pressão, quando o sistema de baixa pressão é composto por canal. Normalmente ela é composta

por: grades, comportas, “*stop logs*”, limpa grades, orientadores de fluxo, vertedouro lateral, elementos de operação, controle, segurança e manutenção.

A **chaminé de equilíbrio** é utilizada como elemento de transição com o conduto de alta pressão, quando o sistema de baixa pressão é composto por uma tubulação ou um túnel. Assim como a câmara de carga, este componente tem como função atenuar as sobrepressões resultantes de prováveis transitórios hidráulicos.

Os **condutos forçados ou tubulação de alta pressão** que, com suas juntas de dilatação e apoiados em blocos de apoio e de ancoragem, conduzem a água até às turbinas;

A **casa de máquinas ou casa de força** que é composta pelos grupos geradores e acessórios, quadros de comando e proteção, pára-raios, sistema de comunicação, talhas, ponte rolante, sistemas de ventilação e/ou ar condicionado, salas para escritório, baterias, almoxarifado e outros, eventual oficina mecânica e elétrica.

O **canal de fuga** que restitui a água turbinada ao leito natural do rio.

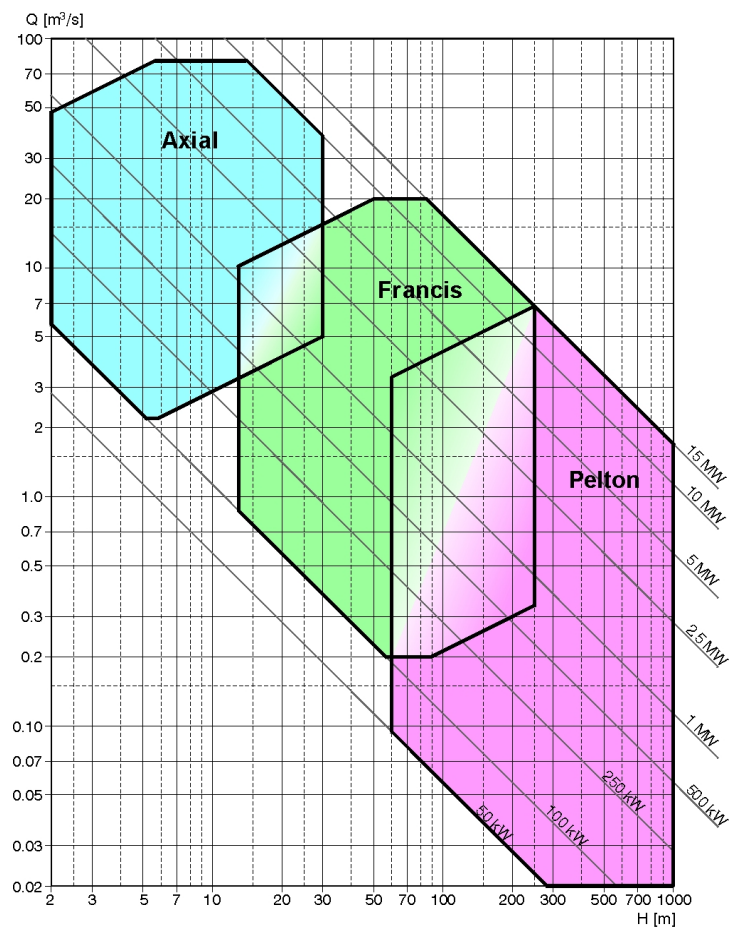
A **subestação elevadora** e seus elementos, tais como: transformadores, disjuntores, chaves, fusíveis e outros.

2.7 Turbinas Hidráulicas Aplicáveis

De acordo com a norma ABNT – NBR 6445 (1987), as turbinas hidráulicas são elementos responsáveis pela transformação da energia hidráulica (potencial), em energia cinética de movimento do rotor e, consequentemente, em energia mecânica de rotação do eixo. Elas são fabricadas em vários modelos e especificações. Ocorre que, para cada condição hidráulica e topográfica da instalação existe uma máquina mais eficiente que as outras. A Figura 2.5 apresenta esta condição, onde o tipo de turbina até a potência máxima de 15 MW é selecionado a partir de valores de altura de queda e vazão.

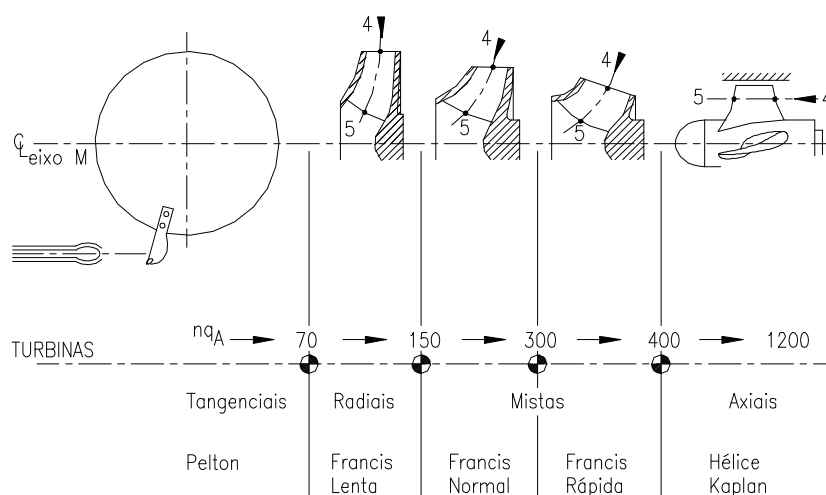
O que se faz é especificar a turbina que melhor se adapte às condições do local onde se deseja instalar a central, através de sua rotação específica, como mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.5: Escolha da turbina em função das condições hidráulicas e topográficas.



Fonte: Catálogo VA TECH Hydro Brasil Ltda

Figura 2.6 – Turbinas Hidráulicas – Rotação Específica



Fonte: Viana, A. N. C.; Máquinas de Fluxo – Apostila, EFEI, 2000

Conforme exposto na Norma ABNT NBR 6445/1987, dentre os vários tipos de turbinas hidráulicas fabricadas no Brasil, tem-se:

Turbina Francis: é uma turbomáquina classificada como de reação, na qual o fluxo d'água penetra radialmente no distribuidor e no rotor, que é o elemento rotativo da turbina hidráulica, onde se transforma a energia hidráulica em trabalho mecânico.

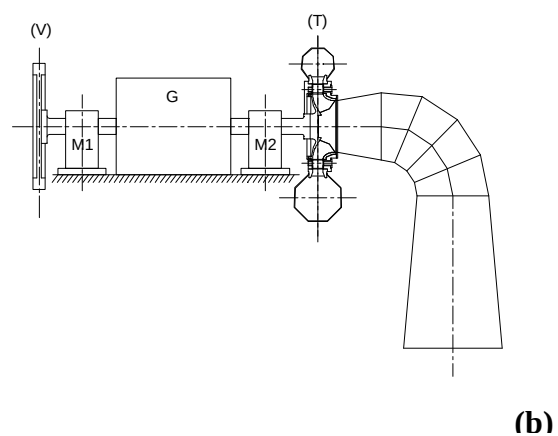
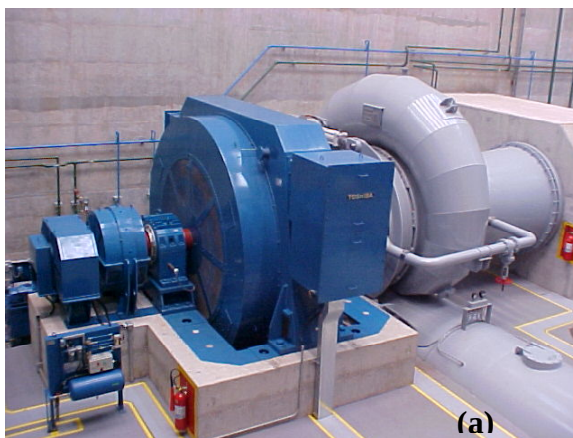
São turbinas rigorosamente centrípetas, e permitem o uso de um tubo, proposto em 1843 por Jonval, para conduzir a água, após sair do rotor, até um poço, tubo este que, pela semelhança com os tubos de aspiração das bombas, recebeu o nome de tubo de sucção ou de aspiração. Esse tubo constitui parte essencial de toda turbina centrípeta e tem como função manter a continuidade da massa líquida em escoamento, desde a saída do rotor até o nível da água do canal de fuga. Consegue-se desde modo um aumento da queda hidráulica e, pela transformação da energia cinética que possui a água ao sair do rotor em energia de pressão, um aumento na potência da turbina.

A Figura 2.7 (a) e 2.7 (b) apresentam arranjos de grupos geradores de PCH's com turbinas do tipo Francis.

É a máquina de maior uso em locais que apresenta quedas e vazões médias. Têm um alto rendimento. Este rendimento é tão mais alto quanto maior for a potência e o acabamento da turbina. Podem ser instaladas, dependendo da altura de queda, em caixa espiral cilíndrica ou em caixa aberta. O rotor, dependendo da rotação específica assumida pode ser classificado como do tipo lento, normal ou rápido, conforme pode ser verificado na Figura 2.6.

Figura 2.7 (a) – Grupo Gerador da PCH Alto Jauru, MT

Figura 2.7 (b) – Desenho esquemático de um grupo gerador com volante de inércia



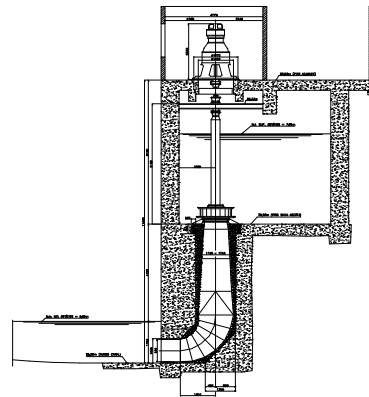
Fonte: VA TECH Hydro Brasil Ltda

Como exposto anteriormente, em função dos arranjos dos seus componentes, as turbinas Francis podem receber diferentes denominações, a saber:

Turbina Francis – caixa aberta: a turbina é instalada num poço ou caixa d'água, ao qual vem ter água conduzida em um canal de adução, havendo geralmente uma comporta ou adufa destinada a pôr a seco a turbina quando se pretender repará-la ou revisá-la.

A Figura 2.8 mostra uma modalidade de instalação aberta. Este tipo de instalação é conveniente apenas para potências e quedas pequenas e sua construção tem menor custo, se comparada com uma turbina Francis com caixa espiral, entretanto o rendimento apresentado não é muito alto.

Figura 2.8 – Turbina Francis Caixa Aberta – Grupo Gerador da MCH Boa Vista, RS

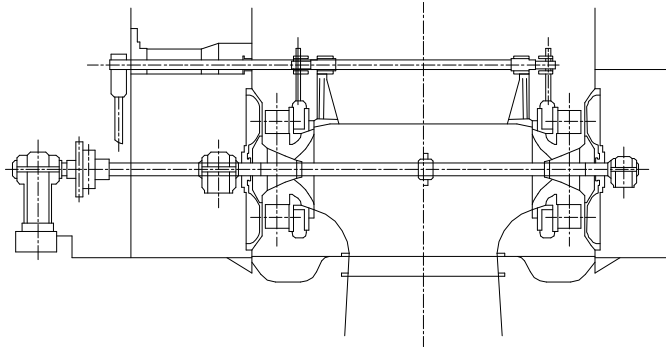


Fonte: Catálogo BEE – Indústria e Comércio de Equipamentos Ltda.

Turbina Francis – caixa espiral cilíndrica: nas turbinas fechadas é usual o emprego de caixa em forma de caracol, também chamada de caixa espiral, para condução da água trazida pelo conduto forçado até o distribuidor. A caixa é projetada de tal forma que garanta descargas parciais iguais em todos os canais formados pelas pás do distribuidor. Para isso, sua seção é gradativamente decrescente no sentido do escoamento. Entre a caixa espiral e o distribuidor são dispostas pás fixas que orientam os filetes em direção à entrada do distribuidor e constituem o chamado pré-distribuidor. A Figura 2.7 apresenta um grupo gerador com turbina Francis com caixa espiral cilíndrica.

Turbina Francis Gêmea: é uma turbina de reação, na qual o fluxo d'água penetra radialmente em dois distribuidores, com rotores simples e independentes, e sai axialmente em sentidos opostos convergentes, por um único tubo de sucção com vazões iguais à soma das vazões admitidas em cada um dos rotores. A Figura 2.9 abaixo mostra um corte esquemático de uma turbina Francis Gêmea.

Figura 2.9 – Turbina Francis Gêmea

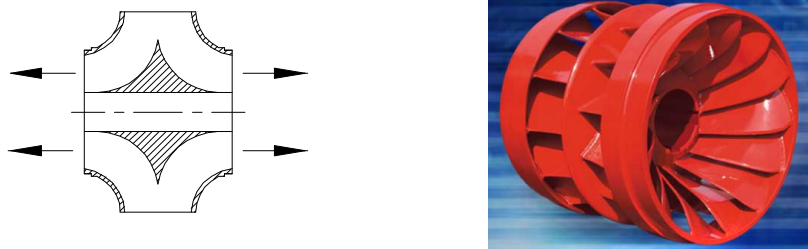


Fonte: Norma ABNT 6445, 1987

Turbina Francis Dupla: é uma turbina de reação, na qual o fluxo d'água penetra radialmente no distribuidor e no rotor duplo, no qual as pás são fixas, e sai axialmente em sentidos opostos divergentes e com vazões iguais, conforme pode ser observado na Figura 2.10.

A Figura 2.11 (a) mostra a casa de força da PCH Alto Fêmeas, com turbinas do tipo Francis de dupla sucção e a Figura 2.11 (b) apresenta uma concepção da linha de eixo de um grupo gerador com turbina do tipo Francis dupla sucção.

Figura 2.10 – Rotor de dupla sucção de uma turbina do tipo Francis



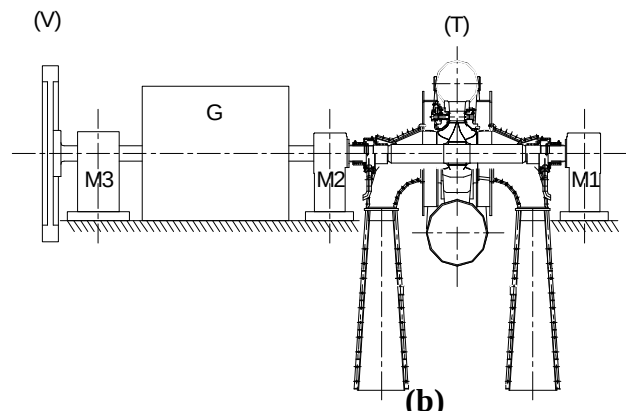
Fonte: Viana, A. N. C.; Máquinas de Fluxo – Apostila, EFEI, 2000

Figura 2.11 (a) – Grupo gerador da PCH Alto Fêmeas, BA

Figura 2.11 (b) – Corte esquemático de grupo gerador com turbina de dupla sucção.



(a)



(b)

Fonte: Catálogo VATECH Hydro Brasil Ltda

Turbina Pelton: é uma turbina classificada como tangencial, que é aquela em que o fluxo passa pelo rotor da máquina de forma tangente ao raio do mesmo; de ação, que são máquinas em que a energia mecânica é obtida pela transformação da energia cinética onde o fluxo d'água incide sob a forma de jato sobre o rotor, possuindo pás em forma de duas conchas. A direção dos jatos é paralelamente em relação ao plano do rotor.

Como toda turbina hidráulica, a Pelton possui um distribuidor e um rotor. O distribuidor é um bocal, de forma apropriada a guiar a água proporcionando um jato cilíndrico sobre a pá do rotor, o que é conseguido por meio de uma agulha chamada de agulha de regularização.

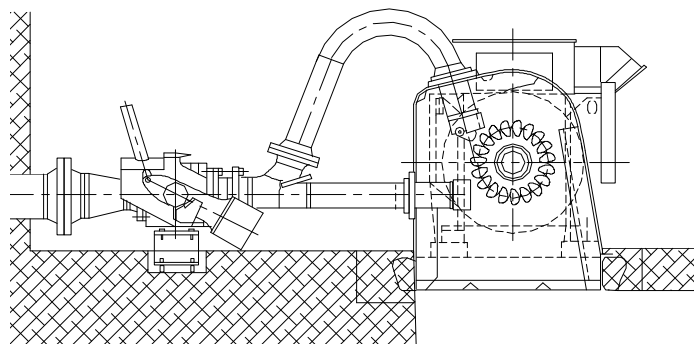
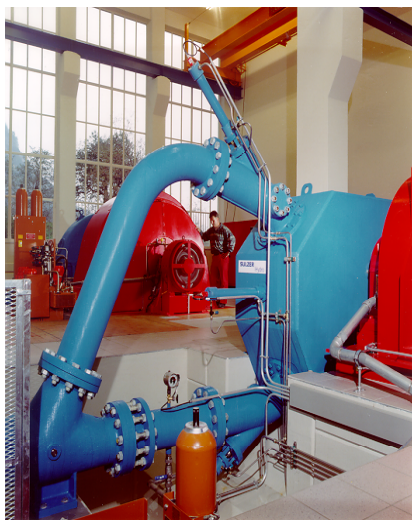
O rotor consta de um certo número de pás com forma de concha especial, dispostas na periferia de um disco que gira, preso a um eixo.

Seu uso mais adequado é para locais onde há altas quedas e pequenas vazões, ou seja, condições de rotações específicas baixas. Apresentam bons rendimentos em locais onde existam grandes variações de carga.

O seu rendimento compara-se ao de uma turbina Francis, com rotor lento. Em função da vazão, ela pode ter um ou mais injetores, sendo dois, o número máximo para pequenas potências e seis para grandes potências.

A Figura 2.12 mostra uma instalação com turbinas do tipo Pelton.

Figura 2.12 – Instalação com turbina do tipo Pelton

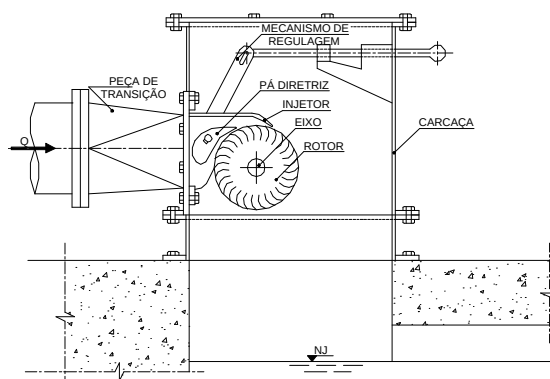


Fonte: Catálogo VATECH Hydro Brasil Ltda

Turbina Michell – Banki: esta turbina também é conhecida como turbina de fluxo transversal ou fluxo cruzado, é uma turbina classificada como tangencial e de ação, na qual o fluxo atravessa o rotor cilíndrico, que é semelhante a uma gaiola de esquilo, transversalmente, com duas passagens pelas pás.

Esta é uma máquina não convencional, largamente utilizada em pequenas potências. É indicada para regiões de pequenos recursos técnicos, pois apresenta simples construção, podendo ser projetada e fabricada com tecnologia simples em oficinas pouco sofisticadas, como mostrada na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Turbinas Michel –Banki

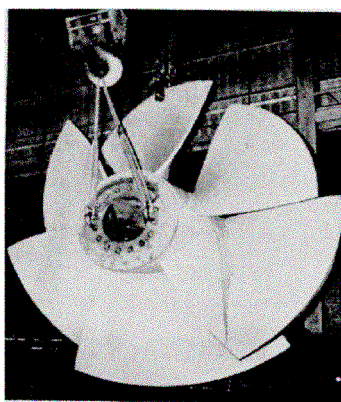


Fonte: Souza, Z., PCH - Tecnologia – Meio Ambiente – Conferência de PCH, Mercado&Meio Ambiente, 2005

Turbina Hélice ou Propeller: é uma turbina classificada como de reação, na qual o fluxo d'água tem direção radial no distribuidor, aproximadamente axial na entrada do rotor, no qual as pás têm passo fixo ou ajustável quando a máquina encontra-se fora de funcionamento.

Estas turbinas nasceram da necessidade de obtenção de turbinas com velocidades consideráveis em baixas quedas e grandes vazões, o que não é viável com as turbinas Francis. O rotor assumiu a forma de uma hélice de propulsão, conforme pode ser observado na Figura 2.14, o que explica o nome dado a essas turbinas. O distribuidor mantém o aspecto que tem nas turbinas Francis, mas a distância entre as pás do distribuidor e as do rotor é bem maior do que a que se verifica para as turbinas Francis de alta velocidade específica. É utilizada em centrais que trabalham com carga de ponta, sem grandes variações de carga.

Figura 2.14 – Rotor de uma turbina Hélice



Fonte: Catálogo VATECH Hydro Brasil Ltda

Turbina Kaplan: é uma turbina classificada como de reação, na qual o fluxo d'água tem direção radial no distribuidor, aproximadamente axial na entrada do rotor, analogamente à turbina hélice, porém, as pás têm passo regulável, podendo ser ajustada em pleno funcionamento. 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. É indicada para baixas quedas e grandes vazões.

Figura 2.15 (a) - Descida do rotor de uma das turbinas da UHE Candonga, MG

Figura 2.15 (b) - Rotor de uma turbina Kaplan



(a)



(b)

Fonte: Catálogo VA Tech Hydro.

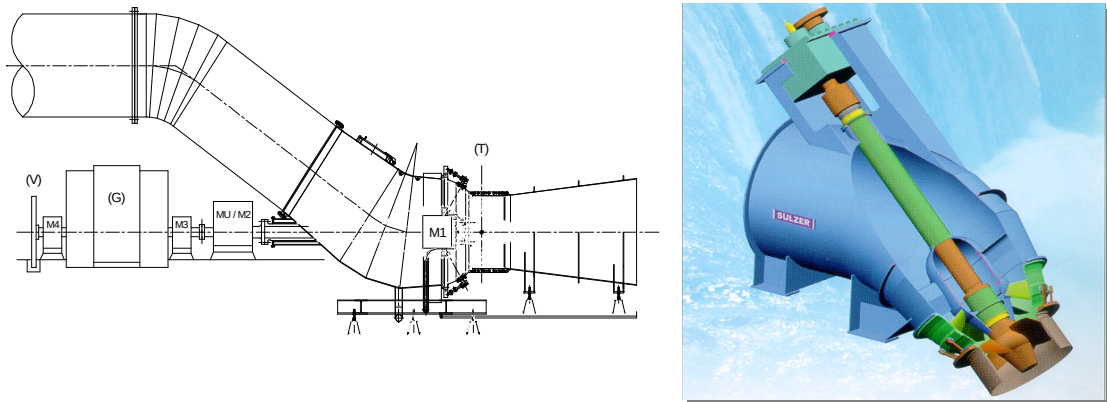
A utilização de desníveis hidráulicos reduzidos pode não ser viável nem mesmo com turbinas Kaplan de eixo vertical. Procuraram, então, os fabricantes soluções com instalações da turbina hélice ou Kaplan com eixo horizontal ou com pequena inclinação, de modo a poderem ser aproveitados desníveis pequenos como ocorre em certas modalidades de usinas a “fio d’água” e em usinas maré-motrizes. Os tipos de turbina que são empregados nestes empreendimentos são:

Turbina Tubular: é uma turbina de reação, do tipo Hélice ou Kaplan na qual o fluxo d’água penetra axialmente no distribuidor e no rotor, onde o gerador está localizado externamente ao fio d’água, como mostrado nas Figuras 2.16 e 2.17.

Nestas turbinas o rotor fica colocado num tubo que une à tomada d’água ao tubo de sucção, não havendo caracol nem bulbo. O eixo pode ser horizontal ou inclinado. Existem três modalidades para estas instalações:

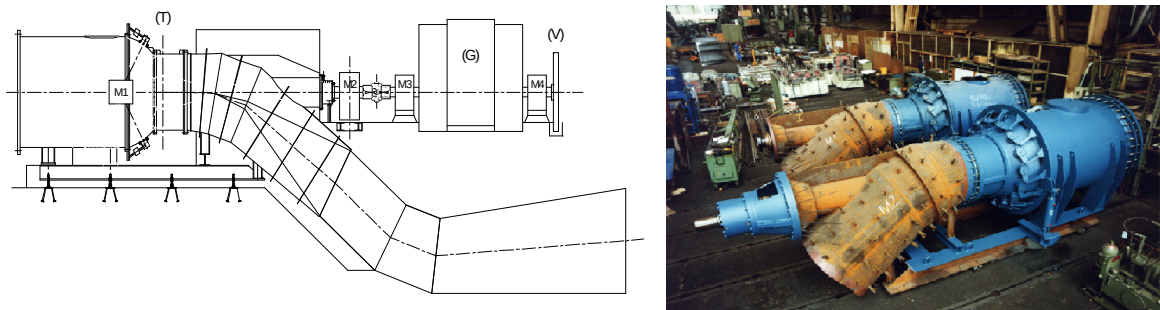
- a) o rotor possuindo pás fixas (Propeller) e o distribuidor pás diretrizes orientáveis;
- b) o rotor com pás orientáveis e o distribuidor com pás fixas;
- c) o rotor e o distribuidor, ambos com pás orientáveis. São os mais perfeitos e permitem o funcionamento reversível da unidade, isto é, como bomba e como turbina (Macintyre, 1983).

Figura 2.16 – Turbina Tubular com o gerador instalado a montante da turbina



Fonte: Catálogo VA TECH Hydro Brasil Ltda

Figura 2.17 – Turbina Tubular com o gerador instalado a jusante da turbina



Fonte: Catálogo VA TECH Hydro Brasil Ltda

Turbina Bulbo: é uma turbina de reação, na qual o fluxo d'água penetra axialmente no distribuidor e no rotor, estando o gerador elétrico contido em uma caixa com o formato de pêra ou de um bulbo, o que dá o nome à turbina, diretamente imerso no fluxo. A Figura 2.18 (a) mostra a descida do cubo do rotor de uma turbina do tipo Bulbo e a Figura 2.18 (b) apresenta um corte esquemático de um grupo gerador com turbina do tipo Bulbo.

A turbina bulbo dispensa a caixa em caracol e o trecho vertical do tubo de sucção. O espaço ocupado em planta é, portanto, menor que o das turbinas Kaplan. Para um mesmo diâmetro do rotor, a turbina bulbo absorve uma vazão maior que a Kaplan, resultando daí maior potência a plena carga. As turbinas bulbo por poderem funcionar como turbinas ou como bombas tem sido empregadas em usinas maré-motrizas.

Figura 2.18 (a) – Descida do cubo do rotor. Fase de montagem de uma das turbinas Bulbo da UHE Igarapava, MG.

Figura 2.18 (b) – Corte esquemático de um grupo gerador com turbinas Bulbo.



Fonte: Catálogo VA TECH Hydro Brasil Ltda

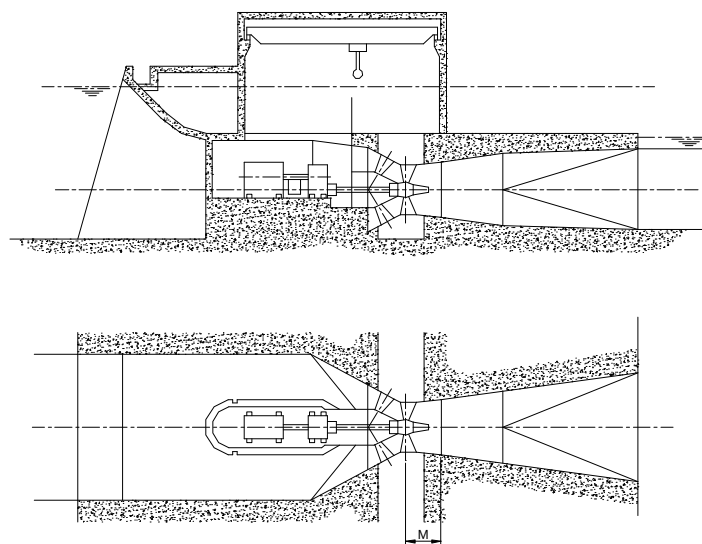
Turbina axial com instalação do gerador em um poço: o gerador é colocado num compartimento cujas paredes podem ser de chapas de aço ou de concreto. A água, para chegar à turbina, circunda o poço onde fica o gerador.

O eixo do gerador pode estar no prolongamento do eixo da turbina ou formar ângulo reto com o mesmo, ficando nesse caso o gerador num poço ou compartimento localizado acima do nível da turbina.

Existem também turbinas tipo bulbo nas quais o gerador elétrico encontra-se externo e posicionado em ângulo, conhecidas como bulbo angular ou bulbo “Pit”.

A utilização de turbinas tipo Bulbo em poço (ou “pit”) é bem adaptada para os aproveitamentos com quedas muito baixas, até aproximadamente 10 m. A implantação compacta reduz o custo das obras civis e do gerador com utilização de multiplicador de velocidade. A Figura 2.19 mostra uma instalação com turbina do tipo Bulbo em poço.

Figura 2.19 – Instalação com turbina do tipo Bulbo em poço (ou “Pit”)



Fonte: Macintyre, J. M., Máquinas Motrizes Hidráulicas, 1983;

2.8 Parâmetros Utilizados na Avaliação de Centrais Hidrelétricas

Utilizando-se alguns dos conceitos existentes nas normas ABNT – NBR 10280 (1988) e ABNT – NBR 6445 (1987), foram selecionadas algumas definições relevantes para a determinação dos parâmetros básicos das condições operacionais das centrais hidrelétricas, são elas:

Vazão da turbina (Q): Volume de água utilizado pela turbina na unidade de tempo, inclusive vazamento nas vedações, tampas e tubulações de equilíbrio, mas excluindo a água utilizada para o funcionamento de máquinas auxiliares, bem como para o arrefecimento dos mancais, em [m³/s].

Vazão garantida (nominal) (Q_r): Vazão da turbina correspondente aos valores garantidos de altura de queda, potência e rotação, em [m³/s].

Vazão em vazio (Q_o): Vazão da turbina em vazio, com rotação nominal e altura de queda garantida, em [m³/s].

Vazão de projeto ou aproveitamento (Q_A): Máxima vazão nominal que pode passar pelo conjunto de unidades geradoras, em [m³/s].

Velocidade média (v): Valor da vazão dividido pela área da seção transversal, em [m/s]. Esta relação pode ser expressa como mostra a equação abaixo:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

Onde:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.3)$$

Onde, A é a área da seção transversal da tubulação em [m²] e D é o diâmetro interno da tubulação em [m], em caso de seções circulares;

Pressão manométrica (p_g): Indicação do manômetro em qualquer ponto do sistema, em [Pa];

Pressão na entrada da turbina (p₁): Pressão manométrica no ponto de medição na entrada, com correção da diferença de altura entre o manômetro e aquele ponto, em [Pa];

Pressão na saída da turbina (p₂): Pressão manométrica no ponto de medição na saída, com correção da diferença de altura entre o manômetro e aquele ponto, em [Pa];

Massa específica da água (r): Massa por unidade de volume d'água utilizada pela turbina, em [kg/m³].

Peso específico da água (γ): Peso por unidade de volume d'água utilizada pela turbina em $[N/m^3]$. Na equação abaixo observa-se esta relação:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.4)$$

Onde, ρ é a massa específica da água em $[kg/m^3]$ e g é a aceleração da gravidade local em $[m/s^2]$.

Altura de pressão (h_p): Altura da coluna d'água equivalente à pressão estática em qualquer ponto da instalação em $[m]$.

Altura dinâmica (h_v): Altura da coluna d'água equivalente ao quadrado da velocidade média, dividido pelo dobro da aceleração da gravidade, em $[m]$. Na equação abaixo é apresentada esta relação:

$$h_v = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.5)$$

Altura potencial(z): Altura de um ponto de medição em relação ao nível do mar ou à outra cota de referência.

Altura total (h_t): Soma das alturas potencial, de pressão e dinâmica numa determinada seção, em $[m]$.

A equação abaixo é utilizada para o cálculo desta grandeza:

$$h_t = z + h_p + h_v \quad (2.6)$$

Altura de queda líquida (H): Queda disponível para atuar na turbina, correspondente à diferença das alturas totais entre as seções de entrada e saída da turbina, em $[m]$.

Altura de queda líquida garantida ou nominal ou de referência (H_n): Altura de queda líquida para a qual a turbina foi encomendada ou construída, em $[m]$.

Altura de queda bruta (H_b): A diferença de cotas entre os limites dos níveis de montante (na captação) e de jusante (canal de fuga) quando a vazão é igual a zero, isto é, com a turbina fora de operação, em $[m]$.

Altura geométrica de sucção (h_s): Diferença de cotas entre o rotor da turbina em relação ao nível de jusante, em $[m]$;

Altura barométrica (h_b): Altura da coluna no local d'água correspondente à pressão atmosférica e temperatura no local, em $[m]$;

Nível d'água (z_m): Altura do nível d'água em relação ao nível médio do mar ou outra cota de referência, em $[m]$;

Nível de água de montante (z_{w1}): Altura do nível da água em relação ao nível médio do mar ou outro nível de referência, a montante do grupo gerador, em [m].

Nível de água de jusante (z_{w2}): Altura do nível da água em relação ao nível médio do mar ou outro nível de referência, a jusante do grupo gerador, em [m].

Posição do medidor de pressão na entrada da turbina (h_1): Nível do medidor de pressão na entrada da turbina com relação ao nível de referência, em [m];

Posição do medidor de pressão na saída da turbina (h_2): Nível do medidor de pressão na saída da turbina com relação ao nível de referência, em [m].

Posição do instrumento de medida (a_1): Diferença de altura entre o nível de referência de calibração do instrumento e a posição do ponto de medição, em [m].

Potência absorvida pela turbina ou potência hidráulica (P_h): Potência equivalente a vazão Q em [m³/s] da turbina sob a queda líquida H em [m], sendo a potência hidráulica em [kW].

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (2.7)$$

Potência fornecida pela turbina ou potência efetiva ou potência de eixo (P_e): Potência mecânica transmitida pelo eixo da turbina, em [kW].

Ela é determinada pela soma:

- a) da potência medida nos terminais do gerador elétrico;
- b) das perdas mecânicas e elétricas do gerador;
- c) no caso de mancal de escora comum: perdas proporcionais aos pesos devidos ao gerador e à turbina;
- d) perdas na engrenagem de transmissão e no volante;
- e) perdas devidas à absorção de potência por equipamentos auxiliares acoplados diretamente;
- f) se for utilizado freio em vez de a e b, a potência será determinada através do freio.

Potência garantida (nominal) (P_r): Potência efetiva da turbina sob a altura de queda líquida nominal H_n em [m], e rotação nominal n em [rpm], para as quais a turbina foi encomendada ou construída, em [kW].

Rendimento da turbina (h_t): É o quociente percentual entre a potência de eixo e a potência hidráulica ou absorvida pela turbina, em [%];

Rendimento médio ponderado da turbina (h_{tw}): Rendimento médio ponderado calculado aritmeticamente a partir dos valores isolados: η_1 , η_2 , η_3 , etc, correspondentes aos

valores de potência garantida ou de vazão garantida, com os respectivos pesos atribuídos: w_1, w_2, w_3 , etc, definidos para essas potências ou vazões, por meio da relação:

$$\bullet_{tw} = \frac{w_1 \bullet_1 + w_2 \bullet_2 + w_3 \bullet_3 \dots}{w_1 + w_2 + w_3} \quad (2.8)$$

Rotação nominal da turbina (n): Velocidade para a qual a turbina foi projetada e construída, em [rpm].

Velocidade de rotação em vazio - sem carga (n_o): Rotação de regime com o gerador excitado, porém operando em vazio depois de ser desligado do sistema, permanecendo o regulador de velocidade em operação.

Velocidade de rotação em disparo (n_R): Rotação máxima atingida com supressão total da potência fornecida pela turbina, admitindo-se conjugado nulo no rotor, mantidas as condições de alimentação de água no rotor.

Velocidade de rotação inicial (n_i): Rotação de regime imediatamente antes da rejeição de uma determinada carga, em [rpm];

Variação de velocidade de rotação permanente (x_n): Variação de velocidade de rotação de regime entre a velocidade de rotação em vazio e a velocidade de rotação correspondente a uma determinada carga, expressa em porcentagem da velocidade de rotação nominal.

$$x_n = 100 \cdot \frac{(n_o - n_i)}{n_r} \quad (2.9)$$

Sobre-rotação (ou sobrevelocidade máxima instantânea) ($n_{m\acute{a}x}$): Rotação máxima instantânea atingida quando determinada carga é bruscamente rejeitada.

Variação da velocidade de rotação máxima instantânea ($(y_n)_{m\acute{a}x}$): Máxima variação instantânea da velocidade de rotação expressa em porcentagem da velocidade inicial, quando uma dada carga é subitamente modificada.

$$(y_n)_{m\acute{a}x} = 100 \cdot \frac{(n_{m\acute{a}x} - n_i)}{n_i} \quad (2.10)$$

Pressão estática sem rotação (P_o): Pressão quando não há vazão, em [Pa];

Pressão instantânea máxima ($P_{m\acute{a}x}$): Máxima pressão instantânea atingida quando uma determinada carga é subitamente rejeitada, em [Pa];

Variação de pressão máxima ($(z_p)_{m\acute{a}x}$): Máxima variação de pressão instantânea expressa em porcentagem da pressão estática quando determinada carga é subitamente modificada.

$$(z_p)_{\text{máx.}} = 100 \cdot \frac{(p_{\text{máx.}} - P_o)}{g \cdot H_b} \quad (2.11)$$

Cavitação: Bolhas de vapor que se formam quando o nível de pressão local cai a um valor próximo daquele da pressão de vapor e que implodem quando o nível da pressão local se eleva acima daquele da pressão de vapor;

Erosão por cavitação: Perda de material produzida pela cavitação;

Número específico de rotações: Conforme exposto por Souza (1991), existem dois tipos de rotação específica, uma relativa a potência, n_s , e outra relativa a vazão, n_q .

A primeira é definida como sendo a rotação de uma máquina semelhante à original que, sob a queda de 1 [m] fornece uma potência de eixo de 1 [kW], expressa na equação abaixo.

$$n_s = n_r \cdot \frac{P_e^{0,5}}{H_r^{1,25}} \quad (2.12)$$

A segunda é definida como sendo a rotação de um grupo ou famílias de turbinas hidráulicas homólogas; igual à rotação da turbina, em [rpm], quando opera sob uma queda de 1 [m] e é atravessada por uma vazão de 1 [m³/s], expressa na equação abaixo. Além das turbinas hidráulicas esta definição é muito usada para identificar as geometrias usadas em bombas hidráulicas, ventiladores e turbocompressores.

$$n_q = n_r \cdot \frac{Q_r^{0,5}}{H_r^{0,75}} \quad (2.13)$$

Existe ainda a rotação específica adimensional que tende a ser usada universalmente para identificar qualquer tipo de geometria, qualquer que seja o fluido de trabalho, mostrada na equação abaixo:

$$n_{qA} = 10^3 \cdot n_r \cdot \frac{Q_r^{0,5}}{Y^{0,75}} \quad (2.14)$$

Onde:

$$Y = H_r \cdot g \quad (2.15)$$

As relações existentes entre os tipos de definições de rotação específica para turbinas hidráulicas são mostradas nas equações abaixo:

$$n_s = 3,13 \cdot \eta_t^{0,5} \cdot n_q \quad (2.16)$$

$$n_s = 0,0329 \cdot \sqrt{\gamma \cdot \eta_t} \cdot n_{qA} \quad (2.17)$$

$$n_{qA} = 3 \cdot n_q \quad (2.18)$$

Alerta-se que as fórmulas para as rotações específicas são aplicáveis a um rotor simples. Caso o rotor seja duplo, utiliza-se $P_e/2$ e/ou $Q/2$. Para rotores em série utiliza-se H/i ou Y/i , onde “i” é o número de rotores em série.

2.9 Considerações Finais

A tecnologia e a prática aconselham formatos apropriados de turbinas hidráulicas para cada conjunto de condições que definem a instalação. A escolha é feita pelo critério rotação específica.

Tem-se constatado que as soluções apresentadas por fabricantes diferentes para um mesmo caso resultam em diferenças surpreendentes no formato dos componentes, sem que os rendimentos sofram sensíveis variações. Isso se observa quando, para uma mesma usina hidrelétrica, dois ou mais fabricantes fornecem, para as mesmas condições, turbinas projetadas segundo o *know-how* próprio de cada um.

Os fabricantes, reunindo os dados coletados, organizam gráficos e tabelas que permitem a escolha do tipo de turbina que melhor se adapte ao valor da rotação específica e fornecem, igualmente, as principais dimensões da *turbina unidade* ou da *turbina padrão*, a partir das quais o projeto se desenvolve.

Teoricamente não é impossível construir turbinas de um tipo qualquer para todas as velocidades específicas, porém a prática do projeto e os resultados obtidos com as turbinas instaladas têm mostrado que cada um dos tipos examinados só pode ser empregado com bom rendimento para valores de rotação específica compreendidos entre determinados limites, o que significa dizer que, de um certo modo, essa grandeza especifica o tipo de turbina a ser usada numa instalação caracterizada pelos valores de Q , H_n e n .

A prática mostra ainda que, para valores dados da queda e da potência, os custos da turbina e da instalação como um todo, diminuem quando a velocidade específica aumenta. Este fato ocorre dentro de certos limites e as razões estão apresentadas abaixo:

1. Valores elevados da velocidade específica podem reduzir as dimensões da turbina a tal ponto que a velocidade da água na entrada do tubo de sucção fique tão elevada que torne difícil a recuperação de sua energia cinética nesse componente, e, em alguns casos, podendo até ocorrer uma baixa tão grande de pressão na entrada do tubo que conduziria a ocorrência do fenômeno de cavitação;

2. Velocidades específicas grandes para quedas elevadas aumentam o custo da construção da turbina e da instalação devido à elevada rotação, geradora de esforços intensos que devem ser equilibrados, destacando-se entre esses os das forças de inércia centrífugas.
3. Velocidades específicas reduzidas, para quedas pequenas, encareceriam o custo do gerador em face de seu baixo número de rotações.

O valor numérico obtido a partir das grandezas H_n , Q e n , denominada rotação específica, indicará o tipo mais conveniente de turbina a ser utilizado, conforme pode ser observado na Figura 2.6, a qual se baseou em turbinas que, instaladas, apresentaram não só bons rendimentos, mas também, por suas reduzidas dimensões, economia em comparação com as de outros tipos.

Capítulo 3

NORMAS APLICÁVEIS A ENSAIOS DE CAMPO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

3.1 Considerações Preliminares

Existe uma diferença entre *ensaio* e *inspeção* de um grupo turbina-gerador (Macintyre, 1983).

A *inspeção* é a verificação por parte do comprador de que as máquinas e os equipamentos estão sendo fabricados ou foram fabricados conforme as especificações estabelecidas por ocasião do contrato. Trata-se, quase sempre, de um acompanhamento da fabricação em todas as suas fases, que pode ir desde a seleção das matérias-primas (em qualidade e quantidade) até a fundição, soldagem, usinagem, montagem, pintura, testes hidrostáticos de estanqueidade, testes não-destrutivos (raios X, ultra-som) e testes de balanceamento estático e dinâmico das partes rotativas.

No *ensaio*, a turbina é posta a funcionar e são medidas as grandezas que caracterizam o seu funcionamento, ou seja, a vazão, a potência e a altura de queda. Com esses parâmetros calculados é possível avaliar as condições de funcionamento e comportamento da unidade.

Em ensaios de campo de turbinas hidráulicas, as normas que regem a sua realização são:

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

As Normas apresentadas acima têm o mesmo objetivo, ou seja, apresentação das regras necessárias para a realização dos ensaios de campo, definindo termos e apresentando os diversos métodos de medição das grandezas necessárias para o cálculo do seu rendimento, sendo elas, a vazão, a altura, a potência elétrica, a pressão e rotação.

As Normas diferem uma das outras com relação à faixa de variação permitida para a obtenção das grandezas e preparação para a realização dos ensaios.

E diferem também, com relação aos métodos de medida das grandezas, principalmente os métodos para obtenção da vazão.

Neste capítulo serão abordadas as normas citadas, que são utilizadas em ensaios de campo de turbinas hidráulicas e as particularidades de cada uma.

3.2 CEI / IEC 60041 (1991) –“ Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines” da “International Electrotechnical Commission” (I.E.C.).

A terceira edição da norma internacional publicada em francês e inglês em 1991 – CEI / IEC 41 –91-11 – Essais de réception sur place des turbines hydrauliques, pompes d’accumulation et pompes turbines, en vue de la détermination de leurs performances hydrauliques / Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines” trata dos ensaios de turbinas hidráulicas, bombas de acumulação e bombas-turbinas.

Esta Norma abrange os preparativos para os testes de campo, que tem como finalidade, determinar se as garantias contratuais foram atendidas. Contém as regras para condução destes ensaios e as medidas a serem tomadas no caso de contestação na condução dos ensaios.

A CEI / IEC60041 é a norma mais solicitada em ensaios de campo, pois possui algumas vantagens significativas, apresentadas a seguir:

- Possibilidade de implementação computacional, com a utilização de transdutores de pressão, de nível e outros;
- Apresenta um capítulo onde recomenda que podem ser utilizados para ensaios, desde que acordado entre as partes, métodos de medida que resultem menor precisão do que os recomendados. Entre estes métodos são citados e descritos, por exemplo, para vazões o de Winter-Kennedy para as turbinas hidráulicas com caixa espiral, o de pressão diferencial para as turbinas Bulbo, permitindo também a utilização dos métodos acústicos ou ultrassônicos.
- Apresenta uma série de anexos entre os quais destacam-se os da determinação das incertezas das medições de suas combinações, eliminação de resultados aberrantes, isto é, afastados do valor mais provável, análise de incertezas aleatórias em ensaios dentro de condições constantes e outras.
- Apresenta um capítulo sobre o *Index Test*, método por onde obtém-se o rendimento relativo da turbina;

- Apresenta também um capítulo sobre o Método Termodinâmico, no qual o rendimento é obtido de uma maneira direta através do aumento da temperatura da água devido às perdas: Neste método não é necessária a medida da vazão, sendo esta a sua principal vantagem. Devido à falta de uniformidade nos valores medidos nas seções de referência da máquina e às limitações dos equipamentos de medida, a faixa de aplicação deste método é limitada e pode apenas ser utilizada para energia hidráulica específica de até 1.000 J/kg (altura de queda bruta de até 100[m]). No caso de pequenas centrais hidrelétricas, o método termodinâmico não é um método utilizado com frequência e não será abordado neste trabalho.
- A energia por unidade de massa, conhecida como energia específica é utilizada na CEI / IEC 60041 (1991) como um termo primário ao invés da energia por unidade de peso local, a altura de queda, que é o termo mais comumente utilizado.

Na execução dos ensaios, a CEI / IEC 60041 (1991) estipula que sejam computados no mínimo seis e preferencialmente oito pontos para a elaboração da curva de rendimento. Cada ponto deverá ser obtido através de um ou mais ensaios. O número de medidas realizadas durante o ensaio depende do método utilizado, mas para um tratamento estatístico pelo menos cinco leituras de instrumentos de medida direta deverão ser feitas.

3.3 NBR 11.374 / NB 228 (1990) – Turbinas Hidráulicas – Ensaios de Campo

Esta norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é baseada na CEI / IEC 60041 e também descreve os ensaios de campo necessários à determinação do desempenho de turbinas hidráulicas, determinando regras para sua condução e apresentando medidas a serem tomadas em casos de contestação da condução dos ensaios, além de tratar da maneira como devem ser calculados os resultados e as diretrizes para o preparo do relatório final.

É aplicável, de modo geral, a turbinas de qualquer tamanho ou tipo, de reação ou de ação. Em particular, é aplicável a turbinas acopladas diretamente ao gerador de energia elétrica.

Contém um anexo onde apresenta sua correspondência com a Norma IEC 60041.

A NB 228 (1990), apresenta os métodos na maneira clássica, isto é, com medidas diretas, aparelhos específicos e não permite o uso de transdutores e pacotes computacionais para a captação dos resultados, por estes motivos, atualmente não é uma norma muito utilizada como parâmetro na realização de ensaios de campo de PCH.

3.4 ASME PTC 18 (1992) – “Hydraulic Turbines - Performance Test Codes”

A Norma americana ASME PTC 18 (1992) “Performance Test Codes” é uma revisão da PTC 18-1949 da American Society of Mechanical Engineers sendo também bastante utilizada como parâmetro para a determinação de desempenho de turbinas hidráulicas.

Na PTC 18 (1992), os valores limites de incerteza não são mais que $\pm 1,2\%$ no cálculo da potência da turbina e $\pm 2,0\%$ no cálculo do valor do rendimento.

Assim como a CEI / IEC 60041 (1991), também permite o uso de instrumentos eletrônicos e equipamentos para aquisição de dados. Estes instrumentos e técnicas podem ser utilizados com as devidas considerações com a frequência das respostas, janelas de dados, instrumentos e sistemas de precisão e outros problemas pertinentes.

O “Index Test” é normalizado pela PTC 18 (1992), sendo realizado nos casos onde não é possível a realização dos testes de desempenho pelos métodos convencionais e apresenta o método ultrassônico por tempo de trânsito para a medição da vazão.

Os limites de flutuação de potência, rotação e queda são os mesmos da NB228(1990) e IEC 60041 (1991), ou seja:

§ $\pm 1,5\%$ da Potência Média;

§ $\pm 1,0\%$ da Altura Média;

§ $\pm 0,5\%$ da rotação

A PTC 18 (1992) permite uma maior variação dos valores medidos com relação ao valores garantidos, ou seja, a rotação nominal n e queda líquida nominal H_n para cada ensaio individual pode desviar de n_r e H_r não mais do que $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, respectivamente e a taxa $\frac{n}{\sqrt{H_n}}$ com relação a $\frac{n_r}{\sqrt{H_r}}$ não mais do que 1% .

Enquanto na NBR 11.374 / NB 228 (1990) estes valores são: variação da altura de queda líquida nominal com relação ao seu valor garantido: $\pm 3\%$ e variação da rotação com relação ao seu valor garantido: $\pm 1,5\%$. A variação da altura de queda líquida nominal com relação a garantido em $\pm 10\%$ só é permitida, se for ajustada de acordo com a fórmula:

$$\frac{n}{n_r} = \sqrt{\frac{H_n}{H_r}} \quad (3.1)$$

3.5 Considerações Finais

Em contratos de fornecimento e especificações técnicas de turbinas hidráulicas, normalmente é incluída uma cláusula declarando em qual Norma os ensaios de aceitação devem ser executados, sendo que, se houver ressalvas com respeito à Norma escolhida, elas devem ser indicadas com clareza.

São incluídas também as decisões relativas à escolha, tanto do ensaio de campo como do ensaio em modelo. Quando houver qualquer previsão para ensaios de campo, e na eventualidade de qualquer impossibilidade de sua realização, os ensaios em modelos podem ser definidos em um acordo suplementar antes da assinatura do contrato.

Em PCH's, devido ao alto custo do ensaio de modelo é usual a aceitação por parte do cliente da apresentação de um relatório transposto do ensaio do modelo reduzido para o protótipo quando a turbina possui o mesmo perfil hidráulico de um modelo já ensaiado. Neste caso, o ensaio de campo torna-se necessário para a verificação do diagrama de rendimentos e comprovação da faixa operativa da unidade. Isto faz com seja mais importante ainda à verificação das condições de ensaio e a definição dos métodos de medida das grandezas quando da elaboração do projeto básico.

Capítulo 4

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TURBINA HIDRÁULICA

4.1 Considerações Preliminares

Neste capítulo será apresentado um procedimento operacional geral para a realização de um ensaio de campo em turbinas hidráulicas independente da norma adotada para a sua realização.

Em seguida, será apresentado um roteiro para a determinação das grandezas que caracterizam o funcionamento das turbinas e o equacionamento de suas incertezas associadas.

Serão descritos também os diferentes métodos de medição destas grandezas e as principais vantagens e desvantagens de cada método na utilização em ensaios de campo de turbinas hidráulicas de PCH's.

4.2 Procedimento geral para a realização de ensaios de campo em turbinas hidráulicas

Os ensaios de campo em turbinas hidráulicas normalmente são realizados após a usina estar operando comercialmente e compete ao comprador decidir, de acordo com as exigências da usina e as condições de vazão, sobre a data de sua realização.

De acordo com as normas aplicáveis a ensaios de campo de turbinas hidráulicas apresentadas no capítulo anterior, os seguintes pormenores devem ser observados quando da realização dos ensaios:

- Desvios admissíveis nas condições especificadas

Na prática, a operação da usina implica certas variações da altura de queda. É, pois, aconselhável indicar ao fornecedor, ao lançar uma concorrência, os valores revistos de altura de queda normal, mínima e máxima, para as quais deve-se aplicar as garantias de potência e de rendimento. Existindo durante os ensaios desvios das condições contratuais, estes desvios devem permanecer entre os seguintes limites, como segue:

- As flutuações da potência não devem exceder a $\pm 1,5\%$ da potência média;
- As flutuações da altura de queda não devem exceder a $\pm 1\%$ da altura de queda média;

- As flutuações de rotação não devem exceder a $\pm 0,5\%$ da rotação média;

Os limites apresentados acima encontram-se definidos nas normas estudadas, sendo elas a NBR 11374 / NB 228 (1990), PTC 18 (1992) e CEI/IEC 60041 (1991).

- Variação da altura de queda especificada ou garantida

De acordo com a NBR 11.374 / NB 228 (1990), durante todo o ensaio, a altura de queda média (rotação) para cada ensaio individual não deve variar além de $\pm 3\%$ (1,5%) de seu valor garantido, se a rotação (altura de queda) for mantida no valor garantido.

A altura de queda pode variar no máximo até $\pm 10\%$ do valor garantido se a rotação nominal n for ajustada, segundo a fórmula:

$$\frac{n}{n_r} = \sqrt{\frac{H_n}{H_r}} \quad (4.1)$$

Se não for possível ajustar a rotação para adaptá-la às flutuações de altura de queda acima de $\pm 3\%$, pode ser feita a correção dos resultados do ensaio mediante acordo mútuo, para as variações da altura de queda e/ou rotação, utilizando-se para este fim as curvas dos ensaios em modelo, se existirem. Entretanto, dispondo-se de um número suficiente de valores garantidos obtidos para diferentes alturas de quedas, os valores correspondentes da altura de queda garantida e os valores correspondentes de potência e de rendimento serão determinados por interpolação.

- Nível de Jusante

Para as turbinas de reação, o nível de jusante não deve ser inferior àquele que corresponde à altura máxima de sucção especificada no contrato. Se a altura de queda real diferir da altura de queda garantida, as condições de cavitação calculadas para esta altura de queda não devem ser piores que aquelas indicadas para a altura de queda garantida.

Independente da Norma utilizada para determinação das garantias contratuais em turbinas hidráulicas, o procedimento abaixo deve ser obedecido:

4.2.1 Preparação dos Ensaio

Todos os desenhos considerados de importância para os ensaios, assim como todos os dados, documentos, especificações, certificados e relatórios sobre as condições operacionais devem ser colocados à disposição do responsável pelos ensaios.

Deve ser definido se diversas unidades precisam ser ensaiadas ou somente uma, de um grupo de turbinas idênticas, para determinar o rendimento.

A turbina deve ser submetida a uma inspeção com a finalidade de assegurar que:

- a) o equipamento está completo, de acordo com as especificações;
- b) as passagens d'água não estão obstruídas ou reduzidas pela presença de corpos estranhos;
- c) todas as tomadas de pressão, tubos manométricos e tubos de ligação estão desobstruídos e convenientemente colocados e instalados.
- d) as indicações das escalas graduadas referentes às aberturas do distribuidor ou do injetor e dos ângulos das pás correspondem às medições realmente feitas;
- e) nenhum desgaste anormal se produziu nas partes vitais.

4.2.2 Detalhes de medição

Os métodos a serem utilizados para medir a vazão, potência e altura de queda devem ser indicados.

É recomendado que durante o projeto da usina seja dada atenção adequada às necessidades para realização dos ensaios. Isto aplica-se particularmente para o arranjo de medição da vazão e altura de queda. O método para medição da vazão deve ser analisado e escolhido neste estágio. As condições dos ensaios devem, também, ser consideradas quando o eventual comprador ou seu projetista lançar os editais de concorrência para os possíveis fornecedores.

4.2.3 Instrumentos

Todos os instrumentos que não podem ser calibrados no local dos ensaios devem ter certificados recentes de calibração expedidos por órgão oficial. Após o término dos ensaios, os instrumentos devem ser novamente calibrados, a não ser que dispensado por acordo mútuo. A data e local da calibração devem ser igualmente mencionados no relatório final, assim como o nome do fabricante e do proprietário e número de fabricação.

4.2.4 Determinação das Grandezas e das Incertezas das Medidas

Uma turbina é projetada para atender a valores prefixados da vazão Q , da altura de queda líquida H e da rotação nominal n .

Para esse conjunto de valores, deverá funcionar com o rendimento total h_t .

As grandezas que caracterizam o funcionamento de uma turbina são:

- a) a queda líquida **H**, expressa em metros;
- b) a vazão **Q**, expressa em m³/s;
- c) a rotação nominal **n**, expressa em rpm;
- d) a potência de eixo **P_e**, em kW;
- e) o rendimento da turbina **h_t** em [%]

4.2.4.1 Roteiro para Determinação das Grandezas

- a) Determinação do Rendimento da turbina

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_h} \quad (4.2)$$

Onde:

η_t [%] – rendimento da turbina;

P_e [kW] – potência de eixo;

P_h [kW] – potência hidráulica;

- b) Determinação da potência de eixo da turbina

$$P_e = \frac{P_{el}}{\eta_G} \quad (4.3)$$

Onde:

η_G [%] – rendimento do gerador;

P_{el} [kW] – potência elétrica ativa do gerador;

P_e [kW] – potência de eixo da turbina;

Em ensaios de campo de PCH's, é comum a utilização da curva de rendimento do gerador, fornecida pelo seu fabricante para a determinação do seu rendimento. Esta curva é gerada através de ensaios realizados em fábrica.

A potência elétrica deverá ser obtida através de um dos métodos apresentados neste trabalho no item. 4.3.4.1.

c) Determinação da Potência Hidráulica

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (4.4)$$

Onde:

P_h [kW] – potência hidráulica da turbina;

ρ [m³/kg] – massa específica da água;

g [m/s²] – aceleração da gravidade;

Q [m³/s] – vazão da turbina;

H [m] – altura de queda líquida;

d) Determinação da altura de queda líquida nominal

Em toda instalação de turbina, a água é captada em uma certa cota; é aduzida à turbina; passa pelo seu interior e é abandonada em cota inferior à primeira. Uma instalação de turbina supõe, portanto, sempre, um desnível hidráulico natural ou criado artificialmente por meio de barragem, eclusa, ou obra de derivação para captação e condução da água à turbina, situada sempre em nível tão baixo quanto possível em relação à captação.

A queda líquida nominal ou disponível é a queda hidráulica para a qual a turbina é encomendada e, portanto, com a qual deverá proporcionar o máximo rendimento, sendo designada por H_n . Com este valor de queda, a turbina gira com o número de rotações nominal do gerador e desenvolve sua potência nominal sob a vazão especificada.

As Figuras de 4.1 a 4.6, retiradas da NBR 11374 / NB 228 (1990) e Macintyre (1983) apresentam algumas instalações típicas de turbinas nas quais são indicadas como determinar a altura de queda líquida nominal.

Nas Figuras apresentadas acham-se marcadas as grandezas representativas da posição dos pontos de entrada e saída da turbina, das pressões e das velocidades, acima de um plano arbitrário de referência, P.R. A queda líquida é obtida calculando-se a diferença entre os trinômios de Bernoulli aplicados à entrada (ponto 1) e à saída (ponto 2) da turbina.

Instalação com Turbina de Reação (Francis, Hélice e Kaplan)

O ponto “1” corresponde à entrada e o ponto “2” à saída da turbina.

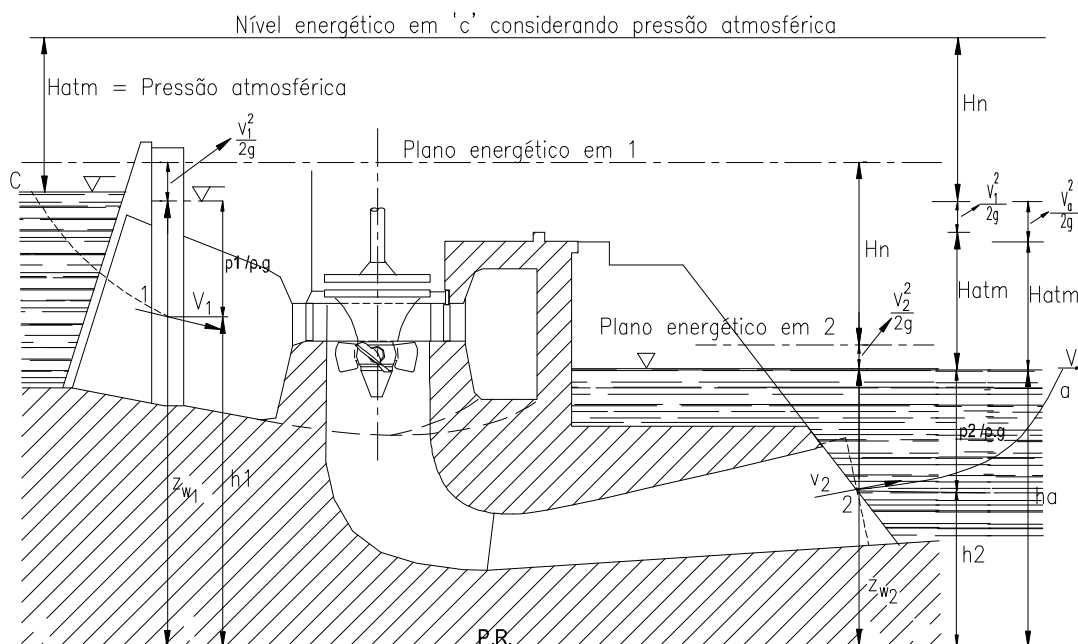
$$H_n = (z_{w1} - z_{w2}) + \frac{Q^2}{2 \cdot g} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) \quad (4.5)$$

Pode-se admitir que entre a superfície livre na captação em **C** e o ponto “**1**” não haja perda de carga apreciável e, que portanto, o nível energético é o mesmo em **C** e em **1**. Além disso, se for admissível desprezar a velocidade em **C**, vê-se que, para a água adquirir a velocidade $\frac{v_1^2}{2g}$ em **1**, haverá uma redução na altura representativa da pressão no ponto **1**, igual a esse valor $\frac{v_1^2}{2g}$.

Analogamente, pode-se supor que entre **2** e **a**, no canal de fuga, não haja perda de carga, de modo que o nível energético em **2** e em **a** seja o mesmo.

A vantagem de considerar os pontos **c** e **a** é dispensar a determinação das velocidades em **1** e **2**.

Figura 4.1- Desenho representativo de uma turbina de reação (Francis, Hélice, Kaplan) - Caixa espiral de seção retangular em concreto: tubo de sucção curvo.



Fonte: Norma ABNT NB 228 (1990)

À saída do tubo de sucção, a água possui velocidade v_2 , de modo que o nível energético no ponto 2 será:

$$h_2 + h + \frac{v_2^2}{2g} + H_{\text{atm}} \quad (4.9)$$

Analogamente ao suposto acima pode-se admitir, sem erro sensível, que a água ao escoar de 2 até o ponto “a” no canal de fuga não perde energia, de modo que pode-se adotar esse ponto “a” como saída “convencional” da turbina, o que às vezes é preferível, por ser mais fácil a medição da velocidade do escoamento da água em “a” do que em 2.

A queda disponível pode ser assim calculada:

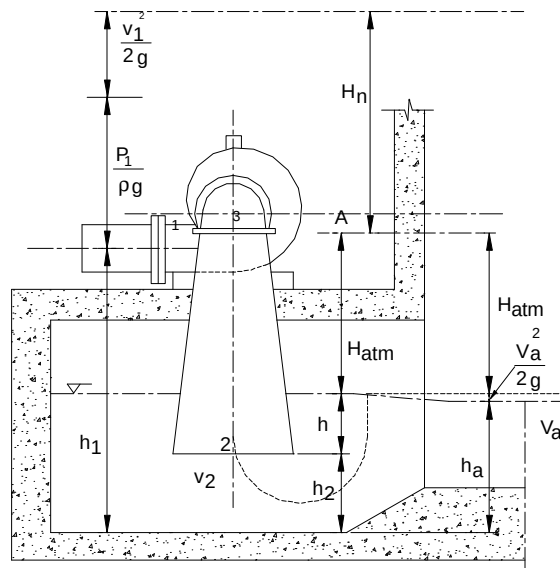
$$H_n = H_b - \frac{Q^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} \right) \quad (4.10)$$

Instalação com Turbina Francis com tubo de sucção reto

Aplicando a equação da conservação da energia desde a entrada da caixa espiral da turbina até o início do canal de fuga, tem-se para a queda líquida nominal neste tipo de instalação fechada:

$$H_n = h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{Q^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) - h_a - H_{\text{atm}} \quad (4.11)$$

Figura 4.5 – Instalação de turbina fechada com tubo de sucção reto

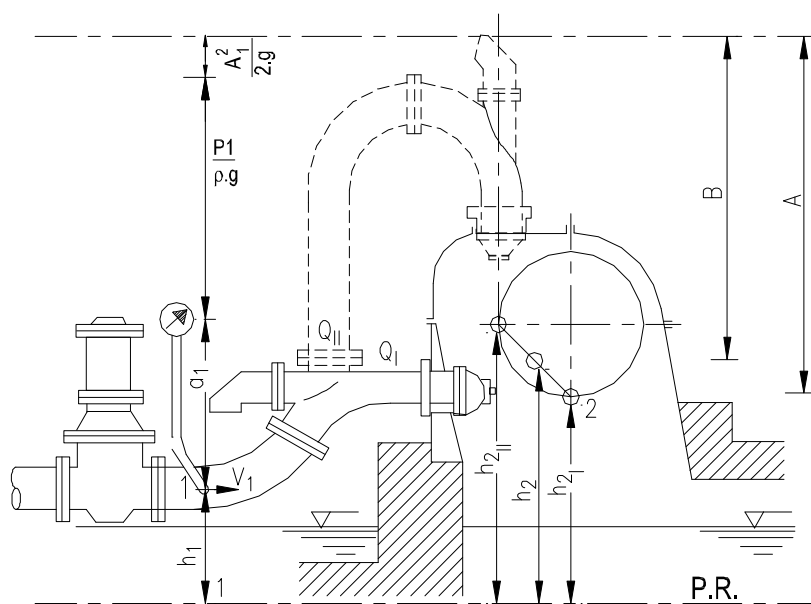


Fonte: Norma ABNT NB 228 (1990)

Instalação com Turbina Pelton

Da Figura 4.6, considera-se como entrada da turbina o ponto 1, situado na ligação do trecho curvo que termina no bocal com a tubulação de pressão. Como saída, admite-se o ponto 2 à saída da pá.

Figura 4.6 – Desenho representativo de uma turbina de ação (Pelton)



Fonte: Norma ABNT NB 228 (1990)

A = com um injetor:

$$H_n = h_1 + a_1 + 10 \cdot \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - h_2 \quad (4.12)$$

B = com dois injetores em cotas diferentes:

$$H_n = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_{11}} \left(h_1 + a_1 - h_{2_1} \right) + \frac{Q_{11}}{Q_1 + Q_{11}} \left(h_1 + a_1 - h_{2_{11}} \right) + 10 \cdot \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (4.13)$$

$h_{2_{11}}$ é a cota da pá onde incide o jato do bocal vertical. A cota média de saída da turbina é:

$$\frac{h_{2_1} + h_{2_{11}}}{2} \quad (4.14)$$

e) Determinação da Pressão

A pressão na entrada da turbina deverá ser obtida através de um manômetro ou transdutor de pressão.

Quando um manômetro é utilizado, a pressão é obtida através da seguinte equação:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} = h_m + a_1 \quad (4.15)$$

Onde:

h_m – pressão lida no manômetro em kgf/cm^2 ;

a_1 – cota do ponto 1 de entrada da turbina até o centro do medidor em metros.

Para utilização do transdutor de pressão, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} = (a \cdot I + b) + a_1 \quad (4.16)$$

Onde:

$(a \cdot I + b)$ [m] – equação em função da corrente I obtida na calibração em laboratório ou em campo do transdutor de pressão;

a_1 – cota do ponto 1 de entrada da turbina até o sensor do transdutor em metros.

A medida de pressão em ensaios de campo será mais bem detalhada no item 4.3.3 deste trabalho.

f) Determinação da Vazão

A vazão turbinada deverá ser obtida por um dos métodos apresentados neste trabalho no item 4.3.1.

g) Determinação da Massa Específica da Água (ρ)

A massa específica da água deverá ser determinada através de tabelas normalizadas, em função da pressão absoluta e temperatura no local de ensaio.

h) Determinação da Aceleração da Gravidade (g)

A aceleração devido à gravidade é uma função da latitude (ϕ) e altitude do local do ensaio (z) e pode ser obtida através de tabelas normalizadas ou através da equação:

$$g = 9,7803 \left(1 + 0,0053 \sin^2 j \right) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot Z \quad (4.17)$$

4.2.4.2 Equacionamento da Incerteza das Medidas Realizadas

Quando se relata o resultado de uma medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada uma indicação quantitativa e qualitativa do resultado de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar, comparar e expressar adequadamente um resultado de um conjunto de medidas em eventos cujas condições locais sejam diferentes daquelas adotadas e/ou controladas por outros experimentadores. A indicação qualitativa é dada em função da incerteza da medida da grandeza física em estudo, obtida por instrumentos adequados e aferidos por norma de metrologia de forma que os testes possam ser repetidos com confiança nos valores. A indicação quantitativa é dada em função do número de medidas / leituras realizadas em eventos espaço-tempo diferentes de forma que sejam avaliadas as influências das condições ambientes locais nas características inerentes a cada grandeza em estudo.

A experiência com ensaios em um grande número de turbinas hidráulicas tem demonstrado que as imprecisões que ocorrem ao medir a altura de queda líquida, a vazão, a potência e a velocidade muitas vezes podem se compensar, porém, em certos casos, podem ser cumulativas. Quando um determinado ensaio for executado de acordo com a Norma NBR 11374 / NB 228 (1990), por exemplo, a incerteza global média resultante no valor de η_t pode ser entre $\pm 1\%$ e $\pm 2\%$. O valor desta incerteza global de medida pode ser estabelecido no contrato com a devida consideração dos métodos a serem adotados. Ao comparar os resultados dos ensaios de recepção com os valores de garantia, deve ser levado em consideração o efeito da imprecisão de medida sobre η_t .

Para efeito de cálculo na realização dos ensaios, as incertezas são determinadas com base nos procedimentos de cálculo de incertezas do “Guia para Expressão da Incerteza de Medição”, INMETRO (2003). No Anexo III, é exposto um resumo dos principais conceitos relevantes ao cálculo das incertezas das grandezas características do comportamento das turbinas hidráulicas.

De acordo com o “Guia para expressão da incerteza de medição”, os componentes da incerteza são de 2 tipos:

Tipo A: São aqueles que são avaliados através de uma série de medições repetidas, utilizando métodos estatísticos.

Tipo B: São aqueles que são avaliados através de outros meios que não a análise estatística de séries de observações.

Nos dois estudos de casos que serão apresentados no capítulo 5 deste trabalho, as incertezas das grandezas obtidas foram calculadas baseadas no roteiro de cálculo apresentado a seguir:

Cálculo da média aritmética ou média dos valores lidos individuais observados:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (4.18)$$

Onde:

- n é o número de valores lidos;
- q_j são valores individuais observados.

Cálculo do desvio-padrão experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (4.19)$$

Onde:

- q_j são os valores individuais observados;
- $\bar{q}$ é a média de valores individuais observados;
- n é o número de valores observados.

O desvio-padrão experimental caracteriza a variabilidade dos valores q_j observados ou, mais especificamente, sua dispersão em torno da média.

Cálculo do desvio-padrão experimental da média, ou seja, da incerteza padrão associada à média:

$$u(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (4.20)$$

Esta corresponde à incerteza do tipo A.

Cálculo da Incerteza Combinada:

A incerteza combinada $u_c(y)$ é a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$, que é dada, se os parâmetros x_1, x_2 , etc... forem independentes por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i), \text{ sendo que:}$$

- $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ e $\frac{\partial y}{\partial x_i} = c_i$;
- c_i é denominado o coeficiente de sensibilidade e descreve como o valor de y varia com as mudanças nos parâmetros x_1, x_2 , etc...

Basicamente há três maneiras de calcular a incerteza combinada:

- Método por cálculo de derivadas;
- Método por combinação de incertezas absolutas e relativas;

- Métodos por simulação.

Neste trabalho, as incertezas foram calculadas utilizando-se o método por combinação de incertezas absolutas e relativas, onde, as expressões para combinar as incertezas reduzem-se a formas muito mais simples com as duas regras abaixo:

- Para os modelos que incluem apenas uma soma ou diferença de grandezas, por exemplo: $y = a.x_1 + b.x_2 + \dots$, a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ é dada por:

$$u_c(y) = \sqrt{u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2 + \dots + u_{x_N}^2} \quad (4.21)$$

Ou seja, uma soma quadrática de desvios-padrão absolutos. Explicando de uma outra forma, quando a incerteza sobre um parâmetro é expressa diretamente em termos do seu efeito sobre y , o coeficiente de sensibilidade $\frac{\partial y}{\partial x_i} - c_i$ é igual a 1,0.

- Para os modelos que incluem apenas um produto ou quociente, por exemplo:

$$y = \frac{a.x_1 \times b.x_2}{c.x_3 \times \dots \times z.x_N}, \text{ a incerteza padrão combinada } u_c(y) \text{ é dada por:}$$

$$u_c(y) = y \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{x_2}}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{u_{x_3}}{x_3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{u_{x_N}}{x_N}\right)^2} \quad (4.22)$$

Onde $\left(\frac{u_{x_N}}{x_N}\right)$ são as incertezas nos parâmetros, expressas como desvios-padrão relativos.

- Para fins de combinação dos componentes de incerteza, é mais conveniente decompor o modelo matemático original em expressões consistindo unicamente de operações cobertas por uma das regras acima. Por exemplo, a expressão $\frac{(a.x_1 + b.x_2)}{(c.x_3 + d.x_4)}$ deve ser decomposta em dois elementos $(a.x_1 + b.x_2)$ e $(c.x_3 + d.x_4)$.

As incertezas intermediárias para cada um desses elementos podem ser calculadas utilizando a primeira regra acima e são combinadas usando a segunda regra para chegar á incerteza padrão combinada.

Cálculo da Incerteza Expandida:

Esta fase corresponde, conforme equação abaixo, em multiplicar a incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência k escolhido a fim de obter uma incerteza expandida.

$$u = k.u_c \quad (4.23)$$

Onde:

- k= fator de abrangência
- u_c é a incerteza combinada.

A incerteza expandida fornece um intervalo que abrange uma grande fração da distribuição de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando.

Cálculo do grau de liberdade efetivo

Para calcular o grau de liberdade efetivo, que é o número de graus de liberdade associado à incerteza padrão combinada utiliza-se a equação de Welch-Satterwaite:

$$u_{eff} = \frac{(u_c)^4}{\sum_{i=1}^n \frac{(u_i)^4}{\nu_i}} \quad (4.24)$$

Onde:

- n é o número de medições efetuadas;
- ν_i é o número do grau de liberdade de cada uma das fontes de incerteza, calculado pela expressão: $n - 1$;
- u_i é a incerteza padrão de cada uma das fontes de incerteza;
- u_c é a incerteza combinada;

Quando não é possível saber o número de medições realizadas para a obtenção de determinada incerteza padrão, o grau de liberdade será: $\nu_i = \infty$.

Determinação do Fator de Abrangência

Para atingir um certo nível de confiança, a incerteza padrão combinada (u_c) que corresponde apenas a um desvio-padrão, deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente de Student, denominado fator de abrangência. A Tabela III.3 do Anexo III apresenta valores para o coeficiente de Student (t_p) em função do grau de liberdade (Φ).

Apresentação dos resultados:

$$\bar{q} \pm u \quad (4.25)$$

4.2.5 Registros manuais e aquisição de dados

Tradicionalmente os ensaios de campo são realizados utilizando-se instrumentos e procedimentos manuais, ou seja, a pressão é lida em manômetros de Bourdon ou em manômetro de coluna d'água ou de mercúrio; a rotação é medida por meio de um tacômetro óptico ou de contato ou por lâmpada estroboscópica e a vazão obtida por meio de sondas de Pitot, molinetes, venturis ou vertedouros.

Com o avanço tecnológico e com o desenvolvimento de aplicativos específicos e hardwares para aquisição de dados, os processos manuais estão sendo substituídos por procedimentos automatizados com capacidade de processar uma maior quantidade de leituras em um menor tempo.

Entretanto, para o seu uso torna-se necessário à utilização de instrumentos elétricos / eletrônicos, tais como: sensores, transdutores e medidores para a obtenção dos sinais em tempo real, permitindo o acompanhamento dos fenômenos tanto em regime transitório como permanente. O atual estágio tecnológico dos transdutores de pressão tem motivado o desenvolvimento de pesquisas objetivando integralização de sistemas, que neste caso específico envolve os pacotes computacionais e os captadores.

Contudo, a utilização destes procedimentos tem um custo que aumenta proporcionalmente ao grau de incerteza do instrumento utilizado. Além da necessidade dos mesmos serem calibrados e/ou recalibrados de acordo com padrões existentes para cada tipo de grandeza envolvida, no início de cada ensaio, no local onde os mesmos serão utilizados para que exista maior credibilidade das suas informações.

Segundo Mioduski (1982), em um sistema de medição, quando ocorre um aumento da quantidade de parâmetros a serem controlados, crescem paralelamente a quantidade de grandezas e/ou leituras a serem obtidas, o número de instrumentos a serem manipulados e a incerteza associada a cada uma das grandezas envolvidas na leitura dos dados de um sistema de aquisição. Todos esses parâmetros são manipulados por uma unidade de controle onde os sinais dos diversos instrumentos são transmitidos, centralizados e processados em um único ponto (equipamento). Esta unidade faz parte do chamado sistema de aquisição de dados.

Um sistema de aquisição de dados é essencialmente desenvolvido para aplicações tais como:

- Monitoramento de grandezas físicas de processos;
- Aquisição de sinais provenientes de instrumentação, como: medidores, sensores e transdutores, industriais e de laboratório;
- Controle de processos;

Esse sistema é adequado a ocasiões onde necessita-se ou trabalha-se com grandes volumes de informações ou de dados a serem medidos de forma rápida e com um baixo grau de incerteza associada.

De acordo com Mioduski (1982), um sistema generalizado de medição é utilizado quando se faz a manipulação de dados com um grande número de instrumentos e/ou grandezas envolvidas. Nele existe a possibilidade de se aquiritar, processar, armazenar e analisar as informações de um determinado processo. Neste sistema a instrumentação utilizada é basicamente de dois tipos: analógica e digital.

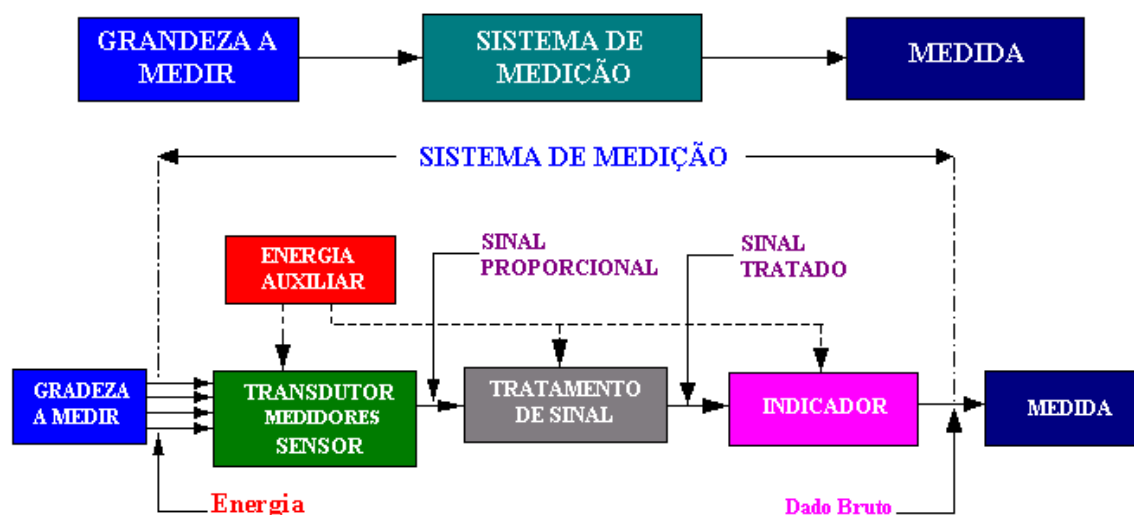
Nos sistemas analógicos são transmitidos sinais correspondentes às medidas feitas por transdutores para a unidade de controle, onde os dados são registrados, analisados, separados e/ou processados. A característica deste sistema é a limitação da quantidade de dados, sinais ou pontos, controlados e que podem ser manipulados em tempo real, com resposta programada no microcomputador. Quando o sistema requer um grande número de dados a serem aquiritados, controlados, processados e analisados, simultaneamente, os sinais são normalmente transformados da forma analógica para a forma digital.

Com os valores dos sinais aquiritados, inicia-se o processo de tratamento dos sinais no sistema de medição. A constituição destes sistemas é a mais variada possível e depende das características dos locais onde serão realizados os ensaios.

Complementando a Figura 4.7, que apresenta um sistema generalizado de medição, seguem as explicações:

- Transdutor: transforma a Grandeza a Medir em um sinal proporcional (mecânico, pneumático, elétrico ou outro) segundo uma função transferência, baseada em um ou mais fenômenos físicos.
- Tratamento do sinal: necessário, pois na maioria dos casos, os transdutores oferecem um sinal de baixa amplitude. Além da função de amplificação pode também ter filtros, processamento, etc.
- Indicador: recebe a sinal tratado e transforma em dados inteligíveis para o usuário.

Figura 4.7 – Esquema Genérico de Aquisição de Dados



Fonte: Mioduski, A., L., Elementos e Técnicas modernas de medição Analógica e Digital, 1982.

A qualidade principal de um sistema de medição normalizado é medir uma determinada grandeza ou um conjunto destas, com o mínimo de erros e de incertezas associadas aos sinais de entrada. Todas as leituras instantâneas devem ter uma duração igual de tempo para cada ponto de medição, sendo utilizada a média aritmética destas leituras para os cálculos do ensaio.

Em ambos os casos, registro manual ou aquisição de dados, devem ser providenciadas folhas de registro, como mostrado na Tabela 4.1, em quantidade suficiente, indicando com clareza os itens a serem medidos e os respectivos pontos de medição. Estas folhas de registro serão distribuídas entre o responsável pelos ensaios e os representantes das partes contratantes devendo ser assinadas por eles.

Quando as garantias basearem-se em rendimentos ponderados, que dão importância comercial diferente aos diversos valores da potência ou da vazão, deve-se procurar a máxima precisão em todos os ensaios individuais e não apenas naqueles que correspondam às cargas e vazões referentes aos rendimentos ponderados, pois é necessário traçar gráficos confiáveis abrangendo toda a faixa dos ensaios, competindo ao responsável pelos ensaios decidir quais deverão ser repetidos.

Todos os erros constatados, se possível, devem ser eliminados ou levados em consideração, e é somente nestas condições que os ensaios podem ser encerrados e a aparelhagem do ensaio desligada.

Tabela 4.1 – Modelo de Folha de Registro dos Resultados

Ensaio	Data	Abertura do distribuidor	Vazão	Altura de queda líquida nominal	Potência Hidráulica da turbina	Rendimento do Gerador	Potência de eixo da turbina	Rendimento da turbina	Potência elétrica do gerador
nº	Hora	mm	$Q [m^3/s]$	$H_n [m]$	$P_h [kW]$	$\eta_G [\%]$	$P_e [kW]$	$\eta_t [\%]$	$P_{el} [kW]$

EMPRESA:**PCH:****Ensaio de rendimento da turbina N°**

4.2.6 Resultados

Os resultados dos ensaios devem fornecer os valores de vazão (Q), da altura de queda líquida nominal (H_n) e da potência de eixo da turbina (P_e), para cada posição de abertura do distribuidor (ou da agulha do injetor) ou para cada porcentagem da carga para a qual foi garantido o rendimento da turbina.

De acordo com as normas estudadas, se as condições de ensaio não divergirem das condições estipuladas, sobretudo no que refere-se a altura de queda líquida nominal do ensaio (H_n), pode-se proceder à conversão dos resultados do ensaio às condições garantidas (H_r).

Devem ser utilizadas as equações abaixo:

$$Q_r = Q \cdot \left(\frac{H_r}{H_n} \right)^{1/2} \quad (4.26)$$

$$P_r = P_e \cdot \left(\frac{H_r}{H_n} \right)^{3/2} \quad (4.27)$$

$$\eta_r = \eta_t = \frac{P_e}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n} = \frac{P_r}{\rho \cdot g \cdot Q_r \cdot H_r} \quad (4.28)$$

Se a altura de queda do ensaio (H_n) variar além dos limites permitidos para a altura de queda garantida (H_r) deve ser realizada uma correção dos valores. Para este propósito é necessário que se faça, em adição às curvas de rendimento garantido, uma porção relevante do diagrama de eficiência (diagrama de colina) da turbina. Nos casos onde o rendimento garantido é dado apenas para uma queda líquida nominal, é necessário que se faça uma porção do diagrama de eficiência incluído entre a altura máxima e mínima da faixa operacional.

Por intermédio das equações apresentadas acima, podem ser calculados e traçados, em função de P_e ou Q, os rendimentos η_t para cada ponto.

A IEC 60041 (1991) também descreve o procedimento a ser adotado nos casos em que há uma grande variação da energia específica, que não difere do acima exposto.

4.2.7 Relatório Final

O relatório final deve ser redigido pelo responsável pelos ensaios e deve ser submetido ao comprador e ao fornecedor da turbina para obtenção da aprovação das duas partes no que refere-se aos detalhes de cálculo e apresentação dos resultados. Quaisquer eventuais divergências devem ser resolvidas pelas duas partes, sendo que cada uma deve ter direitos iguais no que concerne à determinação da forma final do relatório. No relatório deverão constar os seguintes tópicos:

- Objetivo dos ensaios;
- Registros de quaisquer acordos preliminares referentes aos ensaios;
- Pessoal participante nos ensaios;
- Descrição da unidade geradora completa, dos instrumentos e dos padrões de calibração e observações referentes às condições de operação e carga desfavoráveis verificadas durante os ensaios;
- Procedimentos adotados nos ensaios;
- Exemplo de cálculo de, no mínimo, um ensaio individual, indicando desde os valores originais até o resultado final, incluindo a incerteza total de cada medida;
- Registro diário do desenvolvimento dos ensaios;
- Tabulação dos resultados de todas as medidas, inclusive dos dados intermediários, resultados dos cálculos de altura de queda líquida nominal, medidas da vazão, até os resultados finais corrigidos com conversão dos valores do ensaio para as condições garantidas, bem como a medida da potência elétrica e do rendimento do gerador.

4.2.8 Contestação ou repetição de ensaios

Após o término dos ensaios, as folhas de registro devem ser examinadas pelas partes contratantes e os resultados computados ou calculados provisoriamente no local antes de ser dispensado o pessoal do ensaio. Em caso de contestação referente aos ensaios, por razões claramente explicadas por escrito, a parte descontente tem o direito de solicitar a execução de um novo ensaio.

4.3 Métodos Normalizados para a Medição das Grandezas

4.3.1 Métodos de Medida da Vazão

Existe uma diversificação muito grande de tipos de instrumentos de medição de vazão. O elevado número de princípios de funcionamento exprime o esforço das companhias de instrumentação para desenvolver sistemas precisos, de características competitivas e amplas possibilidades de aplicação. No caso da determinação de rendimento de turbinas hidráulicas a precisão desta variável depende fortemente da precisão do método de medição de vazão (Bortoni, 2001).

Dentre os vários métodos normalizados de medição da vazão em turbinas hidráulicas, destacam-se:

a) Métodos próprios para grandes vazões:

- Cortina salina;
- Gibson – Variação da pressão em função do tempo;
- Molinetes;
- Diluição;
- Ultrassônico;
- Winter-Kennedy.

b) Métodos próprios para pequenas vazões

Quando as dimensões permitirem, podem ser usados os métodos citados acima, ou ainda:

- Vertedor retangular sem contração lateral.
- Métodos por pesagem ou medição volumétrica da água.
- Método da cortina móvel.
- Tubo de Pitot e Pitômetros de Cole, Prandtl e outros.
- Diafragmas, bocais e tubos Venturi.

Neste trabalho serão abordados apenas os métodos mais empregados e viáveis de serem realizados em ensaios de campo de turbina hidráulicas de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

4.3.1.1 Método da Cortina Salina

Este método, desenvolvido originalmente pelo prof. C. M. Allen, baseia-se no fato de que uma solução salina (salmoura) aumenta a condutividade da água e que uma mancha salgada dentro de um conduto de água em escoamento permanece individualizada.

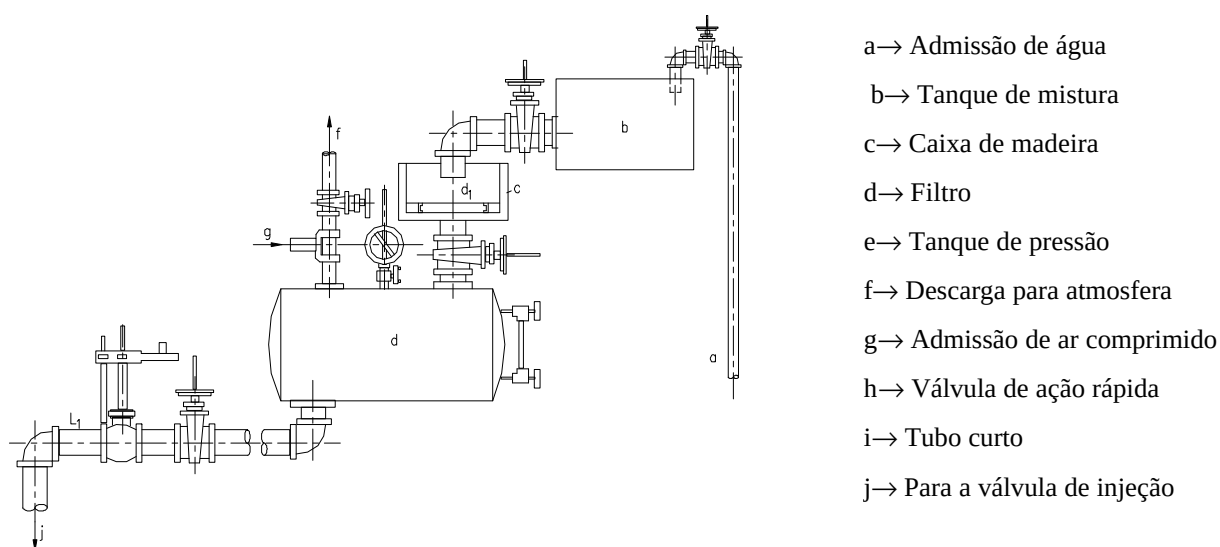
A solução salina é introduzida em uma seção do conduto a montante de dois ou mais conjuntos de eletrodos e no momento de sua passagem pelo plano de cada conjunto de eletrodos são feitos registros da passagem da mancha salgada e da medida do tempo decorrido entre estas passagens. Com isto obtém-se o valor da vazão do escoamento dividindo-se o volume do conduto entre os planos dos eletrodos pela média do tempo que a mancha salgada leva para passar entre os eletrodos.

Na utilização da ABNT 11374 / NB228 (1990), a fim de satisfazer suas exigências, a vazão somente deve ser medida pelo método diferencial, isto é, entre dois pares de eletrodos.

As Normas referentes a ensaios de campo apresentadas no capítulo 3 deste trabalho descrevem o procedimento abaixo para a realização do método da cortina salina:

A solução salina deve ser preparada num tanque aberto onde deve ser continuamente agitada sendo que a concentração de sal pode variar, de acordo com a conveniência do dispositivo registrador. A solução deve passar por um filtro, a fim de impedir a entrada de partículas sólidas no sistema de injeção como mostrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Disposição do reservatório e da tubulação utilizados no método da Cortina Salina



Fonte: ABNT - NB 228, 1990

Condições necessárias para a realização do ensaio:

- A pressão de injeção deve ser maior que a pressão interna da água em, pelo menos, 250 [kPa];
- Os eletrodos devem ser sólidos ou rígidos, capazes de resistir a vibrações;
- As barras dos eletrodos devem ser cuidadosamente isoladas do conduto e entre si com material que possua alta resistência mecânica e elétrica, tais como os compostos fenólicos, com a finalidade de evitar sua ruptura por vibração;
- Para uma medida satisfatória, o limite inferior da velocidade da água no conduto é dado pela expressão:

$$v = \sqrt{0,2 \cdot g \cdot D \left(\frac{\dot{\rho}_s}{\rho} - 1 \right)} \quad (4.29)$$

Onde:

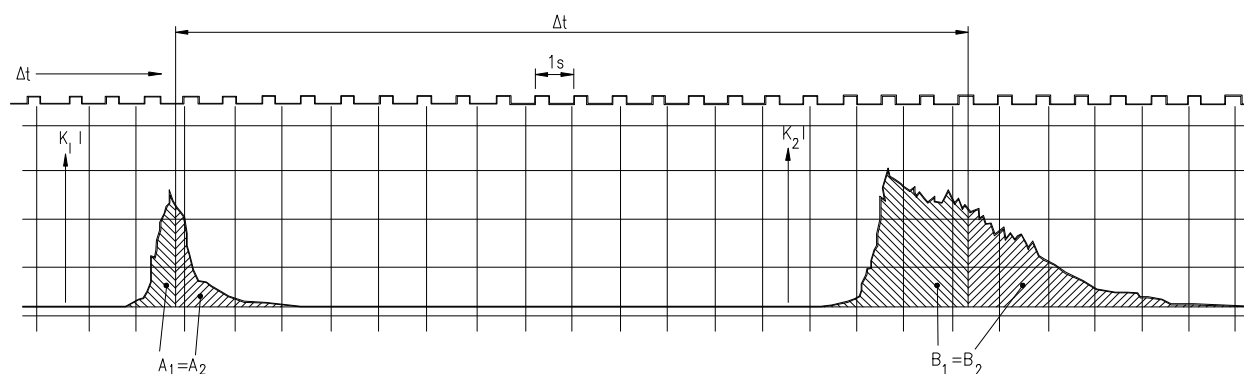
- v – velocidade média da água no conduto em [m/s];
- g – aceleração local da gravidade em [m/s²];
- D – diâmetro interno do conduto em [m];
- ρ_s – massa específico da solução salina em [kg/m³];
- ρ – massa específica da água em [kg/m³]
- Cada ensaio consistirá de pelo menos cinco injeções individuais da solução salina e para o cálculo da vazão, em cada ensaio será utilizada a média de cinco ou mais tempos de passagem da solução;
- O regime do escoamento deve ser turbulento;
- O primeiro conjunto de eletrodos deve estar localizado a uma distância de pelo menos 4.D, a partir da seção de injeção. O segundo conjunto de eletrodos deve estar localizado a uma distância de pelo menos 4.D ou a 15 [m] a jusante do primeiro conjunto, devendo adotar-se a maior destas duas distâncias;
- O trecho de ensaio do conduto, compreendido entre a seção de injeção e o conjunto de eletrodos mais distantes deve ser preferencialmente de seção uniforme ou levemente decrescente;
- As válvulas de injeção devem ser distribuídas de maneira tão uniforme quanto possível em toda a seção transversal devendo haver, pelo menos, uma válvula de injeção para cada área de 2 [m²] da seção transversal no ponto de injeção, e, em caso de condutos

circulares, pelo menos quatro válvulas de injeção. As válvulas de injeção devem ser localizadas nos centros de subdivisões aproximadamente quadradas e iguais da seção transversal. Em condutos de forma circular, necessitando de quatro válvulas, estas devem ser espaçadas igualmente, num círculo de diâmetro igual a 0,63 do diâmetro do conduto, no caso da norma NB228 (1990) e 0,60 do diâmetro do conduto na observância da norma PTC 18 (1992);

- Para os instrumentos registradores convencionais, o tempo de passagem da solução salina entre os eletrodos não deve ser inferior a 9 [s] a plena carga. Com oscilógrafos e/ou sistema computacional é admissível um tempo mais curto, não podendo, entretanto, ocorrer superposições das curvas correspondentes aos eletrodos situados a montante e a jusante.

A curva de registro da passagem da solução salina através de cada conjunto de eletrodos deve ser traçada em um sistema de coordenadas retangulares, da corrente em função do tempo, como mostra a Figura 4.9. Deve-se utilizar somente aquela porção da curva que estiver acima do valor médio da corrente inicial. Se as curvas não forem registradas em coordenadas retangulares uniformes, devem ser traçadas novamente antes de serem determinadas às posições dos centros de gravidade.

Figura 4.9 – Curva Característica de um ensaio pelo método da mancha salgada



Δt = tempo de passagem entre centros de gravidade

k_1, k_2 = escalas

A_1, A_2, B_1, B_2 = áreas das curvas obtidas para cada injeção.

Fonte: ABNT – NB 228 (1990)

O método da Cortina Salina não é um método muito utilizado devido a grande interferência que a qualidade da água pode exercer nos seus resultados e também, para a sua realização é necessário que se faça à parada da unidade geradora, além de não apresentar uma boa precisão, se comparado com os outros métodos.

4.3.1.2 Método de Gibson

O método proposto por Normam Rothwell Gibson em 1923 para medição de vazão em tubulações fundamenta-se no fenômeno hidráulico denominado Golpe de Aríete e na Segunda Lei de Newton (Bortoni, 1997).

Quando a massa d'água em movimento dentro de um conduto forçado tem a sua velocidade reduzida ou o seu fluxo totalmente interrompido, ela exerce, por efeito de inércia, uma sobrepressão na parte inferior do conduto e por isso uma compressão da água e uma dilatação do conduto forçado. Esse processo se desenvolve em sentido contrário ao do escoamento, numa velocidade que corresponde à velocidade de propagação do som na água, isto é, com aproximadamente 1.200 m/s.

Na extremidade do conduto forçado ou no nível da represa, essa onda de pressão é refletida e volta a se propagar pelo conduto forçado em sentido contrário. O tempo de propagação dessa onda nos dois percursos, isto é, ida e volta, é denominado “tempo de reflexão” e resulta na fórmula:

$$T_R = \frac{2.L}{1200} \quad (4.30)$$

Tendo sido normalizado pela CEI / IEC 60041(1991) e pela PTC 18 (1992), o método permite a utilização de transdutores que possibilitam o registro pressão-tempo em diagramas separados.

Para o equacionamento do método, considere o escoamento permanente estacionário mostrado na Figura 4.10, com velocidade média v em [m/s] e vazão Q em [m³/s] no trecho 1-2, de uma tubulação reta de comprimento L [m], diâmetro interno D [m] e área de seção transversal A em [m²].

Atuando-se na válvula V durante um tempo t_v (s) em que a velocidade cai de v_i para v_f [m/s] ocorre o Golpe de Aríete, representado pela elevação de energia D_p [m] entre os pontos 1 e 2, a qual varia segundo (A,B,F).

De acordo com a IEC 60041 (1991), a partir do princípio da quantidade de movimento, pode-se escrever:

$$\rho \cdot p \cdot A = -\rho \cdot A \cdot \frac{dv}{dt} \quad (4.31)$$

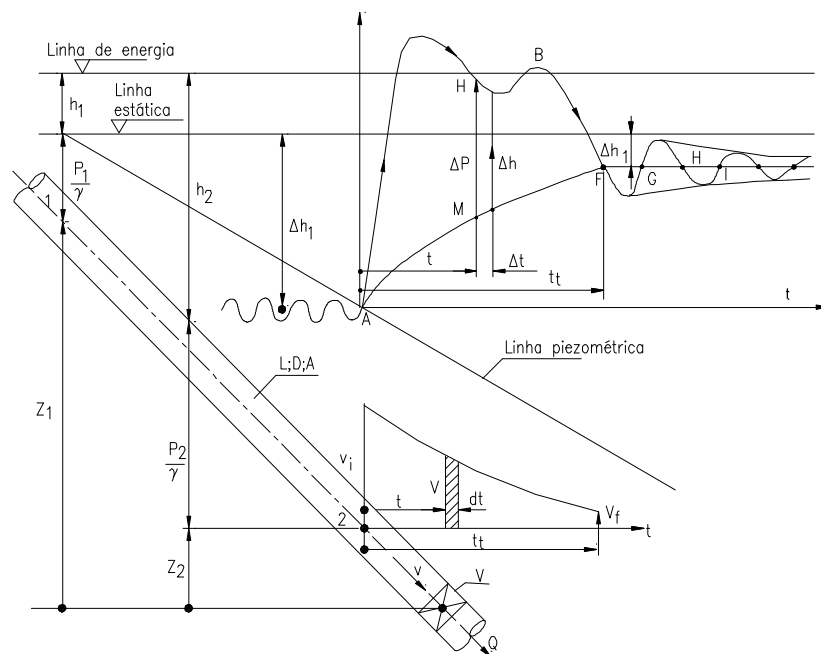
$$v_i - v_f = \frac{g}{L} \cdot \int_0^{t_v} \rho \cdot p \cdot dt = \frac{g \cdot A_d}{L} \quad (4.32)$$

Logo:

$$Q = \frac{g \cdot A_d \cdot A}{L} + q \quad (4.33)$$

A vazão Q [m^3/s] poderá ser calculada desde que, previamente, seja conhecida a vazão residual, q [m^3/s] e a área do diagrama (A_d) delimitada pelo segmento (A,B,F,A), a qual para ser determinada, exige o conhecimento da linha AF que pode ser traçada considerando que as energias Δh , perda de carga e energia cinética, variam proporcionalmente com o quadrado das vazões.

Figura 4.10 – Características geométricas, cinemáticas e dinâmicas do método de Gibson



Fonte: Souza, Z.; Medição de Vazão-Monografia, 1997;

Sendo assim, para a utilização do método de Gibson deve-se medir a diferença de pressão que ocorre entre dois pontos da tubulação de alta pressão, durante um transitório de desaceleração do fluido, a qual inicialmente era feita através do aparelho de Gibson que, na realidade, era uma máquina que fotografava, ao longo do tempo, a variação da altura da coluna de mercúrio em um manômetro diferencial.

Atualmente, com a evolução dos equipamentos eletrônicos, sistemas de aquisição de dados e com os recursos avançados de instrumentação, esta medição é feita diretamente através de um transdutor diferencial de pressão ou através de dois transdutores de pressão manométrica, procedendo-se, via software, uma operação de subtração entre os dois sinais.

O aspecto crítico para a realização dos cálculos é fundamental para o sucesso da aplicação do método de Gibson é a determinação dos limites de integração (Bortoni, 1997). Neste aspecto, observam-se algumas divergências entre as normas que consideram o método de Gibson.

A norma CEI / IEC 60041 (1991), em sua primeira versão, preconizava a determinação do ponto final como uma função do semiperíodo da oscilação amortecida e de uma relação entre dois máximos adjacentes. Já a norma ASME PTC 18 (1992) considera o primeiro pico máximo como sendo o limite final de integração. Na realidade, até hoje não chegou-se a um posicionamento definitivo a este respeito.

No entanto, em função dos sucessivos casos estudados, tem-se observado que há uma certa liberdade na escolha dos pontos iniciais e finais. Como o que se deseja, como produto final é calcular a área do diagrama, quando se trabalha com valores médios, tem-se que ruídos que provoquem áreas acima da linha de variação de pressão são cancelados por ruídos que provoquem áreas abaixo da linha média. Este fenômeno, a menos para a obtenção do ponto inicial de integração, garante que somente haverá áreas significativas durante a sobrepressão causada pelo fechamento da válvula. Da mesma forma, porém, com um pouco mais de critério, acontece com o ponto final de integração. Uma análise de sensibilidade mostra que a variação no resultado do cálculo da vazão é muito pequena quando se toma como limite final de integração um ponto cujo valor de pressão é exatamente igual à média da pressão estática verificada após o transitório, ou seja, em regime permanente (Bortoni, 1997).

Recomenda-se colocar as tomadas de pressão em cada seção de modo a obter os diagramas mais fidedignos e que os comprimentos sejam substancialmente maiores do que os limites mínimos estipulados.

As perdas d'água através do distribuidor da turbina ou em qualquer outro dispositivo utilizado para produzir a elevação de pressão devem ser medidas separadamente com o dispositivo de fechamento em posição fechada. Tais perdas, em condições de ensaio, não devem ultrapassar, considerando a NB228 (1990), a 5% da vazão de plena carga e devem ser determinadas com erro máximo de 0,2% da vazão de plena carga. A PTC 18 (1991) é mais rígida com relação a estas perdas, sendo estipulados os valores de 2% da vazão de plena carga e erro máximo de 0,1% da vazão de plena carga.

Considerando que as tomadas de pressão no conduto forçado foram previstas no projeto, a instalação dos sensores é simples e não exige mão-de-obra especializada. Se não foram previstas, deve-se considerar a viabilidade técnica de instalação das mesmas. Os custos de instalação são baixos, uma vez que não requer equipamentos especiais. É necessário que o elemento regulador de vazão (distribuidor com pás móveis) tenha mecanismos de regulação e leitura para diferentes posições de abertura. A vazão que passa pelo conduto deverá ser interrompida, portanto, a unidade não poderá estar operando em regime normal.

A simplicidade dos equipamentos (transdutores de pressão) e sua instalação tornam o custo de instalação baixo. Porém, há de se considerar que, o fato de ser demorada a seção de ensaios e a máquina estar fora de operação (sem gerar energia) leva a um custo adicional, representado pela energia que deixa de ser vendida. A boa precisão e a facilidade de operação são benefícios deste método e leva a uma relação de custo médio-baixo com benefícios satisfatórios. Este tipo de método é bastante utilizado para a realização de ensaios.

4.3.1.3 Método dos molinetes

Conforme exposto na norma ABNT 11374 / NB228 (1990), este método requer a utilização de um certo número de molinetes, colocados de modo adequado, tanto em conduto fechado como em canais abertos, para medir a velocidade da água. O número de molinetes, bem como a sua localização, devem ser escolhidos de maneira a fornecer registros em um número suficiente de pontos que permitam determinar com precisão a vazão média na seção transversal durante o ensaio.

Os molinetes hidrométricos são aparelhos dotados de uma hélice e um “conta-giros”, medindo a velocidade do fluxo d’água que passa por ele. Assim, quando posicionados em diversos pontos da seção do rio determinam o perfil de velocidades desta seção. Com tal perfil e a geometria da seção, determina-se a vazão. As Figuras 4.11 (a) e 4.11 (d) apresentam molinetes enquanto a Figura 4.11 (b) apresenta os diferentes tipos de “conta-giros” e a Figura 4.11 (c) mostra o lastro.

O princípio de funcionamento é o seguinte: mede-se o tempo necessário para que a hélice do aparelho dê um certo número de rotações. O “conta-giros” envia um sinal ao operador a cada 5, 10 ou qualquer outro número de voltas realizadas. Marca-se o tempo entre alguns sinais e determina-se o número de rotações por segundo (n).

Determinado o número de rotações por segundo do molinete, passa-se à velocidade longitudinal da corrente líquida, utilizando-se a curva de calibração do molinete, a qual estabelece a relação entre as rotações do eixo e as velocidades lineares que lhe correspondem:

$$v = a.n + b$$

(4.34)

Onde:

v – velocidade do fluxo (m/s)
 n – velocidade de rotação da hélice (rps)
 a, b – constantes do aparelho.

Figura 4.11 (a) – Molinete Hidrométrico preso à haste

Figura 4.11 (b) – Diferentes tipos de “conta-giros”

Figura 4.11 (c) – Lastro (formato de um peixe)

Figura 4.11 (d) - Molinete preso a cabo com lastro



(a)



(b)



(c)

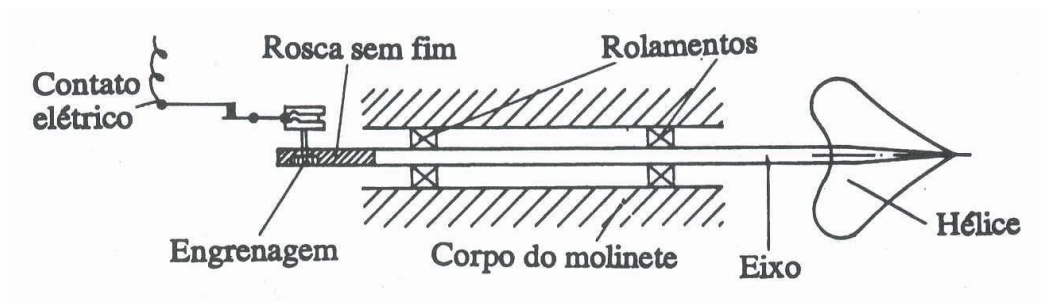


(d)

Fonte: Porto, R. L. L.; Filho, K. Z.; Silva, R. M., Medição de Vazão e Curva Chave, 2001

Um corte esquemático de um molinete hidrométrico é apresentado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Corte Esquemático de um Molinete

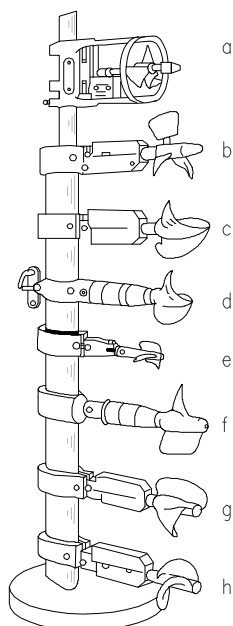


Fonte: Viana, A. N.C.; Medição Convencional com Molinete Hidrométrico, 2005

Caso o molinete não seja fixo numa haste, deve-se prendê-lo a um lastro (peso entre 10 e 100 kg) para que fique aproximadamente na vertical. Este lastro tem a forma parecida com a de um peixe. As velocidades limites que podem ser medidas com molinete são de cerca de 2,5 m/s com haste e de 5m/s com lastro. Acima destes valores os riscos para o operador e o equipamento passam a ser altos.

Conforme exposto nas normas estudadas, devem ser utilizados somente molinetes de escoamento axial e de sinalização elétrica, conforme pode ser observado na Figura 4.13 retirada da norma NBR 11374 / NB 228 (1990).

Figura 4.13– Tipos de Molinetes para escoamento axial e oblíquo



a*→molinete Stoppani, com hélice de diâmetro de 90mm, dotado de um anel de proteção de diâmetro de 120 mm;

b*→molinete Ott, com três pás;

c→molinete Ott, pás curvadas;

d→molinete Dumas/Neyrpic, pás curvadas, diâmetro de 100mm;

e→micromolinete Ott, pás curvadas, diâmetro de 50mm;

f→molinete Amsler, pás curvadas, diâmetro de 130mm;

g→molinete Ott, tipo F, pás curvada, diâmetro de 125 mm, para escoamento oblíquo, α nos limites de $\pm 20^\circ$;

h→molinete Ott, tipo A, pás curvadas, diâmetro de 100mm, para escoamento oblíquo, α dentro do limite de $\pm 45^\circ$.

* →ambos os tipos são empregados para uso em água limpa, porém são facilmente obstruídos por ervas, folhas e algas. O tipo “a” é empregado com vantagem para medição em seções irregulares.

Fonte: ABNT NB 228, 1990

A norma PTC 18 (1992) limita a duração da medida para cada ensaio, sendo a mínima de 2 minutos.

Segundo a norma NBR 11374 /NB 228 (1990), a medida do tempo deve ser feita com uma precisão de 0,05%. e a rotação dos molinetes deve ser medida com uma precisão de $\pm 0,1\%$.

A medida da vazão utilizando-se do método do molinete apresenta como desvantagens:

- Durante a medição, os molinetes aumentam a perda de carga localizada no conduto;

- Custo alto (comparando-se com os outros métodos abordados neste trabalho) em relação à precisão de ± 2 a 5%, apresentando uma relação pouco satisfatória de custo benefício.

A vantagem deste método é que ele pode ser utilizado para monitoramento permanente do desempenho, sendo o inconveniente da medição permanente a possibilidade de galhos, folhas ou sujeira agarrarem-se nos molinetes, sendo necessária inspeção de limpeza periódica.

4.3.1.4 Método da Diluição

A aplicação deste método é conveniente para os casos de condutos ou canais longos, e consiste em injetar continuamente uma solução concentrada de produtos químicos de título conhecido, em uma seção transversal de um escoamento de fluido em regime permanente e estacionário, determinando a jusante dessa seção a nova concentração. Este ponto de recolhimento da amostra deve ser suficientemente afastado, de maneira a assegurar uma mistura homogênea da solução com a água. A vazão pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$Q = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \cdot q \quad (4.35)$$

Onde:

Q = vazão a ser medida em $[m^3/s]$;

q = vazão da solução química injetada em $[m^3/s]$;

C_0 = concentração da substância química na água natural em $[mg/l]$;

C_1 = concentração da substância química na solução injetada em $[mg/l]$;

C_2 = concentração da substância química na mistura resultante em $[mg/l]$.

No preparo da solução, recomenda-se utilizar as seguintes substâncias e dosagens:

- Solução de Cloreto de Sódio com concentração final recomendada de 2 $[mg/l]$;
- Solução de Bicromato de Sódio com concentração final recomendada de 0,2 $[mg/l]$;

Idealmente a substância química empregada deve ser quimicamente estável, não tóxica, não estar contido no escoamento e estar perfeitamente homogeneizado durante todo o tempo de injeção.

De acordo com a NBR 11374 / NB 228 (1990), a vazão da solução química injetada deve estar entre $q = 0,2$ a $0,3$ $[l/s]$ por $[m^3/s]$ da vazão do escoamento a ser medida, devendo a injeção ser uniforme e medida com precisão. Conforme o tipo da instalação, podem ser utilizados sifões ou bombas volumétricas para manter constante o fluxo da injeção.

As amostras devem ser tomadas em pontos situados nos centros de divisões de áreas iguais da seção de medida. As amostras devem ser colhidas continuamente em pelo menos cinco pontos, no mínimo durante 5 minutos.

Para cada ensaio deve-se traçar uma curva de concentração das amostras colhidas a jusante do ponto de injeção. Nesta curva, o tempo deve ser marcado no eixo das abscissas e as vazões no eixo das ordenadas. Esta curva deve apresentar um trecho horizontal correspondendo ao período durante o qual o título da solução é constante, sendo este título (ou concentração) utilizado na fórmula anterior. Uma vez que é necessária a verificação da uniformidade do título da solução, deve-se tomar grande cuidado com esta parte do teste.

4.3.1.5 Vertedor

Este dispositivo baseia-se na determinação da vazão a partir da medição do nível d'água. Existem diversos modelos de vertedores, com diferentes curvas que relacionam o nível d'água com a respectiva vazão, porém, em ensaio de campo de turbinas hidráulicas, de acordo com as normas estudadas, a fim de se obter a melhor correlação entre a altura de carga e a vazão, o vertedor deve ser do tipo “retangular sem contração lateral”, com aresta delgada, com uma parede vertical lisa abaixo da crista, uma contração completa sobre a crista e uma queda livre. Exemplos de vertedores retangulares podem ser vistos na Figura 4.14.

O vertedor é geralmente utilizado a jusante da turbina e deve-se tomar cuidado quanto às condições do escoamento, que deve ser regular (isento de vórtices, de perturbações da superfície ou da presença de grande quantidade de ar carregado) no canal de adução.

Se for necessário instalar o vertedor no canal de fuga, deve-se localizá-lo afastado da saída da turbina, para que as bolhas de ar separem-se completamente antes que o fluxo chegue até o vertedor.

De acordo com as normas estudadas, a altura da lâmina h acima da crista deve ser medida a montante do vertedor a uma distância compreendida entre quatro e seis vezes a altura da lâmina máxima, conforme pode ser observado na Figura 4.15. Para tal, o número de pontos de medida, espaçados uniformemente e transversalmente ao canal, deve ser conforme apresentado na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Número de pontos de medida

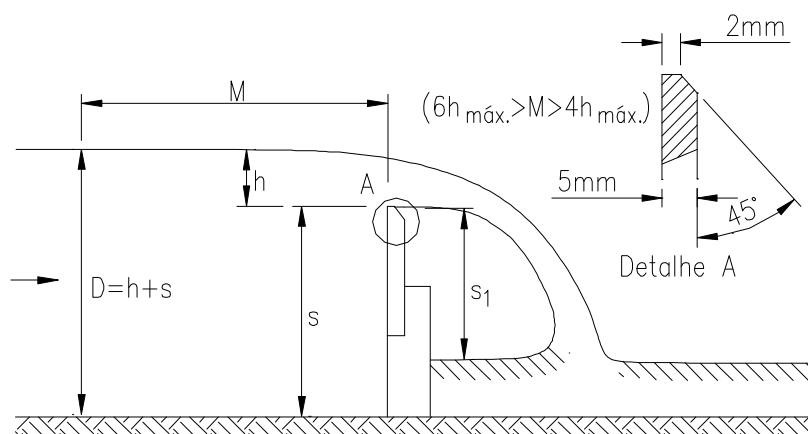
LARGURA DA CRISTA b	NÚMERO DE PONTOS DE MEDIDA
Para $b \leq 2$ m	2
$2 \text{ m} < b \leq 6$ m	3
$b > 6$ m	4 pelo menos

Fonte: ABNT NB 228, 1990

Figura 4.14 – Vertedores Retangulares



Fonte: Porto, R. L. L.; Filho, K. Z.; Silva, R. M., Medição de Vazão e Curva Chave, 2001

Figura 4.15 - Dimensões de um vertedor: s = altura da crista; h = altura da carga

Fonte: ABNT NB 228, 1990

O zero de referência deve ser conferido com precisão antes e depois de uma série de medidas dos pontos. Os valores das alturas da carga, medidas de cada lado do canal de aproximação, não devem diferir de mais de 0,5%.

Para o cálculo da vazão média deve-se utilizar a média aritmética de todas as medidas de altura. Estas medidas podem, eventualmente, ser obtidas por intermédio de sensores de nível ou, no caso de utilização da NBR 11374 / NB 228 (1990), que não permite o uso de sensores; limnímetros dotados de ponta em gancho instalados diretamente em poços de medida ou ao lado do canal de adução e comunicando-se com este através de tubos, que terminam em pequenos orifícios de 3mm e 5mm de diâmetro.

Deve-se fazer várias leituras a intervalos de tempo regulares para verificar se o escoamento está se processando em condições estáveis.

É preferível ajustar as dimensões do vertedor de tal modo que, a plena carga da turbina, sejam respeitados os limites estabelecidos na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Limites das dimensões do Vertedor

Largura da crista do vertedor	$b > 0,25 \text{ m}$
Altura do vertedor até a soleira	$s > 0,30 \text{ m}$
Altura de Carga	$0,60 \text{ m} < h < 0,75 \text{ m}$
Velocidade de aproximação	$v < 0,45 \text{ m.s}^{-1}$

Fonte: ABNT NB 228, 1990

Nestas condições, as medidas no vertedor devem ser executadas dentro dos limites compreendidos pelas experiências que serviram de base para estabelecer as fórmulas dos vertedores.

A formula geral para o cálculo da vazão de um vertedor é a fórmula de Poleni:

$$Q = 2/3 \cdot \eta \cdot \sqrt{2g} \cdot b \cdot h^{3/2} \quad (4.36)$$

Onde:

Q = vazão em m^3/s ;

η = coeficiente

b = largura da crista do vertedor em [m];

h = altura de carga medida sobre a crista em [m].

Entre as inúmeras fórmulas sugeridas para expressar com a maior precisão possível a relação “altura –vazão”, e que já foram comprovadas pelos resultados experimentais, as seguintes parecem ser as mais indicadas:

– **Fórmula de Bazin (1898):**

$$Q = \left[0,405 + \frac{0,003}{h} \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+s} \right)^2 \right] \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \quad (4.37)$$

Onde:

s = altura da crista do vertedor sobre o fundo do canal de adução

Esta fórmula é aplicável para os limites:

$$0,1 \text{ m} < h < 0,6 \text{ m}$$

$$0,2 \text{ m} < s < 2,0 \text{ m}$$

Comprimento do canal entre os tranqüilizantes e o vertedor: $\geq 80 \cdot b$

– **Fórmula da Sociedade Suíça dos Engenheiros e Arquitetos (1924):**

$$Q = 0,410 \left(1 + \frac{1}{1000 \cdot h + 1,6} \right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+s} \right)^2 \right] \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \quad (4.38)$$

Limites de aplicação: $0,025 < h < 0,8 \text{ m}$

$$s > 0,3 \text{ m}$$

$$h/s < 1$$

– **Fórmula de Rehbock (1919):**

$$Q = \left(0,4023 + 0,0542 \cdot \frac{h_e}{s} \right) b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_e^{3/2} \quad (4.39)$$

Onde:

$$h_e = (h + 0,0011) \text{ em [m];}$$

É aplicável para os limites:

$$0,1 \text{ m} < h < 0,8 \text{ m}$$

$$s > 0,3 \text{ m e}$$

$$h/s < 1$$

Deve-se notar que um escoamento irregular no canal adutor, bem como uma crista arredondada ou asperezas na face de montante do vertedor, ou ainda uma aeração imperfeita sob a lâmina vertente, podem alterar sensivelmente a relação “altura-vazão”.

4.3.1.6 Método Ultrassônico

O princípio de funcionamento dos medidores de vazão ultrassônicos é o da propagação das ondas sonoras nos meios, no caso fluido em escoamento, com frequências compreendidas entre 150 [kHz] e 5 [MHz].

Diferentes princípios físicos podem ser utilizados para medição da velocidade de escoamento, os quais permitirão determinar a velocidade média e pelo princípio de conservação da massa, a vazão. Dentre estes princípios destacam-se o Doppler e o de Tempo de Transito.

Neste trabalho serão abordados apenas os medidores ultrassônicos por tempo de trânsito, pois as normas PTC 18 (1992) e a CEI / IEC 60041 (1991) permitem apenas a utilização de medidores de vazão ultrassônico baseados neste princípio.

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. Estes medidores podem ter o sistema emissor/receptor colocado externamente ao tubo (instalação móvel) sendo freqüentemente portáteis para aplicação em testes de campo, ou internamente (instalação fixa), denominados, respectivamente, medidor de vazão ultrassônico não intrusivo e medidor de vazão ultrassônico intrusivo. Estes últimos podendo ser de faixa acústica estreita ou de faixa acústica larga. As Figuras 4.16(a) e 4.16(b) mostram medidores de vazão ultrassônico não intrusivo e intrusivo, respectivamente.

Figura 4.16 (a) – Medidor de vazão ultrassônico não intrusivo – Catálogo Panametrics Inc.

Figura 4.16 (b) – Medidor de vazão ultrassônico intrusivo – Catálogo Ultraflux



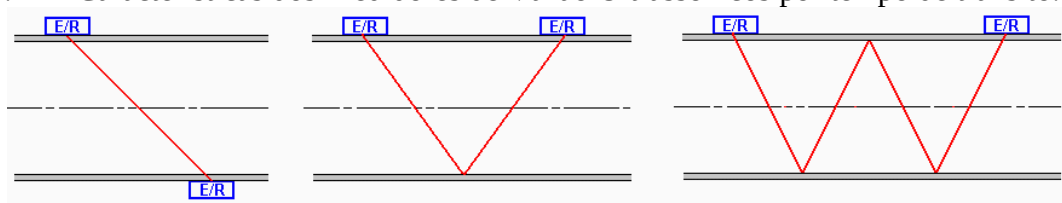
(a)



(b)

Os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito podem também ser classificados em função da configuração do trajeto da onda ultrassônica dentro da tubulação. Em geral consideram-se três tipos, comumente denominada configuração “Z”, “V” ou “W”, conforme ilustrado na Figura 4.17, sendo que o símbolo E/R representa emissor/receptor.

Figura 4.17 – Características dos Medidores de Vazão Ultrassônicos por tempo de trânsito.



Fonte: Souza, Z., Medição de Vazão-Monografia, 1997;

O tipo de configuração influencia diretamente sobre a qualidade do resultado obtido e é determinado em função de uma relação de compromisso entre diversas variáveis, dentre as quais pode-se citar: exatidão desejada, taxa de amostragem do medidor, comprimento do caminho e atenuação admissível.

Como mostrado anteriormente o valor da vazão é obtido através da diferença dos tempos de trânsito da onda ultrassônica no sentido de montante e no sentido de jusante. Dessa forma, a escolha da configuração adequada deve levar em consideração a obtenção de tempos significativamente maiores que o tempo de amostragem do medidor.

Sendo assim, se a tubulação é de pequeno diâmetro, é interessante aumentar o caminho a ser percorrido empregando configurações “V” ou “W”. Já as tubulações de maior diâmetro (centenas de polegadas), a questão não se encontra em se obter um tempo adequado, mas no problema da atenuação do sinal, quando este percorre caminhos muito grandes, quando se dá preferência à configuração “Z”.

As vantagens do método ultrassônico são:

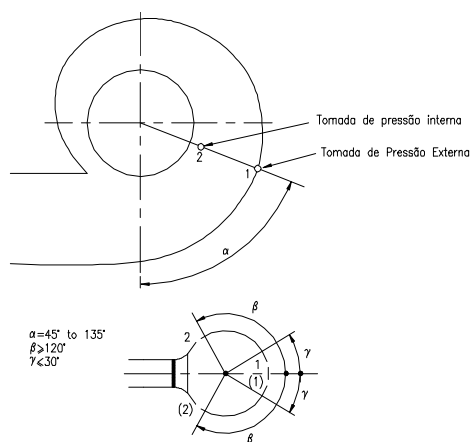
- O custo total deste sistema é baixo, uma vez que os instrumentos, sua instalação e manutenção têm baixo custo;
- Após a montagem o sistema pode operar sem interferir no funcionamento da unidade, ou seja, com pouco (ou desprezível) aumento da perda de carga localizada;
- Excelente precisão;
- Pouca interferência no desempenho da unidade e a possibilidade de utilização em condutos de grandes diâmetros;
- Possibilidade de utilização tanto para medições permanentes quanto para ensaios de medição.

As desvantagens do método ultrassônico é que para a instalação dos transdutores é necessário à parada de máquina e o esvaziamento do conduto, além da necessidade de mão-de-obra especializada para a instalação e operação do sistema, pois os transdutores devem ser posicionados de forma precisa, com as distâncias entre elementos exatamente conhecidas.

4.3.1.7 Método de Winter-Kennedy

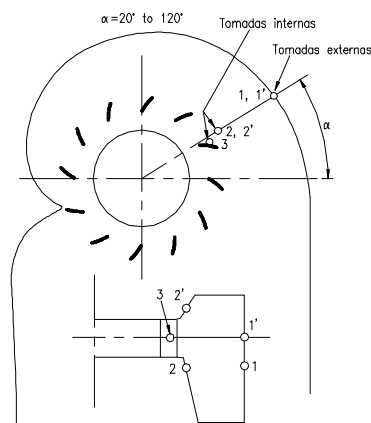
O método desenvolvido por I. A. Winter e A. M. Kennedy na década de 1920 é aplicado à medição de vazão em turbina hidráulica e baseia-se em equacionar a vazão e a diferença de pressão estática entre duas tomadas de pressão localizadas no raio interno da caixa espiral, próximo ao rotor da turbina, e no raio externo da caixa espiral, longe do rotor, conforme pode ser observado nas Figuras 4.18 e 4.19 retiradas da CEI/IEC 60041 (1991).

Figura 4.18 - Localização das tomadas de pressão para o método de Winter-Kennedy em turbinas com caixa espiral.



Fonte: CEI / IEC 60041, 1991

Figura 4.19 - Localização das tomadas de pressão para o método de Winter-Kennedy em turbinas com caixa espiral em concreto



Fonte: CEI / IEC 60041, 1991

A equação de Winter-Kennedy a ser obtida tem a forma a seguir:

$$Q = C \cdot P^n \quad (4.40)$$

Sendo:

Q = vazão [m^3/s]

ΔP = diferença de pressão entre os pontos de Winter-Kennedy [Pa]

C = constante obtida de Winter-Kennedy [$\text{ms}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$]

n = expoente obtido durante a calibração do método, que aparece, na literatura, com valores iguais ou próximos de 0,5.

A constante **C**, que relaciona a vazão com a diferença de pressão entre dois pontos deve ser determinada no ensaio de modelo reduzido.

Com relação à viabilidade de implementação, uma limitação do método é a necessidade de se ter um modelo reduzido, pois o fator que relaciona a vazão com a diferença de pressão entre dois pontos deve ser determinado no modelo reduzido.

A grande vantagem deste método em relação ao demais é a utilização de equipamentos baixo custo de instalação, fato que torna o método Winter-Kennedy bastante utilizado.

Uma vez instaladas as tomadas de pressão a unidade opera sem interferência, sendo a precisão do método entre ± 1 a 1,2%.

O método Winter-Kennedy é utilizado, predominantemente, para monitoramento permanente da vazão.

4.3.1.8 Análise Comparativa dos Métodos de Medida da Vazão

A Tabela 4.4 mostra um quadro comparativo entre os métodos citados acima para determinação da vazão.

Através de uma representação gráfica, conforme observado na Figura 4.20, foi realizada uma análise comparativa entre os métodos. Os métodos foram comparados segundo critérios de viabilidade técnica e viabilidade econômica. O objetivo desta sistemática foi o de simplificar a visualização e memorização dos conceitos relativos, possibilitando identificar claramente o desempenho de um método em relação aos demais, de acordo com sua posição no gráfico.

Tabela 4.4 - Quadro comparativo dos métodos de medição de vazão

Método	Precisão (faixa de valores usuais-IEC60041)	Interferência da qualidade da água	Dificuldades
Cortina Salina	$\pm 1,0\%$ a $\pm 1,5\%$	Alta	Parada de máquina; Água limpa; Três inserções no conduto;
Gibson- pressão por tempo	$\pm 1,0\%$ a $\pm 2,3\%$	Baixa	Parada de máquina; Grandes trechos retos; Medir vazamentos.
Molinetes	$\pm 2,0\%$ a $\pm 5\%$	Baixa	Fatores relativos ao escoamento (regularidade da distribuição de velocidade, turbulência, vórtice, flutuações periódicas); Qualidade das medidas (número e distribuição dos pontos de medida, efeitos de obstrução, etc).
Diluição	$\pm 1,0\%$ a $\pm 2,0\%$	Alta	Trechos longos de condutos/canais; Local para introdução da solução química;
Vertedor	$\pm 1,7\%$ a $\pm 3,0\%$	Baixa	Obtenção de escoamento regular no canal adutor; Assoreamento; Remanso (elevação do nível) provocado a montante; Necessidade de construção, com custo apreciável;
Ultrassônico	$\pm 0,5\%$ a $\pm 2\%$	Baixa	Alto custo de fabricação; Manutenção especializada
Winter Kennedy	$\pm 1\%$ a $\pm 1,2\%$	Baixa	Necessidade do modelo reduzido.

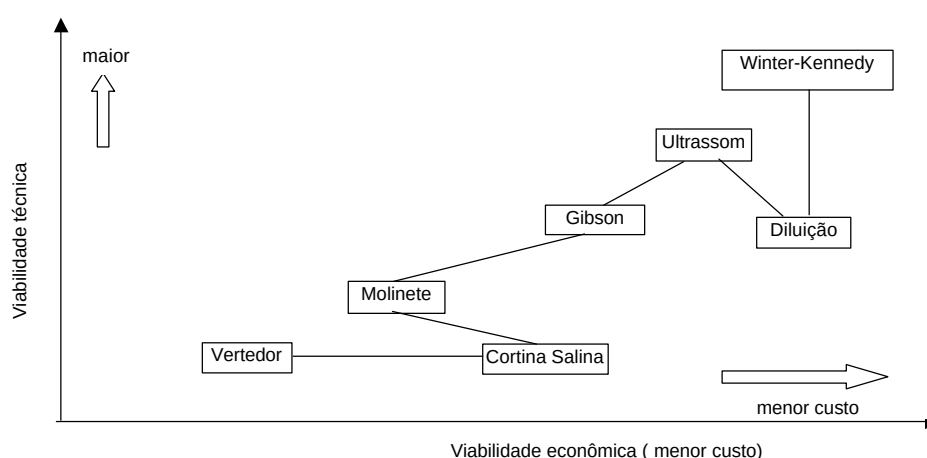
De acordo com Martinez (2001), a precisão do método de medição de vazão é o parâmetro de maior relevância e que impacta diretamente na precisão do rendimento.

As principais características de um método idealizado são:

- Viabilidade técnica de implementação: aplicação a todos os tipos de instalações, sem restrições geométricas de diâmetro ou trecho reto de tubulação, nem limitações quanto à natureza do fluxo;

- Viabilidade econômica de implementação: utilização de equipamentos sofisticados, porém de baixo custo de instalação e manutenção, e que resultem em ganhos devido à otimização de operação;
- Relação Custo x Benefício: baixo custo, alto benefício;
- Tipo de utilização: possibilidade de utilização tanto para ensaios como para monitoramento permanente, sem perda de desempenho;
- Precisão do método: a precisão do método de medição de vazão é o parâmetro de maior relevância e que impacta diretamente na precisão do rendimento.

Figura 4.20 – Viabilidade técnica e econômica dos métodos de medição de vazão



Dentro deste escopo, pode-se identificar os métodos que apresentam maior precisão e selecionar aqueles que melhor se aproximam do conceito ideal:

O **Método de Gibson** apresenta ótima precisão, mas seu alto custo, dificuldade de instalação e grande interferência no funcionamento da unidade, dificultam a sua utilização.

O **Método de Winter Kennedy** apresenta ótima precisão, baixo custo e baixa interferência na unidade. Estes pontos positivos explicam porque este é o método mais utilizado. Um inconveniente é a necessidade da existência do modelo reduzido das máquinas.

O **Método Ultrassônico** é um método mais recente e possui características que o tornam bastante atraente, tais como: apresenta excelente precisão, com custo médio, relativa facilidade de instalação (exceto pela necessidade de se esvaziar o conduto) e versatilidade (ensaios ou monitoramento). Este método apresenta o conjunto mais homogêneo de características. Outra vantagem é que não necessita de modelo reduzido.

O **Método da Cortina Salina**, além de não apresentar uma boa precisão, é necessário que se faça à parada da máquina para a sua instalação e sofre grande interferência da qualidade da água.

O **Método do Molinete** apresenta uma precisão muito baixa, se comparado com os outros métodos estudados.

Para a utilização do **Método do Vertedor**, é necessário que este tenha sido previsto e construído quando da elaboração do projeto básico para que se tenha uma maior viabilidade técnica e econômica.

4.3.2 Métodos para medição da altura de queda

A medida de nível é necessária para a determinação do valor da queda topográfica e posterior cálculo da queda líquida ou disponível.

Estabelece-se inicialmente um ponto fixo principal de referência, cuja cota deve ser determinada com precisão.

De acordo com as normas IEC 60041 (1991), PTC 18 (1992) e NB 228 (1990), na escolha das seções de medida que devem ser utilizadas para determinar o nível da superfície livre da água, deve ser observado que:

- a) O escoamento deve ser estável e não devem existir perturbações locais;
- b) A área da seção transversal utilizada para determinar a velocidade média da água deve ser definida com precisão e ser facilmente mensurável.

Em instalações que possuem canais de adução com escoamento livre, o nível de montante deve ser medido a jusante das grades na entrada da turbina.

O nível de jusante deve, em princípio, ser medido na seção de saída do tubo de sucção. Se isso não for possível, pode-se utilizar uma seção imediatamente a montante da saída do tubo de sucção ou no canal de fuga.

No caso de turbinas operando sem tubo de sucção, torna-se necessário especificar qual deve ser a seção de saída da turbina, de comum acordo por ocasião da compra do equipamento. A medida do nível da superfície livre deve ser feita em pelo menos dois pontos da seção de medida, tomando-se a média das leituras para obtenção do nível real.

Atualmente, para a medida de níveis são utilizados transdutores ou sensores de nível, que substituem o emprego de limnímetros; e sensores de pressão, que substituem o emprego de manômetros.

Os sensores eletrônicos podem ser projetados para detectar uma variedade de aspectos quantitativos de um determinado sistema físico. Tais quantidades incluem:

- Temperatura;
- Luz (Optoeletrônica);
- Campos Magnéticos;
- Tensão;
- Pressão;
- Deslocamento e rotação;
- Aceleração.

Uma grande parte destes sensores, usados nas medidas de grandezas elétricas convertem a energia elétrica em mecânica como consequência da interação eletromagnética dos circuitos. O resultado desta interação é o movimento de um elemento, cuja posição caracteriza o valor da grandeza medida. A sensibilidade de um instrumento é uma característica essencial na obtenção de uma boa qualidade da medida.

É possível fazer uma proporção entre a corrente e a coluna d'água, colocando o transdutor de nível em posição fixa dentro do poço, por exemplo, e com isso saber a variação do nível de água do poço. Um microprocessador lê a corrente e transforma esse valor em altura (nível de água), armazenando-o em uma memória que posteriormente pode ser passado para um computador. Um transdutor de nível pode ser observado na Figura 4.21.

Figura 4.21 - Transmissor de nível hidrostático para leitura de profundidade ou níveis de reservatórios – Catálogo Hytronic



4.3.3 Medidas de pressão

A medida de pressão é efetuada através de transdutores elétricos de pressão ou manômetros comumente existentes no mercado, tais como: de coluna líquida, de mercúrio, de tipo diferencial, de contrapeso ou piezômetros, peso morto, balanças de pressão, ligados ao dispositivo por meio de tomadas de pressão.

O transdutor de pressão, como observado na Figura 4.22, é um equipamento que ao ser alimentado com uma tensão entre 9 e 24 Vcc, deixa passar uma corrente (de 4 a 20 mA) que varia de acordo com a pressão aplicada ao transdutor.

De acordo com a NBR 11374 / 288 (1990), a tomada de pressão deve estar preferivelmente localizada em um trecho reto não necessariamente cilíndrico do conduto, cuja extensão deve ser, para montante, cinco vezes o diâmetro do duto a partir da seção de medida e duas vezes o diâmetro para jusante da seção de medida.

Figura 4.22 – Transdutores de Pressão – Catálogo Hytronic



Devem ser utilizadas quatro tomadas de pressão, sobre dois diâmetros perpendiculares entre si, devendo ser considerada a média desses quatro valores medidos separadamente. As conexões não devem ser dispostas no ponto mais alto da seção de medida nem em sua vizinhança, a fim de evitar a formação de bolsas de ar, tampouco no ponto mais baixo ou na sua vizinhança, para evitar acumulação de sedimentos dentro das derivações.

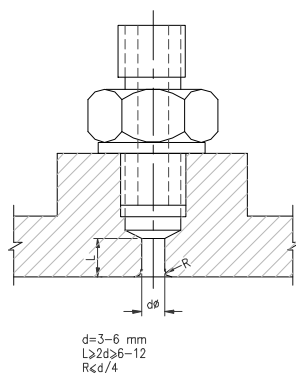
De acordo com a NBR 11374 / NB 228 (1990), podem ser utilizadas duas tomadas de pressão em pontos diametralmente opostos, mediante acordo mútuo. Como o nível do ponto de medida pode ser confundido com o do centro de gravidade do conjunto das tomadas de pressão, este nível deve ser o do centro da seção de medida. O orifício para a tomada de pressão deverá ter um diâmetro de 3mm a 6mm e um comprimento mínimo de 6mm a 12mm e deverá ser feito perpendicularmente à parede do conduto e, para evitar efeitos locais de velocidade, toda rebarba deve ser removida e a borda deverá ser arredondada com um raio igual ou inferior a $d/4$, ou pelo menos ser ligeiramente chanfrada. A superfície do conduto deverá ser lisa e paralela ao escoamento na vizinhança do orifício, numa distância de pelo menos 250mm a montante e 100mm a jusante.

A Figura 4.23 apresenta um orifício para tomada de pressão de acordo com a norma ABNT NB 228 (1990).

A fim de permitir leituras separadas da pressão em qualquer das tomadas, cada tomada deve ser ligada com o manômetro através de um tubo separado, que possa ser fechado separadamente, como pode ser observado na Figura 4.24 (a).

Se for utilizado um coletor anelar, este deve ser dotado de registros individuais para cada uma das tomadas, como mostra a Figura 4.24 (b).

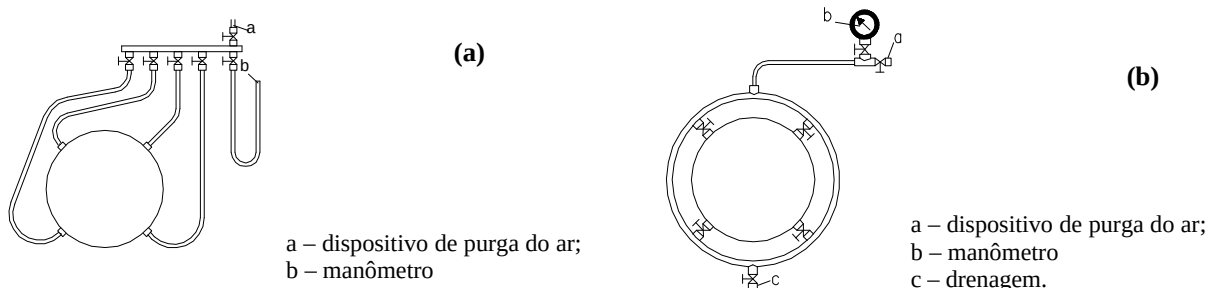
Figura 4.23 - Tomada de pressão



Fonte: ABNT NB 288, 1990

Figura 4.24 (a) – Tomadas de pressão ligadas a manômetro por meio de tubos separados

Figura 4.24 (b) - Tomadas de pressão ligadas a manômetro através de um coletor anelar



Fonte: ABNT NB 228, 1990

Os tubos devem ascender continuamente, sem curvas fechadas ou depressões que possam reter o ar durante as medidas. Além disso, é necessário que o sistema seja dotado de um dispositivo de purga, para eliminar o ar da tubulação. Para isto, uma ventosa de tamanho adequado deve ser prevista no ponto mais elevado do sistema, na vizinhança do manômetro ou transdutor. Todas as tubulações devem ser cuidadosamente inspecionadas, para serem evitados vazamentos, por menores que sejam. Se ocorrer algum vazamento durante os ensaios, estes devem ser interrompidos até que o vazamento seja completamente eliminado (condutos transparentes de material plástico são considerados muito satisfatórios para pressões até 0,6 MPa). Na vizinhança imediata do manômetro ou transdutor, deve ser previsto um ponto fixo de referência que deve servir para determinar o nível do ponto zero do instrumento de medida.

4.3.4 Potência mecânica

A medição da potência de eixo da turbina pode ser realizada de duas maneiras: diretamente, por intermédio de freios (mecânicos, hidráulicos ou elétricos) ou de dinamômetros (geralmente dinamômetros de torção), ou indiretamente, quando a turbina é acoplada a um gerador elétrico somando-se à potência elétrica fornecida às diversas perdas mecânicas e elétricas.

Em ensaios de campo de turbinas hidráulicas o método mais utilizado devido às condições de ensaio e praticidade é o indireto, que será enfocado neste trabalho.

4.3.4.1 Métodos indiretos de medição da potência

Nos métodos indiretos o gerador elétrico acoplado à turbina atua não só como freio de absorção, mas também como instrumento de medição da potência. Por isto, o seu rendimento deve ser conhecido com exatidão para as mesmas condições de carga, tensão, fator de potência, velocidade, temperatura, etc., que devem ser verificadas durante o ensaio da turbina. Este rendimento pode, portanto, diferir ligeiramente daquele obtido para as condições padronizadas.

O rendimento do gerador elétrico deve ser determinado considerando-se todas as perdas especificadas para as máquinas elétricas giratórias, segundo a Norma CEI / IEC 60034-2 (1991). Quando a norma não fornecer todos os detalhes sobre o procedimento a ser adotado na execução das respectivas medições, estas deverão ser efetuadas de acordo com as prescrições de uma das normas já existentes, que deve ser escolhida de comum acordo pelas partes no ato da encomenda da turbina. Frequentemente, o rendimento é determinado por medição indireta, que consiste essencialmente em medir o conjunto das perdas da máquina (perdas totais) e admitir que estas perdas representam a diferença entre a potência mecânica absorvida e a potência elétrica fornecida. Na prática, a determinação das “perdas totais” é geralmente efetuada por medições separadas ou cálculo individual das diversas categorias de perdas e pela sua soma. Por este motivo este método de medição do rendimento é também chamado de “método de perdas separadas”. Atualmente são utilizados dois métodos principais para a determinação das perdas: o método de desaceleração (retardamento) e o método calorimétrico, que se baseia no aquecimento do fluido de refrigeração.

Em ensaios de campo de PCH's, normalmente utiliza-se a curva de rendimento x potência, fornecida pelo fabricante do gerador para a determinação do seu rendimento.

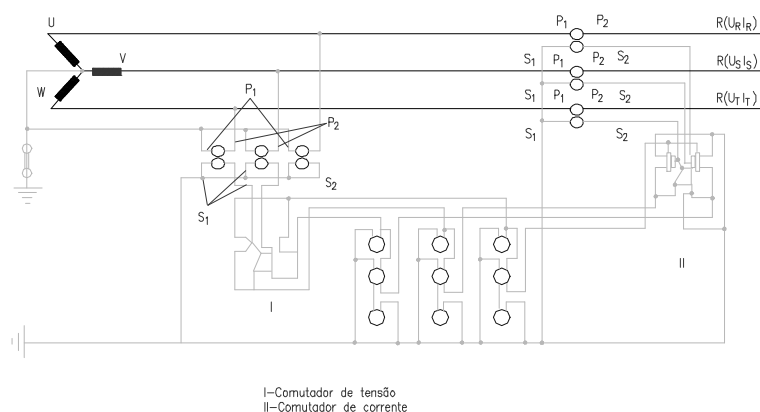
Medida da potência ativa nos terminais do gerador

De acordo com as normas CEI / IEC 60041 (1991), NB 228 (1990) e PTC 18 (1992), a medida da potência ativa deve ser feita, desde que possível, nos terminais do gerador. Caso contrário, a potência medida deve ser acrescida das perdas existentes entre os terminais do gerador e o ponto de instalação dos aparelhos de medida.

Os seguintes cuidados devem ser tomados quando da realização do ensaio:

- Durante os ensaios da turbina, o gerador deve operar, tanto quanto possível, na sua tensão nominal, e, no caso de uma máquina de corrente alternada, na sua frequência nominal e com fator de potência igual à unidade. Se estas condições não puderem ser cumpridas, tal fato deve ser levado em conta no cálculo das perdas e da potência correspondente, bem como na estimativa dos prováveis erros das medições;
- A potência elétrica deve ser medida com wattímetros, classe de precisão de 0,2, blindados e calibrados. Os transformadores utilizados para alimentar estes instrumentos devem ser igualmente da classe de precisão de 0,2.
- Se o neutro de um gerador trifásico for levado para fora e conectado à rede ou a terra, é obrigatória a utilização do método dos três wattímetros, como observado na Figura 4.25.

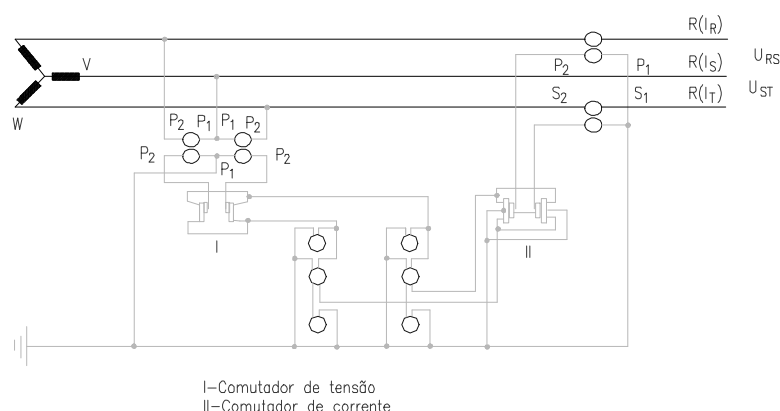
Figura 4.25 – Medida da potência nos terminais de um gerador pelo método dos três wattímetros



Fonte: ABNT NB 228, 1990

Se o neutro do gerador for levado para fora, porém não for ligado à rede ou a terra durante o ensaio, pode ser utilizado tanto o método dos três wattímetros como o método dos dois wattímetros. O método dos dois wattímetros encontra-se esquematizado na Figura 4.26.

Figura 4.26– Medida de potência nos terminais do gerador pelo método dos dois wattímetros



Fonte: ABNT NB 228,1990

Em caso de grandes variações de temperatura pode ser oportuno, sobretudo quando se tratar de contactores de energia, colocar os instrumentos num compartimento cuja temperatura seja constante.

Além da potência nos terminais do gerador é necessário medir também a tensão e a corrente por fase, a tensão e a corrente de excitação, utilizando-se instrumentos de exatidão adequada.

A potência deve ser medida durante o mesmo período que a vazão da turbina for medida, por exemplo, se for empregado o método da pressão em função do tempo, a potência deve ser a média das leituras efetuadas durante o período imediatamente anterior ao registro do diagrama de “pressão-tempo”.

Devido à precisão necessária para os instrumentos elétricos de medição (inclusive para os transformadores de medição) não é admissível nos ensaios de recepção a utilização daqueles montados em painéis. Da mesma maneira, os transformadores de medida que devem ser utilizados para alimentar os wattímetros, os contadores ou os demais devem ser reservados exclusivamente para este fim, não sendo permitido que alimentem ao mesmo tempo os circuitos de medição e proteção, etc. da usina. Entretanto, pode ser feita uma exceção a esta regra se for decidido, de comum acordo entre as partes e eventualmente comprovado por aferição que certos transformadores de medida montados em painéis, oferecem, pela sua classe, sua carga efetiva e estado de uso, o mesmo grau de exatidão, que poderia ser obtido com o emprego de um grupo de instrumentos e de transformadores independentes especialmente destinados aos ensaios especificados anteriormente.

4.3.5 Perdas Mecânicas

São as perdas dos mancais de escora e mancais guias, que devem ser medidas, sempre que possível, através da vazão e do aquecimento do fluido de refrigeração destes componentes.

Se não for possível medir diretamente as perdas, elas podem ser determinadas por estimativa, de comum acordo entre as partes contratantes, mediante comparação ou tomando-se por base as fórmulas empíricas existentes. A potência absorvida pelas diversas bombas de refrigeração, dispositivos, regulador de velocidade, etc, que são acionados por motores elétricos, deve ser determinada pela medida da potência elétrica absorvida por estes motores.

É necessário em certos métodos determinar também as perdas por atrito e ventilação do rotor da turbina quando este gira no ar. Existem fórmulas empíricas onde constam coeficientes que dependem do tipo de turbinas e posição do eixo. Essas fórmulas, os coeficientes e os gráficos que completam os elementos necessários ao cálculo das perdas mencionadas podem ser encontrados nas normas de ensaio de recepção citadas neste trabalho.

4.4 *Index Test* – Teste de Índice

O *Index Test* é um teste de campo por meio do qual determina-se o rendimento da turbina em toda a sua faixa de operação (abertura do distribuidor), sendo que os valores obtidos do rendimento são valores relativos, já que estes são calculados tendo como base um valor de rendimento de referência, como por exemplo, o de rendimento máximo garantido.

O *Index Test* fornece informações úteis sobre o comportamento de uma turbina e normalmente é utilizado durante o comissionamento e operação da máquina e pode ser considerado como parte dos testes de aceitação da turbina em campo apenas quando o método de medição da vazão relativa é calibrado por um método aceito pela norma CEI / IEC 60041 (1991) ou quando é usado para determinar a relação correta entre o ângulo das palhetas do rotor e a posição das palhetas do distribuidor, no caso de máquinas de dupla regulação (Kaplan). Em alguns casos o *Index Test* pode ser usado, se ambas as partes estão de acordo, para a verificação da potência garantida.

De acordo com a CEI / IEC 60041 (1991), o *Index Test* pode ser utilizado como uma parte da prova de aceitação em campo para:

- Determinar a relação correta entre as pás do rotor e as pás do distribuidor em turbinas de dupla regulação;
- Para fornecer dados adicionais durante a prova de aceitação em campo;
- Para determinar as características de execução expressadas por valores relativos de potência, vazão e rendimento;
- Para verificar a potência garantida se ambas as partes estão de acordo;
- Executar faixas (“range”) fora da garantia se o medidor de vazão estiver calibrado;
- Para comparar a curva-índice do protótipo com as curvas baseadas no do ensaio do modelo;

Abaixo, estão descritas algumas das vantagens do *Index Test*:

- É possível conhecer as aberturas do distribuidor e a potência da qual pode ser obtida a melhor eficiência;
- Pode-se determinar as eficiências relativas para outras aberturas do distribuidor, permitindo um uso mais racional e econômico da água utilizada;
- Provas periódicas por este método, podem contribuir para detectar ineficiências causadas por obstruções na grade da tomada d’água, corrosão, cavitação, materiais estranhos acumulados na passagem de água, etc.

4.4.1 Condições gerais do *Index Test*

Para garantir uma execução objetiva do *Index Test*, os seguintes pontos devem ser observados:

- A vazão garantida, no mínimo tem que estar disponível;
- A queda real da instalação deve alcançar aproximadamente a queda nominal, na qual foram fixadas as garantias da turbina;
- Durante os ensaios não devem ser executados trabalhos ou atividades nas áreas a montante ou a jusante da unidade geradora.

4.4.2 Medição da vazão relativa

Uma prova de índice não requer nenhuma medida absoluta da vazão e para a medida da vazão relativa são utilizados freqüentemente os métodos abaixo:

Medida da Diferença de Pressão entre tomadas instaladas na caixa espiral da turbina

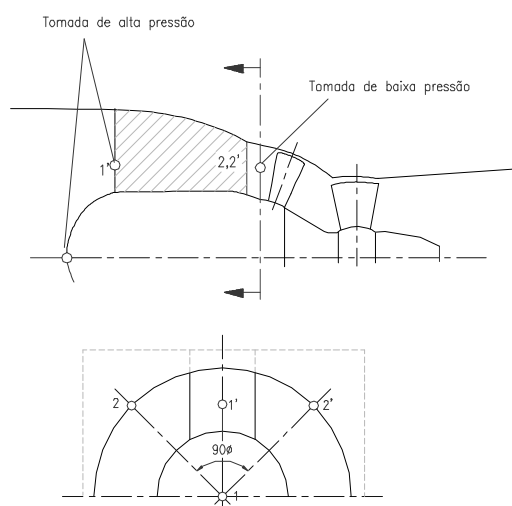
Este é o método de Winter-Kennedy, que consiste em determinar os valores da vazão através da medida da diferença de pressão de tomadas localizadas na caixa espiral da turbina. O diferencial usado para os cálculos é medido entre a tomada de alta pressão (baixa velocidade) e a tomada de baixa pressão (alta velocidade). A equação do método acima e demais explicações relativas ao método já foram apresentadas no item 4.3.1.7 deste trabalho.

Medida da diferença de pressão em turbinas axiais

Em aplicações onde a medida relativa da vazão é realizada através do método da pressão diferencial em turbinas Bulbo, as tomadas de pressão devem ser localizadas como mostra a Figura 4.27.

A tomada de alta pressão deve ser instalada no ponto de estagnação do bulbo (ponto 1) ou do acesso ao eixo (ponto 1') e a tomada de baixa pressão deve ser localizada diretamente a montante das palhetas diretrizes, entretanto com suficiente distância da ponta do perfil até a máxima abertura da palheta diretriz (ponto 2 ou 2'). Sendo que a vazão deve ser assumida como sendo proporcional a raiz quadrada da diferença de pressão.

Figura 4.27 – Localização das tomadas de pressão em turbinas axiais.



Para outros tipos de turbinas axiais, por exemplo, a turbina “Pit”, aplicações análogas podem ser feitas.

Medida da vazão relativa pelo Método Ultrassônico

Esse método é apropriado para o *Index Test* devido à boa repetibilidade das medidas e uma boa característica linear.

O método Ultrassônico foi apresentado no item 4.3.1.6 deste trabalho.

4.5 Considerações Finais

As seguintes informações são úteis no planejamento do ensaio de campo:

- Determinação da disponibilidade de equipamentos de ensaio e pessoas treinadas para medida de grandes vazões com a precisão requerida.
- Consideração do tempo do ensaio para cada método. Alguns métodos requerem o esvaziamento do conduto por longos períodos, instalação e remoção dos equipamentos, outros requerem apenas uma interrupção limitada da operação normal da unidade para inspeção e teste se os acessórios de ensaio foram instalados durante a construção.

Estes fatores são significantes para o custo total do ensaio.

Alguns métodos requerem uma longa série de leitura, outros métodos requerem apenas alguns segundos para fazer uma única leitura. Essas considerações são importantes quando se tem dificuldade em manter condições estáveis (constantes) durante um ensaio.

É essencial para que o ensaio de campo seja realizado, que alguns itens sejam definidos durante a fase de projeto, são eles:

- Localização das tomadas de pressão;
- Método de medida da vazão e dispositivos;
- Quantidade e localização das conexões para instrumentos;
- Localização e tipos de tubulações dos dispositivos de medida de pressão e vazão;
- Providências para medida da potência.

Com relação aos medidores de vazão, as pesquisas aumentaram consideravelmente nos anos 90, ganhando em precisão, confiabilidade e versatilidade, podendo estes ser aplicados a condições de serviço cada vez mais diversificadas. Como consequência do grande desenvolvimento da tecnologia, da competição entre fabricantes de instrumentos e das exigências crescentes do mercado relativamente a desempenho, qualidade e segurança, a instrumentação enriqueceu-se recentemente de inúmeras inovações em nível de componentes, produtos e sistemas.

Quando da escolha do método de medida da vazão, estes devem ser analisados segundo os critérios:

- Viabilidade de implementação: facilidade e tempo de instalação, mão-de-obra menos especializada, facilidade de acesso ao conduto, entre outros;

- Interferência no funcionamento da unidade: perda de carga imposta ao sistema pelos equipamentos de medição de vazão, e o fato de a unidade geradora poder estar ou não em operação durante a medição;
- Viabilidade econômica: relação custo x benefício.
- Tipo de utilização (permanente x ensaio): sistema permanente é aquele que é projetado para permanecer instalado na unidade (usado para monitoramento do desempenho), enquanto sistema para ensaio é aquele que é utilizado apenas para as medições, porém não permanece instalado na unidade.

Capítulo 5

ENSAIOS DE CAMPO EM PCH's

5.1 Considerações Preliminares

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em dois ensaios de campo realizados em PCH's distintas, estes resultados serão analisados e comparados com os valores garantidos.

No Estudo de Caso 1, para a medição da vazão foi utilizado o método de Gibson.

No Estudo de Caso 2 foi realizado o *Index test* para verificação da potência garantida, conforme previamente acordado entre os proprietários da central, o fabricante da turbina e o responsável pelos ensaios, sendo o método de medida de vazão relativo o de Winter-Kennedy.

5.2 Estudo de Caso 1

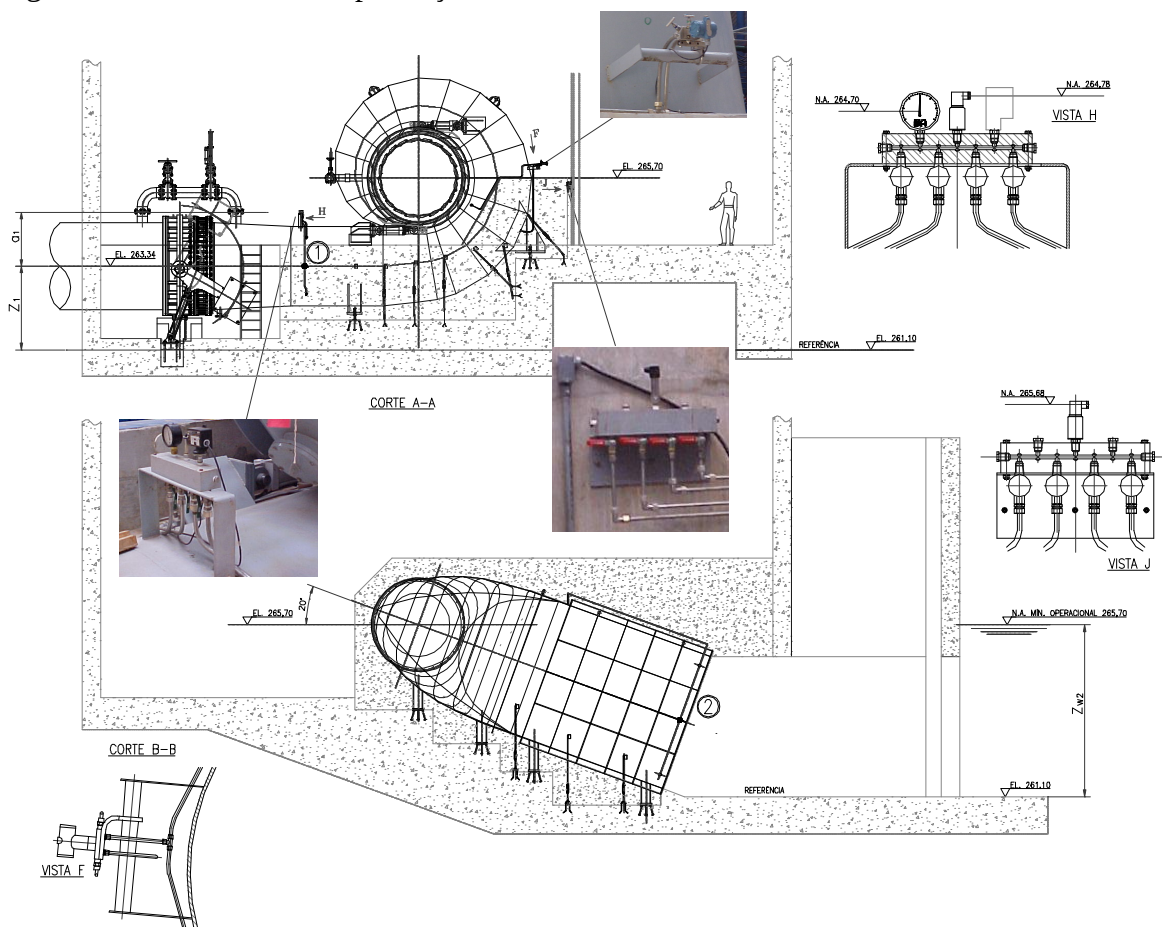
A PCH Alto Jauru está situada no município de Araputanga em Mato Grosso e encontra-se em operação comercial desde 2002, época em que os ensaios de campo foram realizados.

5.2.1 Características Gerais da PCH Alto Jauru

A PCH Alto Jauru é uma usina do tipo Fio D'água, cuja casa de força é composta de dois grupos geradores de eixo horizontal, onde a turbina forma com o gerador uma linha de eixo composta de 02 (dois) mancais, sendo 01 (um) mancal combinado guia/escora localizado do lado acoplado ao rotor da turbina e 01 (um) mancal guia localizado do lado oposto ao acoplamento.

Um desenho de implantação da turbina está representado na Figura 5.1, com as principais dimensões necessárias para a realização dos ensaios.

Figura 5.1 – Desenho de Implantação da Turbina na PCH em estudo



Fonte: Elaboração própria

Anteriormente a realização dos ensaios foi realizada uma reunião entre os proprietários da central, o fabricante da turbina e o responsável pelos ensaios. Nesta reunião foram definidos os procedimentos de testes tendo como objetivo principal a determinação da curva de rendimento da turbina, para que esta pudesse ser comparada com os valores garantidos pelo fabricante, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Garantias para queda líquida nominal de 44,70 m

	PORCENTAGEM DA POTÊNCIA					
	$P_{10/10}$	$P_{9/10}$	$P_{8/10}$	$P_{7/10}$	$P_{6/10}$	$P_{5/10}$
η (%)	91,10	93,50	91,50	88,50	86,50	83,70
Potência [kW]	10.307	9.276	8.245	7.215	6.184	5.154
Ponderação	0,08	0,56	0,22	0,09	0,05	-
Rendimento ponderado garantido:	92,68 %					

Foi também acordado entre as partes, que os ensaios se restringiriam às potências de 90%, 95% e 100% da potência nominal.

As principais dimensões de projeto utilizadas para a obtenção dos resultados estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dimensões de projeto do Estudo 1 – PCH Alto Jauru

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Altura de queda líquida nominal	H_n	44,70	[m]
Potência nominal da turbina (potência de eixo)	P_e	10.307	[kW]
Vazão garantida (nominal)	Q_r	24,50	[m ³ /s]
Rotação nominal	n	327,27	[rpm]
Área de entrada da Caixa Espiral	A_1	3,464	[m ²]
Área de Saída do Tubo de Sucção	A_2	9,365	[m ²]
Plano de Referência	PR	261,10	[m.s.n.m]
Distância entre o nível de referência e o nível operacional da turbina (02 máquinas)	z_w	6,45	[m]
Elevação da linha de eixo da turbina	El.	265,70	[m.s.n.m]
Diâmetro do rotor da turbina	ϕ_R	1,70	[m]
Diâmetro de entrada da caixa espiral	ϕ_{ce}	2,30	[m]
Diâmetro do conduto forçado	ϕ_{cf}	3,20	[m]
Distância entre as tomadas de pressão no conduto forçado para a realização do método de Gibson	L	20,0	[m]
Área da seção transversal do conduto forçado	A	8,042	[m ²]
Nível do transdutor de pressão da caixa espiral com relação ao nível de referência	h_1	264,986	[m]
Nível do transdutor de pressão na saída do tubo de sucção com relação ao nível de referência	h_2	265,393	[m]

5.2.2 Procedimento de Teste

Os ensaios foram realizados em 04 (quatro) dias e o procedimento utilizado para a sua realização é apresentado a seguir:

- Análise dos certificados de calibração da instrumentação a ser utilizada no ensaio;
- Análise dos desenhos de implantação do projeto, a partir dos quais foram retiradas as grandezas geométricas a serem utilizadas nos cálculos.
- Desobstrução dos anéis piezométricos das tomadas de pressão estática;
- Instalação dos transdutores e demais instrumentação;
- Calibração dos transdutores;
- Para cada um dos pontos, após estabilização hidráulica e elétrica, foram realizadas as medições listadas a seguir:
 - Medição da potência elétrica, através de um wattímetro digital trifásico, conectado ao secundário dos transformadores de corrente e potencial do gerador;
 - Medição da diferença de pressão entre os anéis piezométricos instalados no conduto forçado, através do registro da onda tempo/pressão (método de Gibson) pela rejeição de carga. A onda de pressão durante o fechamento do distribuidor foi registrada através de um transdutor diferencial, conectado a uma placa de aquisição ligada a um microcomputador. Para determinação da área sob a curva tempo/pressão (vazão) foi utilizado método computacional de integração, conforme recomendado pela CEI/IEC 60041 (1991).
 - Medições da pressão na entrada da caixa espiral e na saída do tubo de sucção através de transdutores de pressão, cujos sinais de saída também foram levados até a placa de aquisição;
 - Medida da temperatura de entrada e saída da água do trocador de calor localizado no mancal de escora, pois como este encontra-se localizado no gerador, e como durante os ensaios do gerador este mancal não foi submetido a esforço axial, foram determinadas as perdas no mesmo, tendo esta sido considerada quando da determinação do rendimento da turbina;

Os valores obtidos foram trabalhados em uma rotina de cálculo, baseada nas especificações da norma CEI / IEC 60041 (1991), para a configuração de montagem da central, o que permitiu a determinação dos parâmetros necessários para a determinação do rendimento da turbina.

5.2.3 Parâmetros registrados e calculados

Os parâmetros registrados durante o ensaio estão apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4 para os dois grupos geradores ensaiados.

Tabela 5.3 – Valores registrados para a Máquina 1 – PCH Alto Jauru

	Teste Nº	Potência elétrica [MW]	Pressão na entrada da caixa espiral [mca]	Pressão na saída do tubo de sucção [mca]	Vazão de óleo no mancal de escora [l/min]	Temp. da água no Trocador de calor [°C]	
						Entrada	Saída
100	1	10,021	45,558	2,551	23	42,30	29,70
	2	10,081	45,498	2,496	24	43,90	29,70
	3	9,919	45,592	2,444	24	43,20	29,80
95	4	9,550	46,262	2,520	23	42,70	29,70
90	5	8,980	46,748	2,520	23	42,70	29,70
	6	8,896	46,879	2,686	23	42,70	29,90

Tabela 5.4 – Valores registrados para a Máquina 2

Carga %	Teste Nº	Potência elétrica [MW]	Pressão na entrada da caixa espiral [mca]	Pressão na saída do tubo de sucção [mca]	Vazão de óleo no mancal de escora [l/min]	Temp. da água no Trocador de calor [°C]	
						Entrada	Saída
100	1	10,000	45,119	2,540	26,0	42,30	29,90
	2	10,066	45,141	2,599	26,0	42,30	29,90
95	3	9,534	45,929	2,601	26,0	41,90	30,20
90	4	8,945	46,421	2,577	26,0	41,50	31,90
	5	8,981	46,340	2,469	26,0	42,80	30,20

Com os valores registrados apresentados nas Tabelas acima, foi possível calcular os valores apresentados nas Tabelas 5.5. e 5.6 para os respectivos grupos geradores.

Tabela 5.5 – Valores calculados para a Máquina 1

	Carga [%]					
	100			95	90	
Parâmetro	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 1	Teste 2
Vazão [m ³ /s]	25,386	25,301	25,835	23,992	22,663	22,569
e _{vazão} [%]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Rendimento do gerador [%]	96,81	96,82	96,80	96,76	96,67	96,66
Potência eixo [kW]	10.359	10.421	10.255	9.878	9.297	9.211
e _{eixo} [%]	0,876	0,8732	0,8778	0,87337	0,8731	0,87361
Potência Hidráulica [kW]	11.133	11.090	11.387	10.634	10.102	10,049
e _{hidr} [%]	1,8916	1,85488	1,86014	1,8376	1,8084	1,80891
Perda no mancal [kW]	7,776	9,145	8,630	8,023	8,023	7,900
e _{pmancal} [%]	4,5247	4,0913	4,2736	4,41801	4,41801	4,4704
Queda líquida nominal [m]	44,97	44,95	45,20	45,45	45,71	45,66
e _{queda} [%]	1,6057	1,56223	1,5685	1,5417	1,50672	1,50737
Rendimento da turbina [%]	93,05	93,97	90,06	92,89	92,03	91,66
e _{rend.turbina} [%]	2,0846	2,050	2,057	2,03458	2,00811	2,00882

Tabela 5.6 – Valores calculados para a Máquina 2

	Carga [%]				
	100		95	90	
Parâmetro	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 1	Teste 2
Vazão [m ³ /s]	25,901	25,796	24,060	22,453	22,827
e _{vazão}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Rendimento do gerador [%]	96,81	96,82	96,75	96,67	96,67
Potência eixo [kW]	10.342	10.405	9.862	9.260	9.299
e _{eixo}	0,87752	0,88113	0,87724	0,87896	0,90397
Potência Hidráulica [kW]	11.265	11.205	10.561	9.908	10.093
e _{hidr}	1,87904	1,84529	1,81906	1,80955	1,81031
Perda no mancal [kW]	12,637	8,651	8,163	6,698	8,795
e _{pmancal}	3,32903	4,46736	4,68626	5,55202	4,40968
Queda líquida nominal [m]	44,601	44,544	45,012	45,253	45,342
e _{queda}	1,59084	1,55082	1,51954	1,50814	1,50905
Rendimento da turbina [%]	91,81	92,86	93,38	93,46	92,13
e _{rend.turbins}	2,07384	2,04486	2,01954	2,01173	2,02346

As correções da queda líquida nominal e vazão dos valores medidos foram calculados, e os valores estão apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8:

Tabela 5.7 – Valores corrigidos para $H_n = 44,70$ [m] –Máquina 1

	Carga [%]					
	100			95	90	
Parâmetro	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 1	Teste 2
Q corrigido [m ³ /s]	25,31	25,23	25,69	23,79	22,41	22,33
P _e corrigido [kW]	10.265,85	10.334,18	10.085,31	9.634,51	8.990,57	8.922,04

Tabela 5.8 – Valores corrigidos para $H_n = 44,70$ [m] –Máquina 2

	Carga [%]				
	100		95	90	
Parâmetro	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 1	Teste 2
Q corrigido [m ³ /s]	25,93	25,84	23,98	22,32	22,60
P _e corrigido [kW]	10.376,45	10.459,71	9.759,64	9.090,78	9.102,20

5.2.4 Comparação com os valores garantidos

De forma a tornar possível a comparação dos resultados dos ensaios com os valores garantidos pelo fabricante, que são especificados para queda nominal de 44,70m, os resultados dos ensaios foram referidos para esse valor de queda líquida nominal através das relações de semelhança hidráulica, conforme previsto na Norma CEI / IEC 60041 (1991).

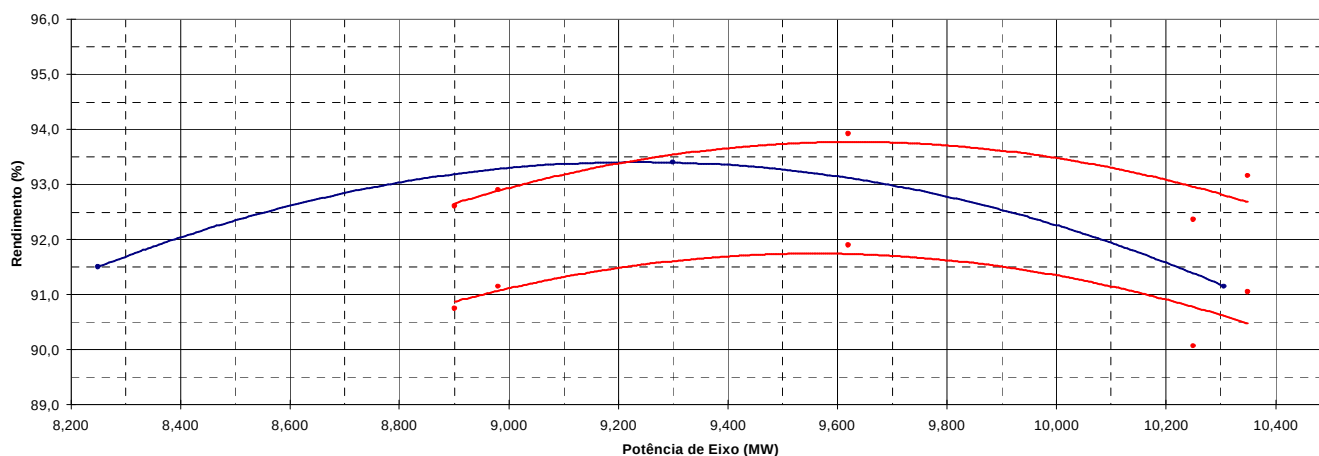
Conforme acordado entre as partes, anteriormente à realização dos ensaios, os rendimentos obtidos foram comparados com os rendimentos garantidos pelo fabricante da turbina. Os gráficos a seguir apresentam, para cada máquina, a curva de rendimento garantido e a curva de rendimento obtido quando da realização do ensaio.

Nestes gráficos, as curvas em vermelho correspondem à curva de rendimento obtido nos ensaios somados ao valor positivo da incerteza (curva superior) e somada ao valor negativo da incerteza (curva inferior). Desta forma obtém-se uma faixa, com os valores máximos e mínimos dos rendimentos. A curva traçada em azul corresponde à curva de rendimento garantido pelo fabricante extrapolada até 80% da potência nominal. Estes valores não poderão ser maiores que aqueles obtidos nos ensaios. Isso corresponde a dizer que, nos gráficos, a curva em azul deverá estar localizada sempre abaixo da curva vermelha superior.

As curvas de rendimento medido (em vermelho), foram obtidas para 90, 95 e 100% da potência nominal e de forma geral, os rendimentos medidos encontram-se superiores àqueles garantidos pelo fabricante, à exceção de uma pequena porção da curva da máquina 1, localizada próximo de 90% da potência nominal. O restante da curva de ensaio que foi extrapolada, também mantém-se abaixo do rendimento garantido, porém, ressalta-se que essa parte da curva pode não corresponder a valores reais de funcionamento da máquina.

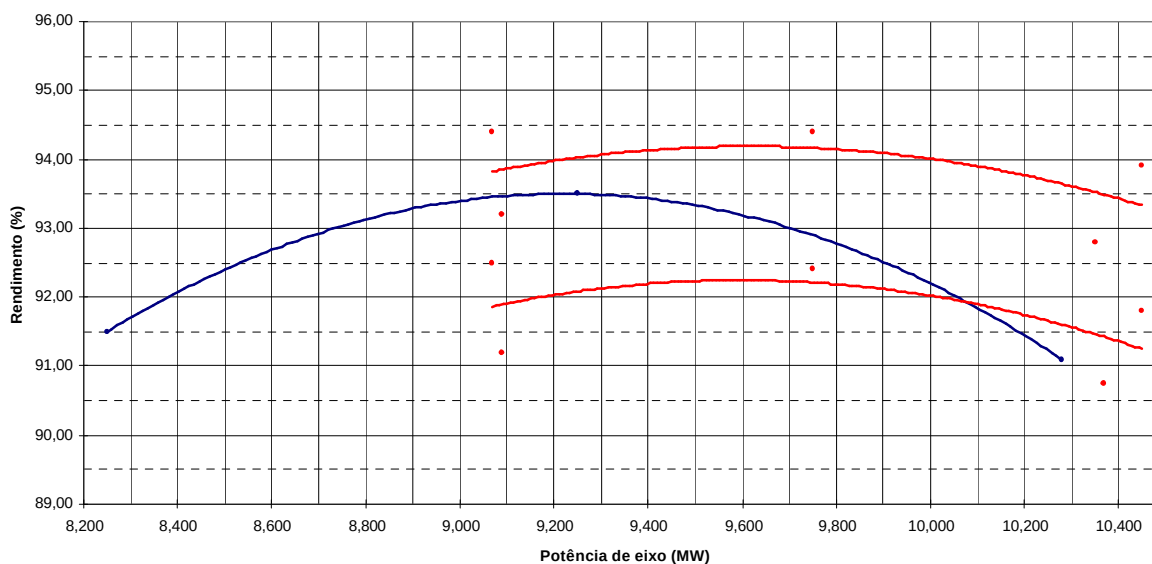
Estudo de Caso 1 – Máquina 1

Gráfico 1 - Comparação entre os rendimentos obtidos nos ensaios e os rendimentos garantidos pelo fabricante



Estudo de Caso 1 – Máquina 2

Gráfico 2 - Comparação entre os rendimentos obtidos nos ensaios e os rendimentos garantidos pelo fabricante



Legenda:

— Valores garantidos

— Valores obtidos somados e subtraídos da incerteza da medida

5.3 Estudo de Caso2

A PCH utilizada no Estudo de Caso 2 está situada no município de Arenal, Costa Rica e encontra-se em operação comercial desde 2003, época em que os ensaio de campo foram realizados.

5.3.1 Características Gerais da PCH

A PCH em estudo é uma central hidrelétrica de derivação, cuja casa de força é composta de um grupo gerador de eixo horizontal, turbina do tipo Francis Simples, sendo a concepção da linha de eixo do grupo gerador idêntico ao da PCH apresentado no Estudo de Caso 1.

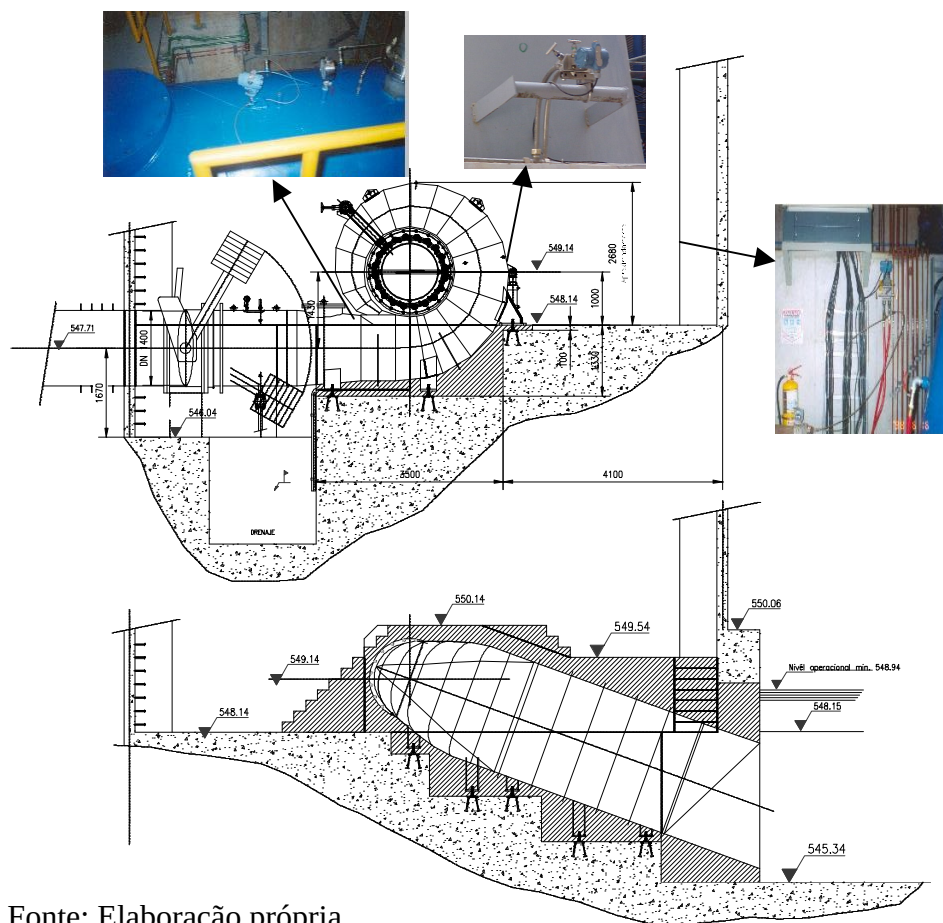
As garantias de potência e rendimento para a queda líquida nominal de 87,79 m fornecidas pelo fabricante da turbina estão apresentadas na Tabela 5.9 a seguir:

Tabela 5.9 – Garantias de Potência e Rendimento para a queda líquida nominal de 87,79 m

Grandeza	Porcentagem da Potência					
	P _{10/10}	P _{9/10}	P _{8/10}	P _{7/10}	P _{6/10}	P _{5/10}
η (%)	93,80	92,50	90,30	87,90	85,10	80,30
Potência	6.786	6.023	5.226	4.451	3.694	2.905

A Figura 5.2 apresenta o desenho de implantação da turbina da PCH na qual os ensaios de recepção foram realizados e na Tabela 5.10 estão apresentadas suas principais dimensões de projeto.

Figura 5.2 – Desenho de implantação da turbina – Estudo de Caso 2



Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.10 - Dimensões de projeto da PCH em estudo

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Área de Entrada de Caixa Espiral	A_1	1,539	$[m^2]$
Área de Saída do Tubo de Sucção	A_2	3,657	$[m^2]$
Elevação da Linha de Eixo da Turbina	El.	549,14	$[m]$
Diâmetro do rotor da turbina	ϕ_R	1.030	$[mm]$
Diâmetro de entrada da Caixa Espiral	ϕ_{CE}	1.400	$[mm]$
Plano de Referência	PR	545,34	$[m]$
Latitude	ϕ	10,50	$[^\circ]$
Altitude	Z	547,40	$[m]$
Temperatura da água	T	23,90	$[^\circ C]$
Massa específica da água (calculada conforme IEC/CEI 60041)	ρ	997,66	$[kg/m^3]$
Aceleração da gravidade	g	9,78	$[m/s^2]$

5.3.2 Procedimento de Ensaio

Antecipadamente a realização dos ensaios, que foram executados em dois dias, foi acordado entre as partes o procedimento de teste a ser adotado na realização do Index Test, método utilizado para verificação da potência garantida da turbina, conforme já definido no contrato de fornecimento.

Inicialmente foram analisados os certificados de calibração, os protocolos de fabricação a partir dos quais foram determinadas as grandezas geométricas a serem utilizadas nos cálculos.

Em seguida foram desobstruídos os anéis piezométricos das tomadas de pressão estática, calibrados e instalados os transdutores e demais instrumentação.

As medições realizadas nos ensaios estão listadas a seguir:

- Medição da potência elétrica nos bornes do gerador;
- Medição do nível de montante (tomada d'água) através de um sensor de nível instalado no local;
- Diferença de pressão entre as tomadas de pressão do método Winter-Kennedy localizadas na caixa espiral através de um transdutor de pressão diferencial;
- Pressão na entrada de turbina através de um transdutor de pressão;
- Medição da distância entre o nível de referência e o nível de jusante através de um sensor de nível;
- Medição da vazão utilizando um medidor ultrassônico, para comparação dos valores de vazão obtidos pelo método de Winter-Kennedy.

5.3.3 Parâmetros registrados e calculados

A Tabela 5.11 apresenta a média dos valores registrados durante o ensaio.

Tabela 5.11– Média dos valores registrados durante o ensaio

Teste	Hora	Potência Elétrica [MW]	Nível de Montante [m]	Diferença de Pressão [cm]	Pressão na entrada da Turbina [kgf/cm ²]	Distância entre o NR e o NJ [m]	Vazão –Sensor Ultrassônico [m ³ /s]
1	10:40	6,54	640,63	198,60	8,71	4,33	8,23
2	11:25	6,90	640,67	224,84	8,62	4,35	8,77
3	12:39	5,98	640,65	169,77	8,79	4,31	7,54
4	13:11	5,02	640,69	125,43	8,91	4,23	6,50

5	13:35	4,00	640,60	84,23	9,01	4,13	5,29
6	14:02	3,56	640,54	69,87	9,04	4,09	4,83
7	14:22	3,12	640,67	57,78	9,09	4,05	4,38
8	14:50	4,55	640,64	105,7	8,95	4,19	5,92

A partir dos valores registrados acima, foi possível obter os valores apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Valores Calculados

	Valores Calculados							
Teste	1	2	3	4	5	6	7	8
z_{w2} [m]	547,5	547,52	547,48	547,40	547,30	547,26	547,22	547,36
p_1 [m.c.a]	87,54	86,63	88,34	89,55	90,55	90,86	91,36	89,95
Dh – WK [m]	1,986	2,2484	1,6977	1,2543	0,8423	0,6987	0,5778	1,057
Pe [kW]	6748,88	7109,57	6179,75	5195,39	4154,40	3709,06	3265,65	4714,34
e_{eixo} [%]	0,74	0,73	0,74	0,77	0,80	0,83	0,87	0,78
$(Dh)^{0,5}$	1,4093	1,4995	1,3030	1,1200	0,9178	0,8359	0,7601	1,0281
$Pe/(Dh)^{0,5}$	4788,97	4741,40	4742,86	4638,93	4526,63	4437,30	4296,16	4585,47
Vazão relativa medida [m ³ /s]	8,247	8,775	7,625	6,554	5,371	4,892	4,448	6,016
e_Q [%]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
H_n [m]	89,42	88,65	90,07	91,08	91,94	92,19	92,66	91,40
e_H [%]	0,514	0,518	0,510	0,504	0,499	0,498	0,496	0,506
Ph [kW]	7195,33	7590,44	6700,86	5824,71	4817,95	4400,21	4021,80	5365,92
Rendimento relativo da turbina [%]	93,80	93,66	92,22	89,20	86,23	84,29	81,20	87,86
$e_{rendimento}$ [%]	1,75	1,75	1,75	1,76	1,78	1,78	1,80	1,76

As correções da queda nominal e vazão dos valores medidos foram feitas e os valores estão apresentados na Tabela 5.13:

Tabela 5.13 – Valores calculados corrigidos

	Valores calculados para H = 87,79 [m]							
Teste	1	2	3	4	5	6	7	8
Vazão corrigida [m ³ /s]	8,32	8,82	7,72	6,68	5,50	5,01	4,57	6,14
Potência corrigida [kW]	6565,51	7006,11	5947,01	4916,28	3876,54	3446,68	3011,62	4437,52

5.3.4 Comparação com os valores garantidos

No gráfico 3 mostra-se o comportamento do método de Winter Kennedy em relação à potência da turbina e o ponto máximo obtido para determinação da constante K_1 . Como pode-se observar no gráfico, os pontos medidos mostram uma boa consistência dos resultados.

O gráfico 4 representa o diferencial de pressão em função da vazão, que deve gerar uma linha reta que é um indicativo da confiabilidade da prova e pode ser usada para determinar os valores de Q para outras provas futuras.

Considerando a incerteza total calculada, cada ponto medido deve ser representado sobre o diagrama como uma elipse, onde o eixo maior é representado pelo erro, isto nos permite obter uma “faixa” e qualquer ponto dentro desta faixa constitui um valor aceitável para comparar com a garantia, se os valores garantidos de eficiência estão dentro desta faixa a eficiência é cumprida satisfatoriamente.

No gráfico 5 é apresentada a curva de rendimento x potência garantida da turbina pelo fabricante e a curva obtida durante o ensaio, junto com a faixa superior e inferior da incerteza medida. Pode-se verificar que os dados garantidos encontram-se dentro da faixa permitida para a variação do rendimento, o que significa que os valores garantidos pelo fabricante da turbina estão sendo cumpridos.

Gráfico 3 – Comportamento do Método de Winter-Kennedy com relação à potência medida

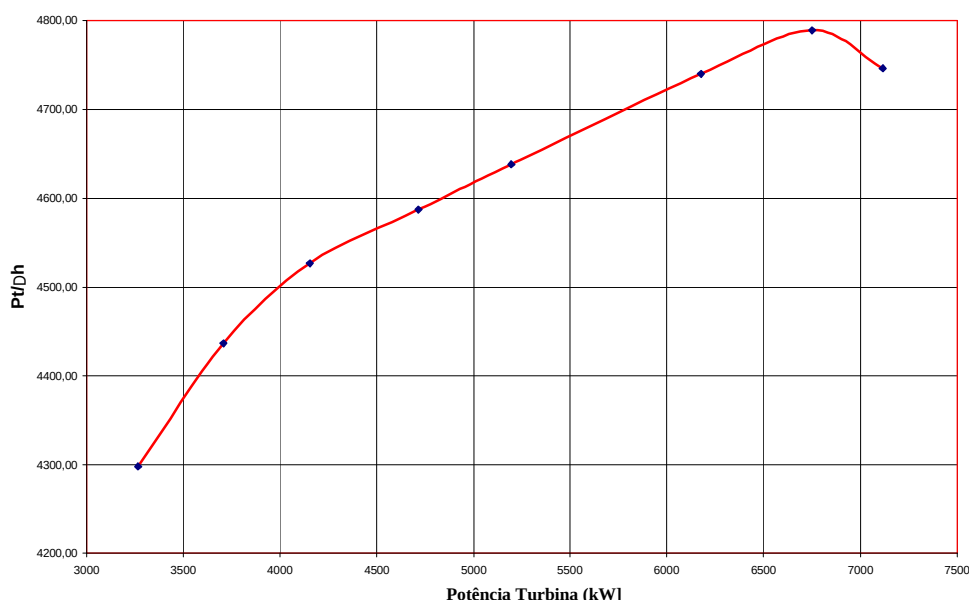


Gráfico 4 – Determinação da Vazão

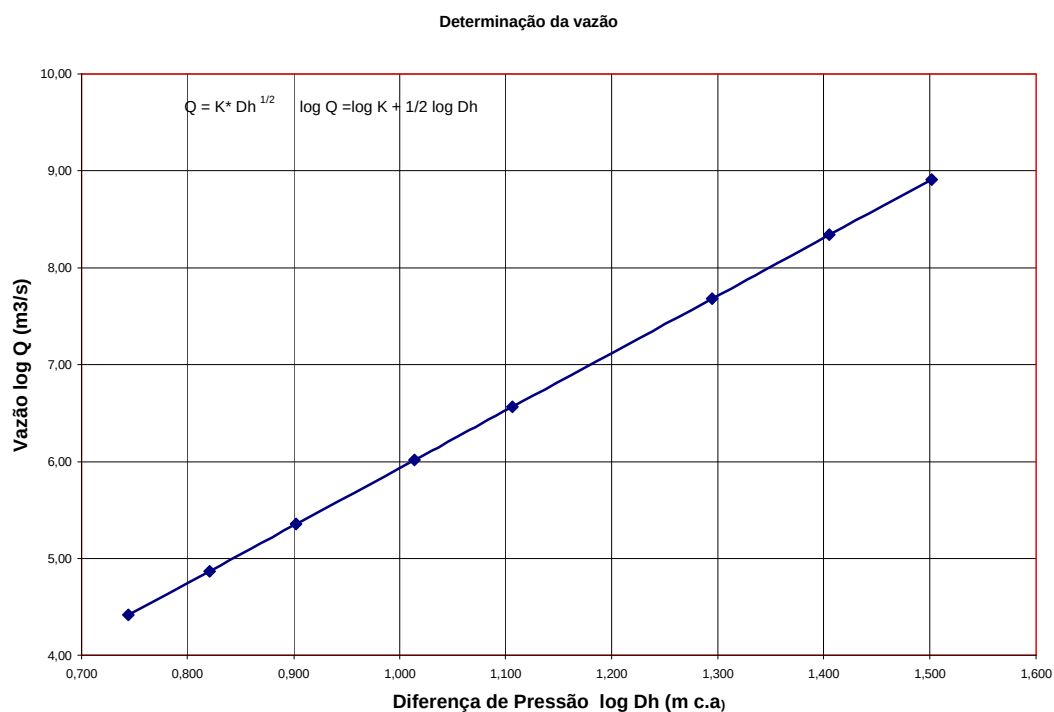
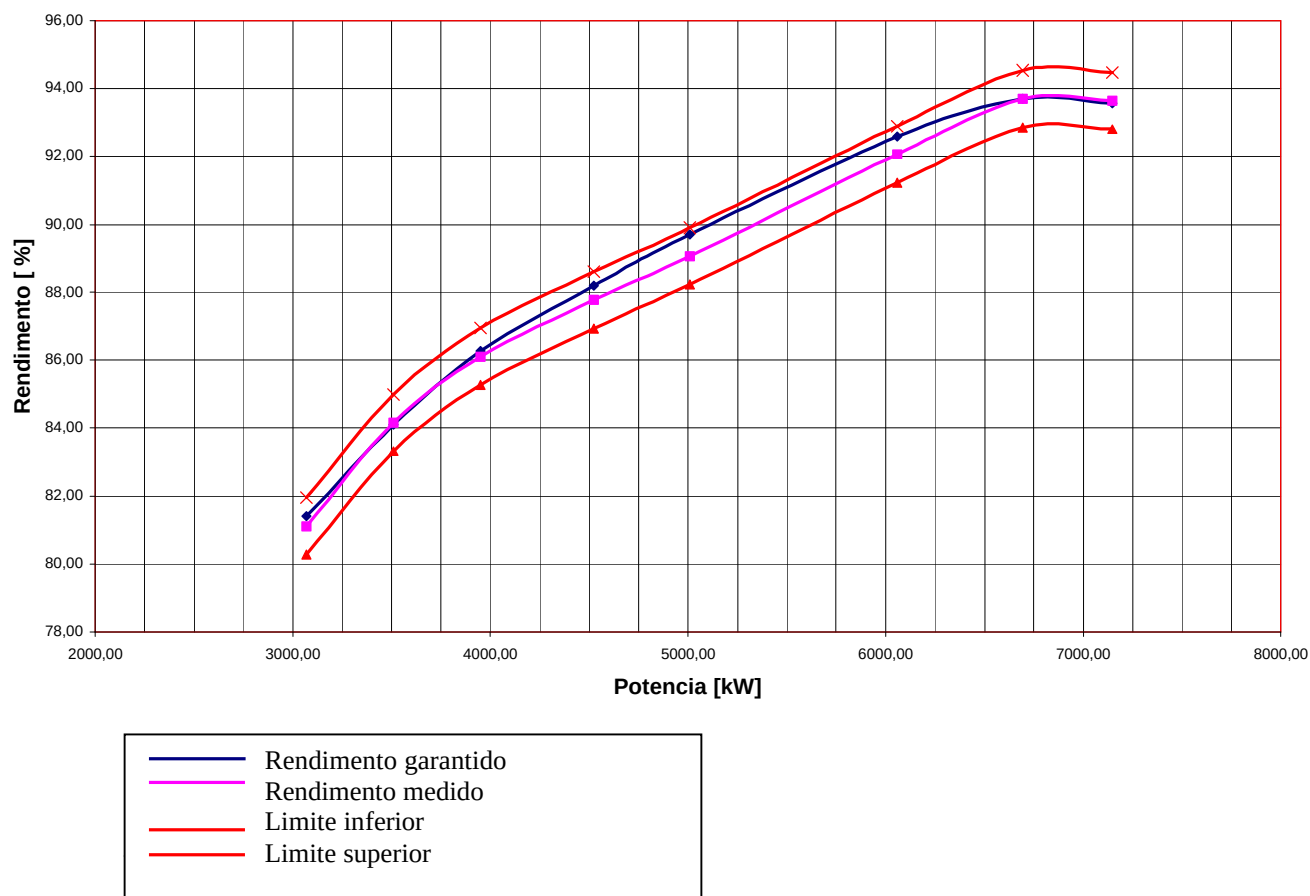


Gráfico 5 – Comparação entre os valores garantidos e os valores obtidos durante o ensaio



5.4 Considerações Finais

Uma dificuldade encontrada foi em relação ao método de medida da vazão para o Estudo de Caso 1, já que não havia sido previsto nenhum método de medição da vazão quando da construção da central, esta dificuldade não foi encontrada no Estudo de Caso 2, pois já havia sido previsto no contrato de fornecimento da turbina a realização do Index Test e para a medida da vazão o método de Winter-Kennedy.

Outra dificuldade na realização dos ensaios no Estudo de Caso 1 foi com relação ao fator de potência, onde o valor do fator de potência deveria corresponder àquele da curva de rendimento do gerador, ou seja, 0,9. Manter este valor, no entanto, implicava em aumento do nível de tensão no barramento de 138 [kV] que já apresentava, normalmente, valores de tensão um pouco acima do nominal. A concessionária de energia solicitou que esse nível de tensão fosse reduzido, e em consequência os ensaios passaram a ser realizados com fator de potência próximo de 1.

Ainda no Estudo de Caso 1, no cálculo da vazão deveria ser considerada a vazão residual, porém, conforme acordado entre as partes envolvidas, esta foi considerada igual a zero, tendo como hipótese o fato de que a válvula borboleta garante estanqueidade.

Com relação ao Index Test, para que fosse garantida uma execução objetiva do ensaio, os seguintes cuidados foram tomados:

- A vazão garantida teve que ser, no mínimo, disponível e a queda disponível teve que ser próxima da queda líquida garantida.
- Durante o ensaio não foram executados trabalhos ou atividades nas regiões a montante (reservatório) ou jusante (canal de fuga) da casa de força.

Para os Casos apresentados acima devem ser feitas as seguintes considerações:

- Devido às dificuldades de se obter as quedas pré-determinadas na ocasião do ensaio, este foi realizado com a queda líquida disponível na época.
- Os testes de desempenho foram realizados nos pontos operacionais mais próximos dos pontos de operação garantidos pelo contrato dentro das condições existentes no campo.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

É importante ressaltar que o propósito deste trabalho é a busca de uma abordagem metodológica para ensaios de campo em pequenas centrais hidrelétricas, considerando que as normas existentes foram desenvolvidas para centrais hidrelétricas independentemente do seu porte.

Em resumo, para as turbinas destinadas a uma usina em projeto são normalmente fornecidas as previsões sobre o desenvolvimento do rendimento e potência em função da vazão. E essas previsões, dentro de determinada faixa de operação são normalmente definidas entre compradora e fornecedora como garantias, fora dessa faixa elas figuram como desempenho esperado.

As bases para a determinação do desempenho podem ser:

- Resultados de ensaios em modelo hidráulicamente bem semelhante;
- Fruto da interpolação dos resultados de ensaios de modelos com velocidades específicas próximas;
- Resultados de medições em protótipos semelhantes.

O desempenho da turbina normalmente é definido por uma das seguintes formas:

- Indicação dos rendimentos, vazões, potências, aberturas e limites de cavitação para uma ou diversas quedas da usina;
- Os mesmos dados acima, porém em forma de um diagrama de colina Vazão-Altura.

Deve-se salientar nesta oportunidade que os hidráulicos preferem apresentar as curvas de desempenho em função da vazão Q (além da queda H) e não em função da potência P . A razão para isso reside no fato de que o comportamento hidráulico de uma turbina depende primariamente e de forma específica da vazão que passa através ou ao lado dos perfis, malhas e canais.

A comprovação das garantias de rendimento pode ser feita através de um ensaio em modelo ou através de medições no protótipo, na usina. A comprovação da potência garantida sempre é feita no protótipo.

No caso de PCH's, onde o custo de um ensaio de modelo reduzido é muito elevado quando comparado com o investimento feito, é comum que o fornecedor da turbina, com o intuito de minimizar os custos, proponha que seja feita apenas a comprovação das garantias contratuais

através do ensaio de campo. E, como o dimensionamento da turbina é realizado baseado em modelos bem semelhantes já ensaiados no laboratório do fabricante é fornecido um relatório de transposição do modelo, no qual foi baseado o dimensionamento da turbina, para o protótipo.

Em ensaios de campo, uma característica bem ressaltada é que as garantias de potência e rendimento da turbina são respeitadas caso a turbina venha a fornecer uma potência/ rendimento pelo menos iguais aos seus valores garantidos, à altura de queda líquida nominal e rotação nominal correspondentes, sendo que estas garantias podem ser estabelecidas para diferentes alturas de queda líquida.

Os ensaios de campo, quando realizados corretamente, tornam-se uma importante ferramenta na análise de desempenho da turbina auxiliando a todos a focalizar problemas. Além de fornecer variáveis que representam o desempenho, fornecem também variáveis que possibilitam o monitoramento de suas grandezas, como é o caso da vazão.

Uma das principais limitações foi encontrar na literatura a aplicação de alguns métodos de medida da vazão utilizados na prática e quais seriam aplicáveis a Pequenas Centrais Hidrelétricas, já que as metodologias encontradas narravam apenas os métodos de uma maneira genérica, não sendo suficiente para a sua aplicação real. Esta constitui a principal contribuição deste trabalho na construção de conhecimento sobre este tema.

É importante ressaltar que a escolha do método de medida da vazão deve ser realizada enquanto a central hidrelétrica estiver sendo planejada. O circuito hidráulico onde os dispositivos de medição da vazão serão instalados podendo ser: canal, túnel ou conduto forçado, de diferentes tamanhos, configuração e comprimento. A água em condutos forçados pode sofrer variação de pressão e velocidade. Esses fatores influenciam a escolha do método de medida da vazão, particularmente onde o método requer comprimentos longos de seção constante. Se o planejamento do ensaio não for realizado com antecedência, é muito difícil, ou talvez impossível obter a precisão requerida com alguns dos métodos citados neste trabalho.

6.2 Recomendações para futuros trabalhos

Este trabalho apresentou a aplicação de uma abordagem metodológica de ensaio de campo em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Deste modo, a continuação natural deste trabalho seria:

- Aprimoramento da abordagem proposta, ou seja, estudos dos procedimentos utilizados em ensaios de campo de centrais hidrelétricas de grande porte;
- Avaliação das divergências decorrentes do porte da central hidrelétrica em estudo e comprovação da abrangência do seu uso;
- Avaliação das principais dificuldades enfrentadas quando da execução do ensaio de campo;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, Resolução nº 394, Brasília, DF, 04/12/1998;

ANEEL, Resolução nº 652, Brasília, DF, 09/12/2003;

ANEEL, Lei nº 9.074, Brasília, DF, BR, 07/07/1995;

ANEEL, Lei nº 9.427, Brasília, DF, BR, 26/12/1996;

ANEEL, Lei nº 10.438, Brasília, DF, BR, 26/04/2002;

ANEEL, Resolução nº 281, Brasília, DF, BR, 01/10/1999;

ANEEL, Resolução nº 219, Brasília, DF, BR, 23/04/2003;

ANEEL, Lei nº 9.648, Brasília, DF, BR, 27/05/1998;

ANEEL, Lei nº 7.990, Brasília, DF, BR, 28/12/1989;

ANEEL, Lei nº 9.991, Brasília, DF, BR, 24/07/2000;

ANEEL, Resolução nº 169, Brasília, DF, BR, 03/05/2001;

ANEEL, Lei nº 10.762, Brasília, DF, BR, 11/11/2003;

ANEEL, Decreto nº 4.541, Brasília, DF, BR, 23/12/2002;

ELETROBRÁS, Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas, Rio de Janeiro, RJ, BR, 1999;

ANEEL, Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas, Brasília, DF, BR, 2003;

Macintyre, J. M., Máquinas Motrizes Hidráulicas, Editora Guanabara Dois S.A, Rio de Janeiro, RJ, BR, 1983;

Bortoni, E.C., Souza,Z; Santos, A. H. M., Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação, ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, RJ, BR, 1999;

Souza, Z., Centrais Hidrelétricas – Dimensionamento de Componentes, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP, BR, 1992;

Souza, Z., PCH - Tecnologia – Meio Ambiente – Conferência de PCH, Mercado&Meio Ambiente, Unifei, Itajubá, MG, BR, 24 de maio de 2005;

Delmée, Gerard J., Manual de Medição de Vazão, Editora Edgard Blücher Ltda, 2º Edição, São Paulo, SP, BR, 1983;

Schreiber, Gerhard P., Usinas Hidrelétricas, Editora Edgard Blücher Ltda, Engevix S.A - Estudos e projetos de engenharia, 1978 – 2º reimpressão, 1981 – São Paulo – SP;

Souza, Zulcy, As bases teóricas do método Winter Kennedy para medida de vazão em máquinas de fluxo, Laboratório Hidromecânico, EFEI, Paper 1, 1979,

Souza, Zulcy, Medição de Vazão-Monografia, GEN-EFEI, Itajubá, MG, BR, 1997;

Muller, Hans Paul, Measurement of the pressure in the spiral casing, Voith Research and Construction, Vol. 19e, Paper 4, 1969;

Gibson, N. R.; “The Gibson Method an Apparatus for Measuring the flow of water in closed conduits” – paper nº 1903 trans of the ASME-45, pp.343-392, 1923.

Bortoni, E. C., Z. Souza, A. H. M. Santos; Modernização do Método de Gibson para Medição de Vazões, IV ELAF-Encontro Latino Americano em Fluidomecânica, Itajubá, 1997;

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, Guia para Expressão da Incerteza da Medição, 3º edição, Rio de Janeiro, BR, 2003;

Martinez, C. B., Aguire, L.A., Filho, J.N., Lopes, J. C. R, Filho, A.A., Abreu, S. R., Avaliação dos Métodos de Medição de Vazão para Levantamento de Diagramas Topográficos de Turbinas Hidráulicas, paper, XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, 2001;

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6445 – Turbinas Hidráulicas, Turbinas-Bombas e Bombas de Acumulação, RJ, BR, 1987;

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10280 – Determinação de Parâmetros Básicos de Turbinas Hidráulicas para PCH, RJ, BR, 1988;

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NB – 228 - Turbinas Hidráulicas – Ensaios de Campo, RJ, BR, 1990;

International Electrotechnical Commission, CEI / IEC 60041- Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, 1991;

American Society of Mechanical Engineers, PTC 18 - Performance Test Codes - Hydraulic Turbines, New York, N.Y., 1992;

Martinez. C. B., Bezerra, G. F., Filho, J. N., Oliveira, A.E., O Método de Winter-Kennedy aplicado a PCH, paper, XVII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, MG, BR, 2003;

Filippin, C. G., Paula, A. C, Medição de Rendimento em Grupos Hidrogeradores, paper, XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, MG, BR, 2003;

Levesque, J. M, Tran, C., The importance of Prototype Efficiency Testing, 16th Symposium of the IAHR, BR, 1992.

Mioduski, A., L., Elementos e Técnicas modernas de medição Analógica e Digital, Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro – RJ, 1982.

ANEXO I

Aplicação do Equacionamento para obtenção das Grandezas

I.1 - Exemplo de Cálculo para um Ponto – Estudo de Caso 1

O exemplo de cálculo apresentado corresponde a um dos testes realizados a 100% da carga do grupo gerador 1 do Estudo de Caso 1. Os valores registrados para este ponto estão apresentados na Tabela a seguir:

Tabela I.1 - Valores registrados para o ponto de 100% da carga do Grupo Gerador 1

Grandeza	Valor	Unidade
T - temperatura ambiente	27	[°C]
g - aceleração da gravidade	9,783	[m/s ²]
ρ - massa específica da água	996,80	[kg/m ³]
ϕ - latitude	15° 02'43''	[°]
Z - altitude	380,0	[m]
L - distância entre os anéis	20,0	[m]
A - área da seção transversal do tubo	8,042	[m ²]
P _{el} - potência elétrica	9.919	[kW]
h ₁ – nível do transdutor de pressão da caixa espiral com relação a referência	264,986	[m]
h ₂ – nível do transdutor de pressão na sucção com relação a referência	265,393	[m]
A ₁ – área de entrada da caixa espiral	3,464	[m ²]
A ₂ – área de saída da caixa espiral	9,365	[m ²]
Q - vazão	25,835	[m ³ /s]
p ₁ - pressão na entrada da caixa espiral	45,592	[m.c.a.]
p ₂ - pressão na saída do tubo de sucção	2,444	[m.c.a.]
ΔT_{TC} - Variação de temperatura no trocador de calor	13,4	[°C]
Q _{OL} - Vazão de óleo do mancal	24	[l/min]

A vazão calculada através do método de Gibson é expressa conforme a equação abaixo:

$$Q = \frac{A}{L} \cdot \int_0^t p \, dt \quad (I.1)$$

Onde:

Δp é a variação da pressão diferencial no diagrama pressão/tempo.

Conforme apresentado na Tabela I.1, o valor de vazão obtido pelo método de Gibson foi de 25,835 [m³/s].

Foi acordado entre as partes, que o erro a ser adotado para a vazão seria de 1 %. Neste caso, não foi necessário o cálculo do erro associado a esta grandeza.

A altura de queda líquida nominal é dada pela equação:

$$H_n = p_1 - p_2 + h_1 - h_2 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (I.2)$$

Para as medições efetuadas, tem-se que:

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{25,835}{3,464} = 7,458 \text{ m/s}$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{25,835}{9,365} = 2,759 \text{ m/s}$$

Substituindo os valores na equação I.2, tem-se que:

$$H_n = 45,192 \text{ [m]}$$

O erro sistemático associado a essa altura será dado por:

$$f_{H_n}^2 = f_{p_1}^2 + f_{p_2}^2 + f_z^2 + 2.f_Q^2 + 4.f_{D_1}^2 + 2.f_{L_1}^2 + 2.f_{L_2}^2 \quad (I.3)$$

Nesta equação para cálculo de erro da altura líquida nominal, tem-se:

$$\begin{aligned} f_{p_1} &= \frac{e_{p_1}}{p_1} = \frac{0,005 \times 45,592}{45,592} = 0,005 & f_{D_1} &= \frac{e_{D_1}}{D_1} = \frac{0,0005}{2,1} = 2,3810 \times 10^{-4} \\ f_{p_2} &= \frac{e_{p_2}}{p_2} = \frac{0,001 \times 2,444}{2,444} = 0,001 & f_{L_1} &= \frac{e_{L_1}}{L_1} = \frac{0,0005}{3,75} = 1,3333 \times 10^{-4} \\ f_z &= \frac{e_z}{Z} = \frac{0,01}{407} = 2,45700 \times 10^{-5} & f_{L_2} &= \frac{e_{L_2}}{L_2} = \frac{0,0005}{2,50} = 2,0000 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Substituindo os valores na equação I.3, tem-se que:

$$f_{Hn}^2 = 2,2634 \times 10^{-4}$$

$$f_{Hn} = \pm 0,01504 \Rightarrow f_{Hn} = \pm 1,504 \%$$

As pressões na entrada da caixa espiral e na saída do tubo de sucção foram medidas diversas vezes, o que permitiu o cálculo do erro estatístico associado. Para esse cálculo, tem-se:

$$f_x = \frac{e_x}{x} \quad (I.4)$$

$$e_x = \pm \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s(x) \quad (I.5)$$

Para a pressão de entrada, temos:

$$n = 1000, s(p_1) = 0,284:$$

O fator de Student (t) é calculado através da equação:

$$t = 1,96 + \frac{2,36}{(1000 - n)} + \frac{3,20}{(1000 - n)^2} + \frac{5,20}{(1000 - n)^{3,84}} \quad (I.6)$$

Substituindo valores na equação I.6:

$$t = 1,96 + \frac{2,36}{(1000 - 1)} + \frac{3,20}{(1000 - 1)^2} + \frac{5,20}{(1000 - 1)^{3,84}} \Rightarrow t = 1,9624$$

$$e_{p1} = \pm \frac{1,9624}{\sqrt{1000}} \cdot 0,284 = 1,762 \times 10^{-2}$$

$$f_{p1} = \frac{1,762 \cdot 10^{-2}}{45,592} \Rightarrow f_{p1} = 3,865 \cdot 10^{-4} \Rightarrow f_{p1} = 0,03865 \%$$

Para a pressão na saída do tubo de sucção, temos:

$$n = 1000, s(p_2) = 0,07, \text{ assim:}$$

$$t = 1,96 + \frac{2,36}{(1000 - 1)} + \frac{3,20}{(1000 - 1)^2} + \frac{5,20}{(1000 - 1)^{3,84}} \Rightarrow t = 1,9624$$

$$e_{p2} = \pm \frac{1,9624}{\sqrt{1000}} \cdot 0,174 = 1,080 \cdot 10^{-2}$$

$$f_{p2} = \frac{1,080 \cdot 10^{-2}}{2,444}$$

$$f_{p2} = 4,419 \cdot 10^{-3} \Rightarrow f_{p2} = 0,4419 \%$$

O erro estatístico total será:

$$f_p = \pm 4,8055 \times 10^{-3} \Rightarrow f_p = \pm 0,4806 \%$$

O erro da altura líquida nominal, incluindo o erro sistemático e o estatístico, é calculado através da relação:

$$f^2 = f_s^2 + f_e^2 \quad (I.7)$$

Assim:

$$f_{H_n}^2 = 2,2634 \times 10^{-4} + 2,3090 \times 10^{-5}$$

$$f_{H_n} = \pm 0,0157 \Rightarrow f_{H_n} = \pm 1,57 \%$$

A potência de eixo é calculada pela relação entre a potência elétrica e o rendimento do gerador, levando-se ainda em conta as perdas no mancal de escora do conjunto, que são supridas pela turbina. Assim:

$$P = \frac{P_{el}}{\eta_G} + P_m \quad (I.8)$$

Onde:

P_e - potência de eixo;

P_{el} - potência elétrica;

η_G - rendimento do gerador;

P_m - perda no mancal de escora.

A potência dissipada no mancal, por sua vez, foi calculada conforme a equação I.9 abaixo:

$$P_m = Q \cdot m_{\text{óleo}} \cdot C_{\text{óleo}} \quad (I.9)$$

Para as condições do ensaio, tem-se:

- massa específica do óleo ($m_{\text{óleo}}$): 870 kg/m^3
- calor específico do óleo – ($C_{\text{óleo}}$): $0,442 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

Substituindo os valores na equação I.9:

$$P_m = \frac{24}{60 \times 1000} \cdot 870 \cdot 0,442 \cdot 13,4 = 2,061 [\text{kcal/s}]$$

Sabe-se que:

$$1 \text{ kcal} = 4186,8 \text{ J}$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s, assim:}$$

$$P_m = 2,0611 \times 4186,6 = 8629,00 \text{ J/s}$$

$$P_m = 8,63 \text{ kW}$$

A potência no eixo da turbina hidráulica fica, portanto, igual a:

$$P_e = 10247 + 8,63 = 10255,63 \text{ kW}$$

O erro sistemático associado a essa última equação é calculado conforme indicado na equação abaixo:

$$f_{\text{eixoS}}^2 = f_{\text{Pel}}^2 + f_{P_m}^2 + f_{TP}^2 + f_{TC}^2 \quad (\text{I.10})$$

Onde:

$$f_{\text{Pel}} = \frac{e_{\text{Pel}}}{100} = \frac{0,2}{100} = 0,002 \quad f_{TC} = \frac{e_{TC}}{100} = \frac{0,6}{100} = 0,006$$

$$f_{TP} = \frac{e_{TP}}{100} = \frac{0,6}{100} = 0,006$$

$$f_{P_m}^2 = f_{\bullet}^2 + f_{Q_{\text{óleo}}}^2$$

$$f_{\bullet} = \frac{e_{\bullet}}{\bullet \bullet} = \frac{0,5}{43,2 - 29,8} = \frac{0,5}{13,4} = 0,03731 \quad f_{Q_{\text{óleo}}} = \frac{e_{Q_{\text{óleo}}}}{Q_{\text{óleo}}} = \frac{0,5}{8} = 0,06250$$

$$f_{P_m}^2 = 0,03731 + 0,06250 \Rightarrow f_{P_m} = \pm 0,07279$$

$$e_{P_m} = f_{P_m} \cdot P_m = 0,07279 \cdot 8629 \times 10^{-6} = 6,2810 \cdot 10^{-4}$$

$$f_{P_m} = \frac{e_{P_m}}{P_e} = \frac{6,2810 \cdot 10^{-4}}{10,255} = 6,125 \cdot 10^{-5}$$

Substituindo os valores encontrados, tem-se que:

$$f_{\text{Pes}} = \pm 0,00872$$

Para determinação da potência elétrica foram realizadas 10 medidas para cada ponto. Desta forma, o erro estatístico associado pode ser calculado, conforme mostrado a seguir:

$n = 10$; $s(P_{el}) = 0,01420$, assim:

$$t = 1,96 + \frac{2,36}{(10-1)} + \frac{3,20}{(10-1)^2} + \frac{5,20}{(10-1)^{3,84}} \Rightarrow t = 2,2628$$

$$e_{\text{Peixo}_e} = \pm \frac{2,2628}{\sqrt{10}} \times 0,01420 = 0,01016$$

$$f_{\text{Peixo}_e} = \frac{0,01016}{9,9187} = 1,0244 \times 10^{-3}$$

O erro total da potência mecânica será:

$$f_{\text{Peixo}}^2 = f_{\text{Peixo}_s}^2 + f_{\text{Peixo}_e}^2 \quad (\text{I.11})$$

$$f_{\text{Peixo}}^2 = 7,7088 \times 10^{-5} \Rightarrow f_{\text{Peixo}} = \pm 8,778 \times 10^{-3} \Rightarrow f_{\text{Peixo}} = \pm 0,8778\%$$

O rendimento da turbina é calculado através da equação:

$$\bullet_t = \frac{P_e}{P_h} \quad (\text{I.12})$$

Onde:

η_t - rendimento da turbina em [%]

P_e - potência mecânica em [kW]

P_h - potência hidráulica em [kW]

A potência hidráulica, por sua vez, é calculada através da seguinte relação:

$$P_h = \bullet \times g \times H \times Q \quad (\text{I.13})$$

Substituindo os valores do ensaio na equação I.13, tem-se:

$$P_h = 996,8 \times 9,783 \times 45,195 \times 25,835 \Rightarrow P_h = 11.387 \text{ [kW]}$$

O rendimento da turbina, portanto, fica:

$$\bullet_t = \frac{P_e}{P_h} = \frac{10,255}{11,387} = 0,9006$$

$$\bullet_t = 90,06 \%$$

O erro sistemático do rendimento pode então ser calculado a partir das incertezas de cada componente, conforme a equação a seguir.

$$f_{\bullet}^2 = f_{\text{Peixo}}^2 + f_Q^2 + f_H^2 \quad (\text{I.14})$$

$$f_{\bullet}^2 = (8,778 \times 10^{-3})^2 + (0,01)^2 + (0,0157)^2$$

$$f_{\bullet} = \pm 0,02057 \Rightarrow f_{\bullet} = \pm 2,057\%$$

Como o valor do rendimento obtido para a turbina, para esse ponto de ensaio, foi de 90,06 % e sendo o erro total igual a 2,057 %, o resultado final para o rendimento fica:

$$h = 90,06\% \pm 2,06\%$$

ANEXO II

Equipamentos utilizados nos ensaios de campo

II.1 Estudo de Caso 1 - Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados nos ensaios de campo do Estudo de Caso 1 encontram-se listados a seguir:

- **Wattímetro Digital Trifásico**, fabricante Voltech Instruments Ltda, modelo PM300, com exatidão de 0,2% e faixa de indicação de 0 a 1,999 GW;
- **Placa de Aquisição de Dados**, fabricante Quatech, modelo DAQP, com resolução de 12 Bits e taxa de amostragem de 100 kHz;
- **Transdutor de Pressão Diferencial**, fabricante Smar, modelo LD301D-231-TU11-011/A1/I1, exatidão de 0,15% e faixa de indicação de 0 a 5 mca;
- **Microcomputador**, fabricante Compaq;
- **Transdutor de Pressão**, fabricante Druck, modelo PTX7217-2-A, exatidão de 0,1% e faixa de indicação de 0 a 100 mca;
- **Transdutor de Pressão**, fabricante Druck, modelo PTX7217-2-A, exatidão de 0,1% e faixa de indicação de 0 a 10 mca;
- **Transdutor de Pressão**, fabricante Zurich, modelo PSI 420, exatidão de 0,5% e faixa de indicação de 0 a 50 mca;
- **Transdutor de Pressão**, fabricante Zurich, modelo PSI 420, exatidão de 0,5% e faixa de indicação de 0 a 50 mca;
- **Termo-higrômetro**, fabricante Fischer, precisão de 0,5 °C (temperatura) / 0,5 % (umidade relativa) e faixa de indicação de -30 a +50 °C (temperatura) / 0 a 100 % (umidade relativa);
- **Barômetro**, fabricante Fischer, com precisão de 0,5 mmHg e faixa de indicação de 680 a 800 mmHg.

II.2 Estudo de Caso 2 - Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados nos ensaios encontravam-se devidamente calibrados, estando listados a seguir:

- **Transdutor de pressão diferencial**, fabricante FOXBORO para medição da diferença de pressão na caixa espiral;
- **Transdutor de pressão diferencial**, fabricante ROSEMOUNT 3051, para medir a carga na entrada da turbina;
- **Medidor de nível** instalado a jusante;
- **Medidor de nível** instalado a montante;
- **Medidor de vazão ultrassônico**, fabricante Parametric, modelo PT 868, precisão 2% ;
- **Computador portátil**;
- **Rádio de comunicação**;
- **Monitoramento da medição da potência mediante software SIMEAS**;
- **Sistema de Aquisição de Dados**
- **Fontes padrões** de mA, mV, V, etc;

ANEXO III

Expressão da Incerteza de Medição

III.1 Definições e Conceitos

Quando se quer conhecer um fenômeno, precisa-se de meios para descreve-lo em termos de avaliação, o que impõe a determinação dos valores de grandezas envolvidas e dos resultados expressos em números. Porém, esses números só têm significado quando comparados com uma referência, ou seja, com um padrão determinando o erro da medida. A seguir serão apresentados conceitos envolvidos neste procedimento, como, por exemplo, grandeza, unidade, dimensão, dentre outros; retirados do “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição” publicado pelo INMETRO em 2003.

Grandeza mensurável - é um atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser distinguida qualitativa e quantitativamente, como por exemplo, a vazão, a pressão e a temperatura;

Grandeza de influência - é um atributo de um outro fenômeno, corpo ou substância cujas características alteram o estado físico e/ou químico de uma grandeza mensurável, como por exemplo, o fluxo de calor em um trocador de calor aumenta a temperatura do fluido de trabalho; neste caso, a temperatura é a grandeza mensurável e o fluxo de calor é a grandeza de influência;

Unidades - são intervalos de grandezas que devem ser estáveis, invariáveis e reproduzíveis.

Efeitos Aleatórios - conjunto de fenômenos naturais ou artificiais que atuam sobre as características físicas e/ou químicas das grandezas mensuráveis. Normalmente estão associados às grandezas de influência, como por exemplo, movimento do elétron nos níveis de energia de um átomo;

Valor medido - é uma medida ou leitura de uma grandeza física determinada através de instrumentos ou medidores específicos àquela grandeza, como por exemplo, temperatura na superfície de um trocador de calor pelo termopar;

Valor Padrão - conceito experimental de uma grandeza mensurável cujas características podem ser estáveis no decorrer do tempo. Normalmente suas características são determinadas em locais de ambientes controlados seguindo normas específicas de metrologia conforme o "Guia para Expressão da Incerteza de Medição" e instrumentos adequados, como por exemplo, blocos-padrão, massas-padrão;

Valor Referenciado - conceito idealizado de uma grandeza cujas características, podem ser estáveis no decorrer do tempo e podem ser diferentes das características padrão. Normalmente suas características são determinadas em locais cujos ambientes são diferentes daqueles exigidos pelas normas de metrologia quanto ao controle de ambiente, como exemplo, tem-se que a dilatação térmica nos sólidos no decorrer do tempo pode alterar a medida do comprimento de uma viga; a decomposição radioativa do urânio altera sua massa;

Obs: o valor referenciado não é igual ao valor padrão em decorrência de serem determinados em ambientes de condições diferentes quanto à umidade, temperatura, pressão barométrica, limpeza, instrumentação;

Calibração - é um processo orientado segundo as normas de metrologia para equiparar a grandeza de leitura do instrumento de medida com relação a grandeza mensurável da medida, obtido pelo uso de um valor padrão (P. Ex : massa-padrão usada para calibrar uma balança);

Dispersão - diferença entre uma medida / leitura e um valor referenciado;

Exatidão - conceito idealizado de uma grandeza mensurável que pode apresentar baixa dispersão de valores medidos em relação a um valor referenciado, que não é o valor padrão da grandeza;

Precisão - conceito idealizado de uma grandeza mensurável que pode apresentar baixa dispersão de valores medidos em relação a um valor padrão da grandeza;

É necessário salientar que as observações sucessivas podem mostrar a precisão das medidas efetuadas, porém, a exatidão delas só pode ser provada quando comparadas com o padrão. Logo, a precisão é uma condição necessária da exatidão, mas não uma condição suficiente.

Obs: A diferença básica entre exatidão e precisão pode ser observada na Figura III.1, obtida após um treino de tiro ao alvo:

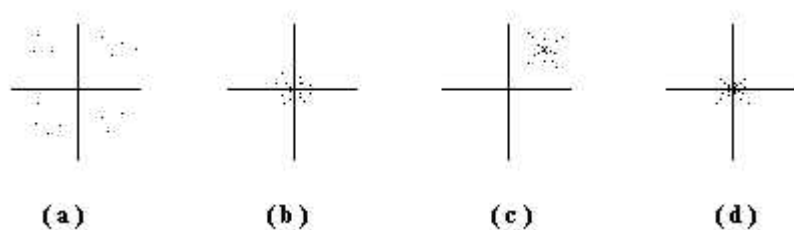


Figura III.1 - Diferenciação entre exatidão e precisão

Em (a) ocorreu alta dispersão dos tiros caracterizada pelo afastamento dos mesmos em relação ao alvo. Em (b) ocorreu uma baixa dispersão dos tiros caracterizada

pela aproximação dos mesmos em relação ao alvo. Neste caso, diz-se que há uma boa exatidão dos tiros. Em (c) há uma baixa dispersão, porém com afastamento em relação ao alvo. Neste caso, diz-se que ocorreu pouca precisão, mas boa exatidão, em decorrência da concentração dos tiros em torno de um ponto. Em (d) ocorreu uma baixa dispersão e concentração dos pontos em torno do alvo. Neste caso, diz-se que há boa precisão e boa exatidão.

Medida (x_i) - é um valor obtido correspondente a uma determinada característica da grandeza mensurável num determinado local de condições controladas seguindo as normas do "Guia para Expressão da Incerteza de Medição" e instrumentos adequados.

Obs: Pode ser realizada de dois modos: **Direto** e **Indireto**. O modo Direto é caracterizado pela correspondência direta entre a grandeza mensurável a medir e a grandeza referenciada do instrumento de medida (por exemplo: escala milimétrica de uma régua para leitura do comprimento de uma viga). O modo Indireto é caracterizado pela correspondência indireta entre a grandeza mensurável a medir e a grandeza referenciada no instrumento de medida, sendo obtida somente por intermédio de outras grandezas, desde que seja conhecido o tipo de função matemática que as relacione (por exemplo, a vazão em um canal em função da velocidade de escoamento e da área da seção do canal é calculada pela função $Q = v \cdot A$). No modo direto, tem-se grandezas do tipo **independente**, enquanto nas medidas indiretas, tem-se grandezas do tipo **dependente**.

Média ou **Esperança de uma Serie de Medidas** ($\bar{x}$) - é o valor obtido da soma das medidas / leituras realizadas em uma grandeza mensurável dividido pelo número n de medidas / leituras. É calculado por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{III.1})$$

Desvio Padrão Experimental para Medidas Diretas (S) ou **Dispersão (DM)**- é a dispersão de uma serie de medidas para um evento (em espaço - tempo diferentes ou condições ambientais diferentes daquelas definidas pelas normas do "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição"). Pode ser calculada por:

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{III.2})$$

Desvio Padrão da Média para Medidas Diretas - é a dispersão de uma série de medidas para mais de um evento (por exemplo, a medida do diâmetro de um cilindro metálico colocado ao Sol exposto aos efeitos da dilatação térmica ao longo do tempo, apresentará diferentes valores de diâmetro ao longo do dia, tomando-se um serie de medidas para cada um dos três eventos: manhã, meio-dia, tarde). Pode ser calculado por:

$$u = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{III.3})$$

Segundo o "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição", o **desvio padrão experimental da média para medidas indiretas** ou **desvio padrão combinado das variáveis dependentes** ($v_k = x_i$; x_j), caracterizadas por grandezas estatisticamente dependentes relacionadas por funções f não lineares, em decorrência da **Lei de Propagação das Incertezas**, deve ser calculado por:

$$U_c = S_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot S(x_i)^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot \text{corr}(x_i, x_j)} \quad (\text{III.4})$$

Onde N é o número de grandezas dependentes e $\text{Corr}(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação estimado, calculado por:

$$\text{Corr}(x_i, x_j) = \frac{S(x_i, x_j)}{S(x_i) \cdot S(x_j)} \quad (\text{III.5})$$

Onde $S(x_i, x_j)$ é calculado por:

$$S(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}) \cdot (y_k - \bar{y}) \quad (\text{III.6})$$

No caso das grandezas estatisticamente independentes, relacionadas por funções lineares ou não lineares, não são correlacionadas ($\text{Corr}(x_i, x_j) = 0$), neste caso, o **desvio padrão experimental para medidas indiretas para grandezas independentes** deve ser calculado por:

$$S_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot S(x_i)^2} \quad (\text{III.7})$$

Valor Verdadeiro - representa o valor mais provável de uma grandeza, realizados um ou mais eventos;

O valor verdadeiro apresenta duas naturezas que dependem do tipo e do número de medidas. Quando realiza-se somente uma leitura ou medida de uma grandeza mensurável, conhecido o valor padrão da grandeza, tem-se o chamado **valor**

verdadeiro convencional (VVC). Caso não exista o valor padrão é muito difícil determinar o valor verdadeiro convencional. Quando realiza-se uma série de medidas ou leituras com um número finito de eventos, pode-se estimar estatisticamente o **valor verdadeiro experimental (VVE).**

Segundo o "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição", na realização de ensaios em laboratório, o valor verdadeiro convencional equivale ao valor obtido pela grandeza mensurável durante a calibração. Por exemplo, na medida da vazão em uma tubulação hidráulica qualquer, utiliza-se um instrumento adequado como um medidor eletromagnético ou medidor ultra-sônico, devidamente calibrados em laboratório, conhecidas às condições ambientes de umidade, temperatura e pressão barométrica. Tais condições são exigidas por normas de metrologia. Com a calibração, relaciona-se a grandeza mensurável indiretamente medida vazão Q e o sinal emitido pelos instrumentos eletrônicos, seja na forma de tensão elétrica, seja na forma de corrente elétrica, cujos valores são os valores padrão de tensão ou corrente que devem ser usados como VVC de tensão ou corrente na curva de calibração do instrumento dada na forma vazão versus tensão ou vazão versus corrente.

Erro (E) - Conceito idealizado (abstrato) e não pode ser conhecido com exatidão, utilizado para dar uma noção de quanto é a diferença no valor de uma grandeza mensurável obtida após uma leitura em relação a grandeza referenciada ou grandeza padrão. Da metrologia, o erro equivale a diferença entre um valor mensurável e um valor referenciado, podendo ser também a soma de todos os erros existentes, ou seja, erro de repetibilidade, erro de histerese, erro do instrumento, entre outros. Pode ser calculada por:

$$E = E_s + E_a + E_g \quad (\text{III.8})$$

Erro Aleatório (Ea) - um valor imprevisível que abrange grandezas de influência que alteram os valores medidos de uma grandeza mensurável em relação a um valor referenciado.

Erro Sistemático (Es) - um valor imprevisível, porém controlável estatisticamente, estimado por uma série de medidas, que abrange também grandezas de influência que alteram os valores medidos de uma grandeza mensurável em relação a um valor referenciado.

Os erros sistemáticos podem estar associados a uma grande variedade de erros, tais como: erros de histerese, erros de repetibilidade, erros grosseiros cometidos pelo executor das medidas por falta de experiência, erros do instrumento de medida que não

foi calibrado, erros devido ao efeito térmico, erros devido ao efeito elétrico, erros devido ao efeito eletromagnético, entre outros.

Quando são considerados um número infinito de medidas, o erro sistemático pode ser minimizado. Porém, na prática, existe uma série de medidas finitas, induzindo a um valor determinável apenas estatisticamente. Dependendo do tipo de medida (direta ou indireta), tem-se diferentes ferramentas estatísticas para a sua determinação. Outra razão que pode alterar o ferramental estatístico para a determinação do erro sistemático é a natureza da grandeza em estudo quanto a suas características físicas / químicas serem variáveis ou não com relação ao tempo ou ao espaço.

Segundo o "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição", o **erro sistemático para medidas indiretas de variáveis dependentes** ($v_k = x_i ; x_j$), caracterizadas por grandezas estatisticamente dependentes relacionadas por funções f não lineares, em decorrência da **Lei de Propagação das Incertezas**, deve ser calculado por :

$$E_{sc} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot E_{s(x_i)}^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot \text{corr}(x_i, x_j)} \quad (\text{III.9})$$

Onde N é o número de grandezas dependentes e $\text{Corr}(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação estimado, calculado por:

$$\text{Corr}(x_i, x_j) = \frac{S(x_i, x_j)}{S(x_i) \cdot S(x_j)} \quad (\text{III.10})$$

Onde $E_{sc}(x_i, x_j)$ é calculado por :

$$S(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}) \cdot (y_k - \bar{y}) \quad (\text{III.11})$$

No caso das grandezas estatisticamente independentes, relacionadas por funções lineares ou não lineares, não são correlacionadas ($\text{Corr}(x_i, x_j) = 0$), neste caso, o **erro sistemático para medidas indiretas para grandezas independentes** deve ser calculado por :

$$E_{sc} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot E_{s(x_i)}^2} \quad (\text{III.12})$$

Erro Grosseiro (Eg) - um valor imprevisível, porém, também controlável, associado ao correto manejo dos instrumentos de medida, a escolha adequada dos instrumentos de medida, experiência do operador, entre outros, conhecidas as condições ambientes quanto a umidade, temperatura, pressão barométrica, limpeza, entre outros, devidamente controlados pelas normas de metrologia.

Fator de Correção - é um fator numérico pelo qual o resultado não corrigido de uma medição é multiplicado para compensar um erro sistemático. É útil não somente para minimizar os efeitos do erro sistemático, mas para estabelecer um intervalo de confiança às medidas de um mensurado. Porém, a compensação só pode ser realizada se o erro sistemático for conhecido perfeitamente.

Número de Graus de Liberdade (F) - representa, em geral, um número de medidas em uma soma menos o número de restrições às medidas da soma. Para o caso simples das **medidas diretas** para uma série de n medidas x_i de média aritmética $\bar{x}$ e desvio padrão experimental da média $S(x_i)$, o grau de liberdade é calculado por:

$$\Phi(x_i) = n - 1 \quad (\text{III.13})$$

Para o caso das **medidas indiretas**, realizadas n medidas em N variáveis dependentes (relacionadas por uma função matemática linear ou não), o grau de liberdade Φ_{eff} é calculado pela fórmula de Welch - Satterthwaite:

$$\Phi_{\text{eff}} = \frac{Sc^4}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{S(v_k)}{\Phi(v_k)} \right)^4} \quad (\text{III.14})$$

Para a condição:

$$\Phi_{\text{eff}} \leq \sum_{k=1}^N \Phi(v_k) \quad (\text{III.15})$$

Onde Sc é o desvio padrão experimental para medidas indiretas ou o desvio combinado das variáveis dependentes v_k , $S(v_k)$ é o desvio padrão experimental para medidas diretas das variáveis v_k dependentes, $\Phi(v_k)$ é o grau de liberdade para medidas diretas das variáveis v_k dependentes.

Incerteza (I) - reflete a falta de conhecimento exato do mensurado, contabilizado após correção dos efeitos sistemáticos conhecidos.

A incerteza depende do tipo e do número das medidas, bem como da natureza da grandeza, ou independente, ou dependente. Quando a incerteza é estimada por métodos estatísticos para uma série finita de medidas das grandezas em estudo, conforme uma distribuição de probabilidade conhecida, representando uma faixa de dispersão em torno de um valor central equivalente a um desvio padrão experimental multiplicado por um **fator de Abrangência**, define-se a **Incerteza Padronizada do Tipo A**. No caso que avalia-se a incerteza por métodos não estatísticos, define-se a **Incerteza Padronizada do Tipo B**.

O **Fator de Abrangência (kp)** é um **fator de correção** utilizado somente nos casos em que existe uma série finita de medidas, cujo valor varia entre 2 e 3, em função do **intervalo de confiança** cuja probabilidade p de confiança assume uma distribuição normal aos valores das medidas / leituras por evento em relação ao valor referenciado, como é mostrado na Tabela III.1, tomando-se um valor mínimo maior do que 10 leituras para obter uma probabilidade de confiança maior. É importante observar o caso no qual o número de leituras é grande (por exemplo, 100 ou 200 leituras por evento). O valor do fator de abrangência tende a equivaler ao coeficiente de Student para mais de 100 leituras. Para um número menor do que 100 leituras, a incerteza devido ao coeficiente de Student tende a ser maior do que a incerteza devido ao fator de abrangência.

Outro **fator de correção** utilizado é o **coeficiente de Student (tp)**, dado em função do **grau de liberdade (F)** de uma série de medidas finitas, para um intervalo cuja probabilidade p de confiança assume uma distribuição de Student aos valores das medidas / leituras, como é mostrado na Tabela III.3, para a curva de Student para três probabilidades de confiança diferentes e **número de graus de liberdade (F)** diferentes;

Pode-se estabelecer uma faixa de dispersão em torno de um valor central equivalente ao **desvio padrão experimental (S)** ou **incerteza padrão experimental** multiplicado por um **fator de correção** adequado, segundo o tipo de distribuição de probabilidade (distribuição Normal; distribuição t de Student), definindo a **Incerteza Expandida (IM)**, calculada por:

$$IM = k_p \cdot S(x_i) \quad \text{para Distribuição Normal} \quad (III.16)$$

$$IM = t_p(\Phi) \cdot u \quad \text{para Distribuição t de Student} \quad (III.17)$$

O **Intervalo de Confiança (X - IM ≤ x ≤ X + IM)** é uma representação matemática dos valores mais prováveis para a validação de uma série de medidas em relação a um valor referenciado da grandeza mensurável. É usado principalmente para expressar o **resultado de uma medição (RM)**, onde X é o valor mais provável da medida, função do tipo de medida (Direta ou Indireta) e da natureza da grandeza mensurável (variável ou invariável no espaço - tempo), como é mostrado na Tabela III.2. No caso das medidas indiretas, o resultado da medição é representado pelas mesmas fórmulas apresentadas na Tabela III.2.

Tabela III.1 - Valor do Fator de Abrangência (k_p) que produz um intervalo de confiança $\pm k_p.S(x_i)$ tendo uma probabilidade de confiança p , assumido uma distribuição normal para as medidas x_i .

PROBABILIDADE DE CONFIANÇA P (%)	FATOR DE ABRANGÊNCIA K _P
90	1,645
95	1,96
95,45	2,000
99	2,576

Tabela III.2 - Expressão do Resultado de Medição quanto a Natureza da Grandeza e o Número de Medidas

CASO	INFORMAÇÃO DISPONÍVEL SOBRE O SISTEMA DE MEDIÇÃO	MODOS DE EXECUTAR A MEDIÇÃO	
		FAZENDO UMA MEDIDA	FAZENDO n MEDIDAS
GM É INVARIÁVEL	I	$RM = M \pm I$	$RM = MM \pm I$
	CE	$RM = (M - Es) \pm DM$	$RM = (MM - Es) \pm DM / \sqrt{n}$
GM É VARIÁVEL	I	Não aplicável	$RM = MM \pm (\Delta M_{\text{máx}} + I)$
	CE	Não aplicável	$RM = (MM - Es) \pm \Delta M_{\text{máx}} $

Onde: RM - resultado da medição

M - medida

MM - média

I - incerteza da medição

GM - grandeza medida

Es - erro aleatório

DM - dispersão da medição

CE - curva de erros ou curva de calibração

$\Delta M_{\text{máx}}$ - variação máxima entre as

Medidas dado por $\Delta M = M - MM$

Tabela III.3 - Fator de Student (t_p) a partir da distribuição t de Student para graus de liberdade Φ que define um intervalo $\pm t_p (\Phi)$. u que abrange uma probabilidade de confiança p da distribuição das medidas x_i .

Grau de Liberdade F	PROBABILIDADE DE CONFIANÇA		
	P = 95 %	P = 95,45 %	P = 99 %
1	12,71	13,97	63,66
2	4,30	4,53	9,92
3	3,18	3,31	5,84
4	2,78	2,87	4,60
5	2,57	2,65	4,03
6	2,45	2,52	3,71
7	2,39	2,43	3,50
8	2,31	2,37	3,36
9	2,26	2,32	3,25
10	2,23	2,28	3,17
11	2,20	2,25	3,11
12	2,18	2,23	3,05
13	2,16	2,21	3,01
14	2,14	2,20	2,98
15	2,13	2,18	2,95
16	2,12	2,17	2,92
17	2,11	2,16	2,90
18	2,10	2,15	2,88
19	2,09	2,14	2,86
20	2,09	2,13	2,85
25	2,06	2,11	2,79
30	2,04	2,09	2,75
35	2,03	2,07	2,72
40	2,02	2,06	2,70
45	2,01	2,06	2,69
50	2,01	2,05	2,68
100	1,98	2,025	2,626
∞	1,96	2,000	2,576