

RAFAEL LOPES

COMISSIONAMENTO DE TURBINAS HIDRÁULICAS: ENSAIOS DE
FAIXA OPERATIVA, ÍNDEX TEST E REJEIÇÃO DE CARGA

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

Orientador: Prof. Dr. Guilherme E. F. F. Filho

Guaratinguetá
2011

COMISSIONAMENTO DE TURBINAS HIDRÁULICAS: ENSAIOS DE FAIXA
OPERATIVA, ÍNDEX TEST E REJEIÇÃO DE CARGA

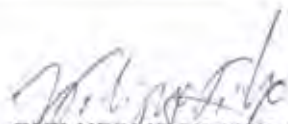
RAFAEL LOPES

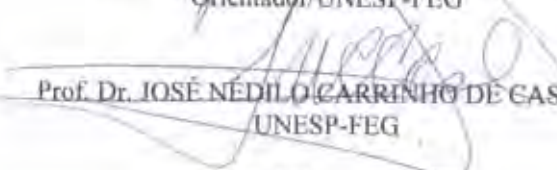
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA


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

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. GUILHERME FILIPPO FILHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ NÉDILIO CARRINHO DE CASTRO
UNESP-FEG


Prof. Dr. DURVAL RICCIULLI
UNESP-FEG

dezembro de 2011

L864c Lopes, Rafael
Comissionamento de turbinas hidráulicas: ensaios de faixa operativa, índice, teste e rejeição de carga / Rafael Lopes . - Guaratinguetá: [s.n.], 2011
50 f.: il.
Bibliografia: f. 49-50

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011
Orientador: Prof. Dr. Guilherme E. F. F. Filho

1. Turbinas hidráulicas I. Título

CDU 62-135

DADOS CURRICULARES

RAFAEL LOPES

NASCIMENTO	22.05.1987 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	João Alves Lopes Maria José Rosa Lopes
2006/2011	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, razão de tudo. Agradeço pelos bens mais valiosos, minha vida, minha família e meus amigos; aos meus pais *João Alves* e *Maria José* por terem me proporcionado toda a base familiar e educacional para que eu chegasse até aqui;

ao meu orientador *Prof. Dr. Guilherme E. F. F. Filho*, que jamais deixou de me incentivar. Sem seu conhecimento, auxílio e orientação, não seria possível a realização deste trabalho;

aos professores da graduação e demais funcionários da FEG/UNESP, pela qualidade e nível de conhecimento transmitidos em todas as etapas deste curso;

à empresa utilizada para o estudo de caso, em particular à equipe de profissionais de Comissionamento, entre tantas outras pessoas deste competente grupo, que disponibilizou as informações e, principalmente, pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes ao estudo;

à todas os meus amigos de república Mau-Mau, especialmente a Senhora Madalena, as quais agradeço pela amizade e companheirismo durante estes anos de faculdade;

a minha namorada *Thaís Oliveira* por todo amor e carinho, por me incentivar e acreditar no meu potencial, por estar sempre presente e, principalmente, pela paciência durante a realização deste trabalho;

à todos aqueles que não foram mencionados neste texto, mas que direta ou indiretamente colaboraram na a realização deste trabalho e na minha vida.

“Com a força da sua mente, seu instinto e, também
com sua experiência você pode voar alto”

Ayrton Senna

LOPES, R., Comissionamento de Turbinas Hidráulicas : Ensaio de Faixa Operativa, Rejeição de Carga e Índice Test. 2011. 68 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Com a crescente demanda de energia elétrica, a importância da geração por meio de hidrelétricas, uma fonte renovável de energia, torna-se de grande importância.

Essa demanda decorre do crescimento do país, bem como dos eventos que irão ocorrer nos próximos anos.

O comissionamento tem um papel fundamental antes da entrada em operação de uma usina hidrelétrica, visto que, garante um bom funcionamento dos sistemas hidráulicos e elétricos, bem como a segurança da instalação.

Este trabalho faz um estudo de caso, o comissionamento em uma PCH, em destaque para os ensaios mais importantes, como o ensaio de faixa operativa, rejeição de carga e índice test.

Nestes ensaios podemos, ter uma idéia do real comportamento da unidade, bem como as futuras manobras operacionais, e a comprovação do real rendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Comissionamento, Turbinas Hidráulicas, Ensaios.

LOPES, R., **Commissioning of hydraulic turbines: range operation, index test and load rejection**, 2011. 46 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

With growing electricity demand, the importance of generation through hydropower, a renewable energy source, it's of great importance.

This demand derives from the country's growth, as well as events that will occur in the coming years.

The commission has a crucial role before the entry into operation of hydroelectric plant, since, ensures a good operation of hydraulic and electrical systems, as well as the safety of the installation.

This paper is a case study, commissioning in a PCH in especially the most important tests, such as range operation, index tes and load rejection.

In these trials we can get a Idea of the actual behavior of the unit, as well as future operation maneuvers, and evidence of real efficiency.

KEYWORDS: Commission, hydraulic turbines, test

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Esquema de uma Usina Hidrelétrica	04
FIGURA 2 – Esquema de uma barragem tipo arco.....	05
FIGURA 3 – Comporta tipo vagão	07
FIGURA 4 – Comporta tipo lagarta	08
FIGURA 5 – Comporta tipo segmento.....	09
FIGURA 6 – Válvula borboleta	10
FIGURA 7 – Válvula esférica	11
FIGURA 8 – Campo de aplicação da válvula esférica	12
FIGURA 9 – Campo de aplicação das turbinas.....	14
FIGURA 10 – Turbina Pelton e injetores	16
FIGURA 11 – Componentes e turbina Francis	17
FIGURA 12 – Turbina Kaplan em corte. Indicação dos principais componentes	18
FIGURA 13 – Turbina Kaplan S. Indicações dos principais componentes	19
FIGURA 14 – Turbina bulbo	20
FIGURA 15 – Exemplo de curva de colina	21
FIGURA 16 – Rendimentos de alguns tipos de turbinas com variações de vazões	22
FIGURA 17 – Mancal escora	23
FIGURA 18 – Sistema de regulador de velocidade hidráulico	24
FIGURA 19 – Regulador de velocidade de compensação primário	25
FIGURA 20 – Regulador de velocidade de compensação dupla	26
FIGURA 21 – Resposta à rejeição de carga.....	30
FIGURA 22 – Teste de estabilidade.....	31
FIGURA 23 – Teste de estabilidade do regulador	32
FIGURA 24 – Classificação ISSO 7919-5.....	35
FIGURA 25– Rejeição de carga a 25%	38
FIGURA 26 – Rejeição de carga a 50%	38
FIGURA 27 – Rejeição de carga a 75%.....	39
FIGURA 28 – Rejeição de carga a 100%	39
FIGURA 29 – Oscilação do eixo.....	40
FIGURA 30 – Vibrações dos mancais	41
FIGURA 31 – Máquina em vazio excitada	42
FIGURA 32 – Vibrações dos mancais com a máquina em vazio e excitada	42

FIGURA 33 – Oscilação do eixo em vazio e excitada	43
FIGURA 34 – Máquina sincronizada	43
FIGURA 35 – Vibrações dos mancais com sincronismo	44
FIGURA 36 – Oscilação do eixo com sincronismo	44
FIGURA 37 – Máquina sincronizada com 4MW	45
FIGURA 38 – Vibrações dos mancais com 4MW	45
FIGURA 39 – Oscilação do eixo com 4MW	46
FIGURA 40 – Máquina sincronizada com 9,5MW	46
FIGURA 41 – Vibrações dos mancais com 9,5MW	47
FIGURA 42 – Oscilação do eixo com 9,5MW	47
FIGURA 43 – Gráfico do rendimento do gerador.....	48
FIGURA 44 – Perda de carga no conduto.....	49
FIGURA 45 – Gráfico de Calibração Winter-Kennedy	49
FIGURA 46 – Gráfico de Rendimento da turbina.....	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Matriz Elétrica Brasileira	03
TABELA 2 – Tabela de classificação norma ISO 10816-5	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCH	-	Pequena Central Hidrelétrica
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
UHE	-	Usina Hidrelétrica
IEEE	-	Institute of Electrical Electronic Engineers
ISO	-	International Organization for Standardization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.2.	Justificativa.....	1
1.3.	Metodologia	1
1.4.	Estrutura do trabalho	2
2	VISÃO GERAL.....	3
2.1.	O sistema elétrico brasileiro	3
2.2.	Componentes de uma usina hidrelétrica.....	3
2.3.	Barragem	4
2.3.1.	Barragem tipo arco.....	4
2.3.2.	Barragem tipo gravidade.....	5
2.3.3.	Barragem tipo arco-gravidade	5
2.4.	Sistema de tomada d'água.....	5
2.5.	Vertedouro.....	6
2.6.	Comportas	6
2.6.1.	Comporta tipo vagão.....	6
2.6.2.	Comporta tipo lagarta	7
2.6.3.	Comporta tipo ensecadeira.....	8
2.7.	Válvulas.....	8
2.7.1.	Válvula borboleta.....	9
2.7.2.	Válvula esférica	10
2.8.	Grades.....	11
2.9.	Chaminé de equilíbrio	11
2.10.	Casa de força	12
2.11.	Turbinas hidráulicas	12
2.11.1.	Turbinas de ação	13
2.11.2.	Turbina de reação.....	15
2.11.3.	Curvas de colina.....	18
2.12.	Geradores	19
2.13.	Mancal guia	19
2.14.	Mancal escora.....	20
2.15.	Regulador de velocidade	20
2.15.1.	Regulador de compensação primário.....	21
2.15.2.	Regulador com dupla compensação	22
3	ESCOPO DO ESTUDO	24
3.1.	Comissionamento	24
3.2.	Ensaio a seco	24
3.2.1.	Run-Out	25
3.3.	Ensaio em água morta.....	25
3.4.	Ensaio Dinâmicos	25
3.4.1.	Sincronismo	25
3.4.2.	Ensaio de rejeição de carga.....	25
3.4.3.	Faixa operativa.....	26
3.4.4.	Teste de estabilidade	27
3.4.5.	Teste de estabilidade do regulador de velocidade.....	27
3.4.6.	Método de pressão diferencial (Winter-Kennedy).....	28
3.4.7.	Index test.....	29
3.5.	Oscilação de eixo	31
3.6.	Vibrações dos mancais	32

4 RESULTADOS	34
4.1. Rejeição de carga	34
4.2. Faixa Operativa	37
4.3. Index Test.....	45
5 CONCLUSÃO.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo

A realização deste trabalho teve como objetivo demonstrar em um estudo de caso como são feitos os principais ensaios de comissionamento em uma usina hidrelétrica e a sua utilidade para o posterior funcionamento comercial da mesma.

1.2. Justificativa

Com a necessidade muito grande de energia para as próximas décadas tanto os investidores privados quanto o próprio governo vêm investindo em pequenas e grandes centrais hidrelétricas. Essas tendências vêm dos eventos que irão ocorrer no país nos próximos cinco anos. Nesse aspecto é necessário garantir que as usinas hidrelétricas tenham o desempenho e operabilidade ideal, isto é, assegurar que os ensaios de comissionamento sejam realizados de acordo com as normas estabelecidas. Os resultados destes ensaios também são importantes para analisar as possíveis melhorias na operação e para futuros projetos.

1.3. Metodologia

O trabalho foi desenvolvido em parceria com uma empresa multinacional do segmento de infra-estrutura em geração de energia. A metodologia consiste primeiramente em conhecer as normas que regem os ensaios de comissionamento e acompanhar os engenheiros responsáveis pelos ensaios durante a preparação, realização e análise dos resultados encontrados.

O trabalho foi realizado em quatro etapas:

- Identificação da usina na qual ocorreriam os principais ensaios de comissionamento. Nesta etapa foi decidido que seria uma PCH;
- Conhecimento dos instrumentos utilizados para a medição dos parâmetros que seriam importantes para os ensaios;
- Instalação dos instrumentos e realização dos ensaios na usina, conforme normas específicas;

- Por fim, análise dos resultados em comparação com o projeto de transientes hidráulicos.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho, com o objetivo de expor o tema escolhido e os resultados encontrados, será formado pela estrutura descrita nos parágrafos seguintes.

No capítulo 1, são descritos de forma sucinta os objetivos, a justificativa e a metodologia deste trabalho. Também neste capítulo está descrita a estrutura utilizada para apresentação do tema e dos resultados obtidos.

No capítulo 2, são apresentados o princípio de funcionamento de uma usina hidrelétrica e os equipamentos que compõem esse sistema, bem como os principais motivos para o incentivo à utilização da energia hidrelétrica. É apresentada também a classificação dos tipos de turbinas, visto que, o comissionamento pode variar de acordo com esta classificação.

No capítulo 3, são definidos os ensaios de forma abrangente, como as normas utilizadas para a realização e análise dos mesmos, a seqüência de cálculos necessários e como é esperado o comportamento da unidade.

No capítulo 4, são apresentados os resultados referentes aos ensaios de faixa operativa, rejeição de carga e índice test. Todos os resultados são mostrados em formas de gráficos em função do tempo versus as respectivas grandezas.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos estudos desenvolvidos.

2 VISÃO GERAL

2.1. O sistema elétrico brasileiro

O sistema elétrico brasileiro está em franca expansão de acordo com a ANEEL (Agencia Nacional de Energia Eletrica), com uma taxa de crescimento em torno de 4,5%, sendo que o planejamento governamental prevê um investimento da ordem de sete bilhões/ano. Na Tabela 1 temos o panorama da matriz elétrica brasileira no qual há predominância da energia gerada por hidrelétricas.

Tabela1 – Matriz Elétrica Brasileira (Aneel, 2011)

Empreendimentos em Operação				
Tipos		Capacidade instalada		%
		N° de Usinas	(KW)	
Hidrelétrica		907	81.144.805	66.22
Gás	Natural	98	11.343.194	9.26
	Processo	36	1.781.283	1.45
Petróleo	Óleo Diesel	863	3.936.686	3.21
	Óleo Residual	32	3.132.207	2.56
Biomassa	Bagaço de Cana	333	6.451.956	5.27
	Licor Negro	14	1.245.198	1.02
	Madeira	41	359.527	0.29
	Biogás	13	69.942	0.06
	Casca de Arroz	6	18.908	0.02
Nuclear		2	2.007.000	1.64
Carvão Mineral	Carvão Mineral	10	1.944.054	1.59
Eólica		49	928.536	0.76
Importação	Paraguai		5.650.000	5.46
	Argentina		2.250.000	2.17
	Venezuela		200.000	0.19
	Uruguai		70.000	0.07
Total		2.406	122.537.646	100

2.2. Componentes de uma usina hidrelétrica

Uma usina hidrelétrica é composta de inúmeros componentes atrelados à construção civil, mecânica e elétrica. Na Figura 1, temos um exemplo do formato de uma usina hidrelétrica, sendo os macros componentes: barragem, tomada d'água, vertedouro, válvulas, comportas, casa de força, turbinas e gerador.



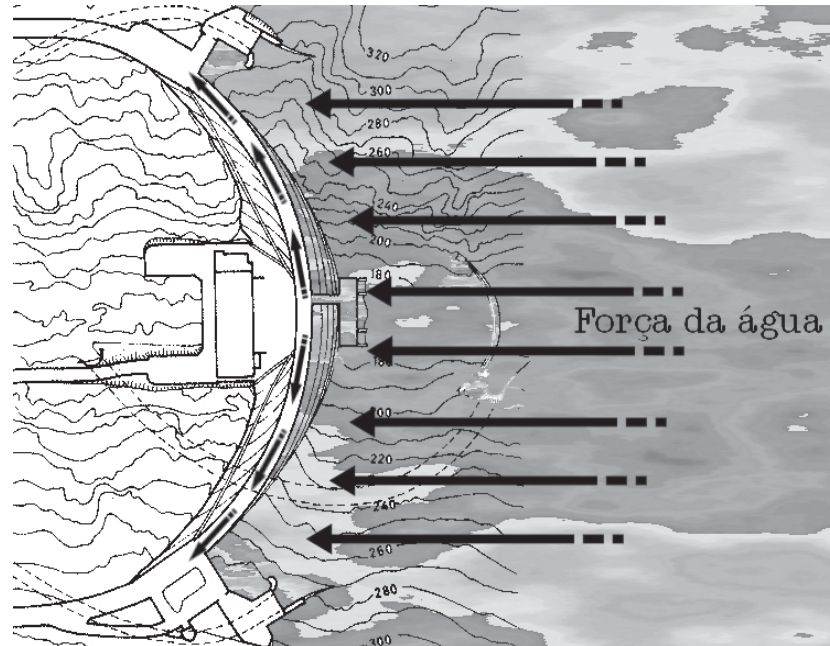
Fonte: Voith Hydro, 2011
 Figura 1 – Esquema de uma Usina Hidrelétrica

2.3. Barragem

Segundo Schreiber (1977), a construção de uma barragem ligada a uma usina hidrelétrica pode ter três finalidades; a concentração do desnível de um rio para produzir uma queda, a criação de um grande reservatório capaz de regularizar o deflúvio ou simplesmente o levantamento de nível d'água para possibilitar a entrada da água num canal, num túnel ou numa tubulação que aduza para a casa de força.

2.3.1. Barragem tipo arco

Segundo Zulcy de Souza(1992) quando os esforços possuem componentes em planos normais e tangenciais ao seu eixo. Essas barragens são próprias para vales estreitos com paredes de rocha de boa qualidade que permite engaste adequado, a Figura 2 mostra a força da água agindo na barragem.



Fonte: USCS, 2007

Figura 2 – Esquema de uma barragem tipo arco

2.3.2. Barragem tipo gravidade

Segundo Zulcy de Souza (1992) as barragens tipo gravidade são aquelas em que o equilíbrio estático da construção, sob a ação das forças externas (impulso hidrostático), é realizada pelo próprio peso da estrutura, com o auxílio eventual da componente vertical do impulso que atua sobre a estrutura. A resultante de todas as forças atuantes é transmitida, através de sua base, ao solo do leito do rio sobre o qual se apóia. Os vazamentos são evitados por um núcleo de argila a prova de água ou ainda por concreto.

2.3.3. Barragem tipo arco-gravidade

São barragens em forma de arco, mas que funcionam num misto de barragens em arco e por gravidade. As suas secções transversais apresentam-se bem mais espessas que as das barragens em arco, porém mais esbeltas que as das barragens de gravidade.

2.4. Sistema de tomada d'água

Segundo o Manual de Microcentrais Hidrelétricas (1985) a captação, no rio, da descarga de água necessária à movimentação da turbina é efetuada por uma estrutura denominada tomada d'água.

A tomada d'água tem as seguintes funções :

Controle da adução das vazões pela tubulação forçada , canal de adução ou tubulação de baixa pressão, permitindo o seu ensecamento para manutenção e eventuais reparos.

2.5. Vertedouro

O vertedouro tem o objetivo de abaixar o nível do reservatório, pois em épocas chuvosas pode vir a ameaçar os níveis de segurança. O fluxo descartado pelo vertedouro não tem utilização. Geralmente o fluxo é controlado hidraulicamente por comportas, porém é necessário um estudo hidrológico devido ao fluxo lançado ao rio.

2.6. Comportas

Segundo Zulcy de Souza(1991) comporta destina-se a abrir e fechar a admissão da água nos condutos. Equipadas em geral com o sistema de fechamento rápido para casos de emergência e um sistema de viga de vedação (*stop-log*) que permite o fechamento da tomada d'água para fim de manutenção das comportas. Podem igualmente ser equipados com comportas auxiliares para enchimentos de condutos, proporcionando equilíbrio hidrostático em ambos os lados das comportas principais, reduzindo esforços necessários à sua abertura. As comportas são compostas de:

- Tabuleiro: componente principal. Trata-se do elemento móvel que serve de anteparo à passagem d'água.
- Peças fixas: são os componentes que ficam fixadas no concreto. Servem para guiar e alojar o tabuleiro para redistribuir os esforços para o concreto e como elementos de apoio à vedação.
- Mecanismo de manobra: é o tipo de mecanismo usado para a abertura e fechamento da comporta.

2.6.1. Comporta tipo vagão

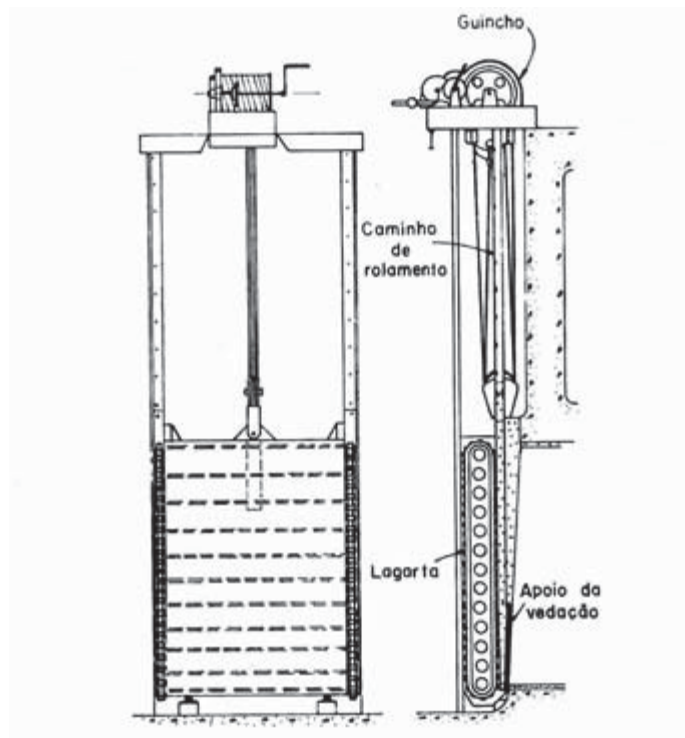
É uma comporta de rolamento geralmente com paramento plano e que se movimenta em suas guias ou peças fixas sob o fluxo hidráulico, utilizando rodas. Na Figura 3 temos o exemplo da comporta vagão localizada na jusante.



Fonte: Voith Hydro, 2011
 Figura 3 – Comporta tipo vagão

2.6.2. Comporta tipo lagarta

É uma comporta plana dotada de cadeias fechadas de rolos nas laterais do tabuleiro que se deslocam livremente no eixo vertical. Possui baixo coeficiente de atrito dos rolos e alta capacidade de carga. A Figura 4 mostra um desenho esquemático da comporta tipo lagarta.



Fonte: Schreiber (1977)
 Figura 4 – Comporta tipo lagarta

2.6.3. Comporta segmento

Segundo Schreiber (1977) chamada assim porque o plano vedante tem a forma de um segmento de cilindro. A comporta de segmento tem as seguintes vantagens: é uma construção muito simples e tem apenas duas peças de precisão, os dois mancais, as superfícies laterais dos pilares ficam planas sem reentrâncias como os existentes nos nichos para as guias de comportas planas, que perturbam o fluxo d'água e são causadores de cavitações, os esforços do levantamento da comporta são relativamente pequenos e correspondem apenas ao peso próprio da comporta e ao atrito das vedações laterais, o atrito nos mancais é desprezível. A Figura 5 mostra a comporta segmento localizada no vertedouro da usina de Itaípu.



Fonte: Eletrobrás, 1994
Figura 5 – Comporta segmento

2.7. Válvulas

São componentes hidromecânicos destinados a estabelecer, controlar e interromper a vazão nos condutos. Algumas garantem a segurança e permitem a desmontagem de equipamentos para reparos, existe uma gama enorme de válvulas, no qual a escolha depende da natureza da operação, da vazão, da pressão a que são submetidas e da forma de acionamento necessário ou pretendido para operá-las. Geralmente são mais usadas em PCH's devido à vazão e à pressão serem menores nos condutos, ao contrario das UHE's que têm

dimensões bem maiores que fogem do escopo das válvulas. Os dois tipos mais utilizados são a válvula borboleta e a válvula esférica.

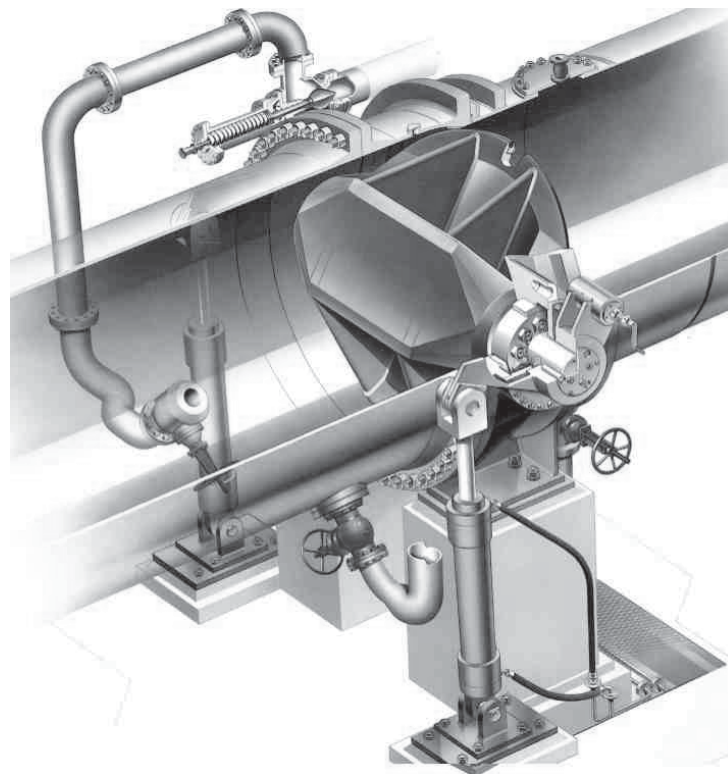
2.7.1. Válvula borboleta

Segundo Manual de Microcentrais Hidrelétricas (1985), deverá ser prevista a utilização de válvula borboleta nas microcentrais que tenham tubulação forçada metálica. Esta válvula tem a função de bloquear a entrada do fluxo d'água na turbina para fins de manutenção, bem como proporcionar um recurso adicional de parada da turbina em caso de falha do sistema normal.

A válvula borboleta é instalada na casa de máquinas, entre tubulação forçada e a caixa espiral da turbina, através de ligações flangeadas.

Estas válvulas são de fácil instalação e manutenção, proporcionam operação rápida e boa estanqueidade, apresentando características simples e econômicas. São facilmente encontradas no mercado nacional.

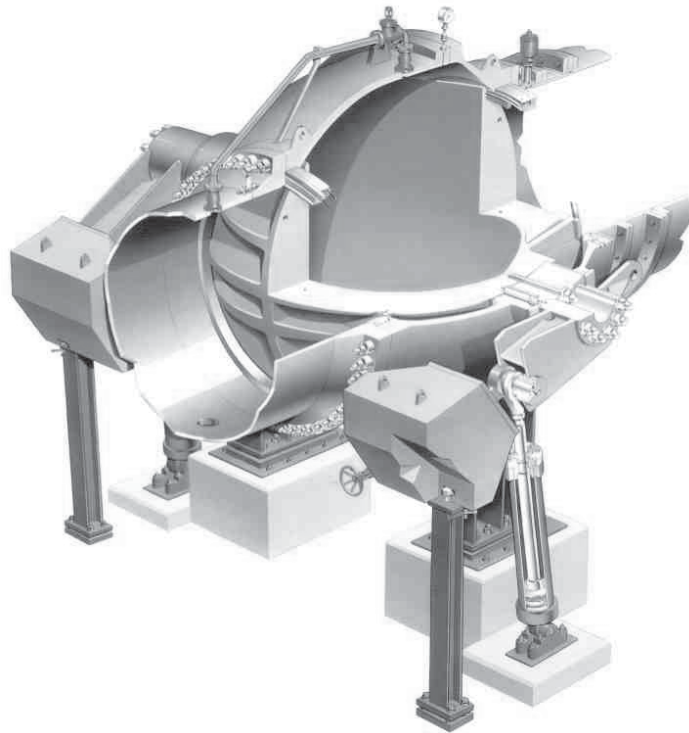
São operadas manualmente através de uma alavanca ou de um volante incorporado a um mecanismo de redução. Na Figura 6 podemos ver a válvula em três dimensões.



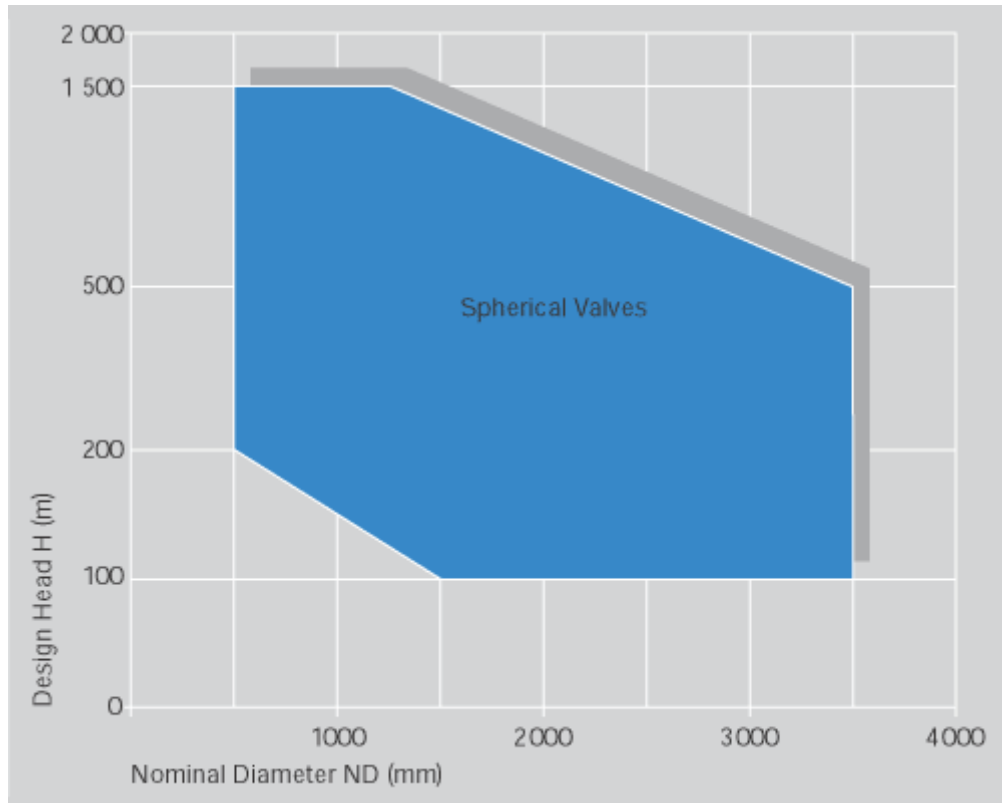
Fonte: Voith Hydro, 2011
Figura 6 – Válvula borboleta

2.7.2. Válvula esférica

Segundo Schreiber (1977), as válvulas esféricas têm boas características somente em posição completamente aberta e recomenda-se usá-las apenas sob pressões d'água muito grandes, está representada pela Figura 8. Na Figura 9 temos o campo de atuação da válvula em função da queda e do diâmetro nominal.



Fonte: Voith Hydro, 2011
Figura 7 – Válvula esférica.



Fonte: Voith Hydro, 2011
 Figura 8 – Campo de aplicação da válvula esférica

2.8. Grades

Segundo Macintyre (1983), são proteções contra corpos estranhos advindos do rio que possam danificar os sistemas da casa de força, sendo alocados antes da comporta ou do local de encaixe dos *stop-logs*. São fabricadas em perfilados de aço e apoiadas no concreto e têm a forma de uma ranhura. Para retirar os corpos estranhos presos à grade, é usado um carrinho com ganchos para prender e puxar os materiais que tenham ficado presos na grade.

2.9. Chaminé de equilíbrio

Segundo Schreiber (1977) a chaminé de equilíbrio consiste numa bacia aberta ao ar livre. Esta chaminé tem duas finalidades: restringir o golpe de aríete ao trecho inclinado, reduzindo assim, o comprimento do conduto sujeito a esse efeito, e reduzir a grandeza de sobrepressão .

A segunda tarefa, talvez a mais importante da chaminé de equilíbrio, é a de fornecer as turbinas, no caso de aumento rápido da descarga devido ao aumento de carga dos geradores, o volume d'água necessário até que a massa no conduto adutor seja acelerada suficientemente.

2.10. Casa de força

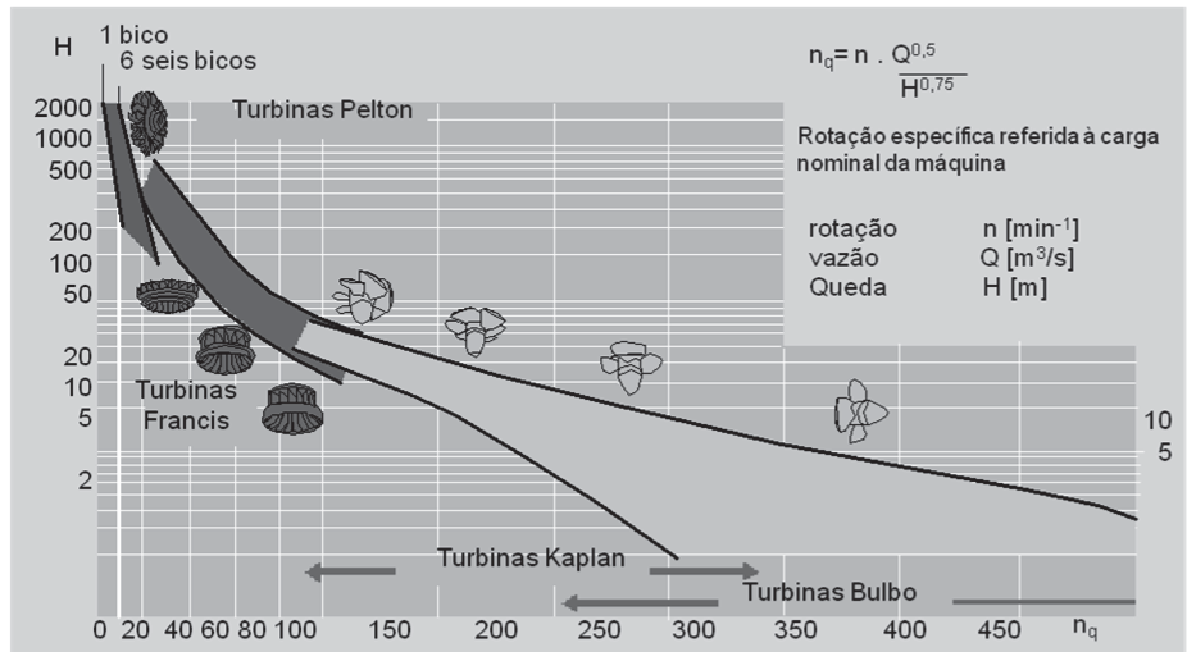
Segundo Manual de Microcentrais Hidrelétricas (1985) a casa de força é a edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica.

2.11. Turbinas hidráulicas

As turbinas hidráulicas são máquinas motoras que transformam a energia potencial hidráulica em energia mecânica. O fluxo d'água geralmente é controlado para que permaneça uniforme e evitar perdas de carga.

Seu funcionamento consiste na transferência da quantidade de movimento d'água para o rotor em forma de torque e velocidade de rotação, sendo que as pás possuem perfil hidráulico para que essa transferência seja a maior possível.

Ao se escolher uma determinada turbina, mais informações devem ser consideradas, como: histórico de vazões, altura de queda e velocidade específica. Isto se deve ao fato que existem turbinas que possuem um desempenho melhor em certo campo de atuação.



Fonte: Macyntere (1983)

Figura 9 – Campo de aplicação das turbinas

Segundo Macintyre (1983) a rotação específica é uma característica que fornece o tipo de turbina tendo por base elementos, tais como vazão, altura de queda, grandezas obtidas por estudos hidráulicos, hidrológicos, topográficos, consumo, custos e outros. A rotação específica tem mostrado que na prática de projeto, os resultados obtidos com as turbinas instaladas, para cada um dos tipos examinados, só pode ser empregado com bom rendimento para valores Nq (Equação 1) compreendidos entre determinados limites, o que significa dizer que, de certo modo, essa grandeza específica o tipo de turbina a ser usada numa instalação caracterizada pelos aspectos do rio.

Valores elevados de velocidade específica poderão 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.

Velocidades específicas grandes para quedas elevadas aumentam o custo da construção da turbina, devido à grande velocidade real do conjunto girante, geradora de esforços intensos que devem ser equilibrados.

$$Nq = n * \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[3]{H^4}} \quad (1)$$

A mais importante classificação das turbinas é aquela que atende ao modo de atuar d'água.

2.11.1. Turbinas de ação

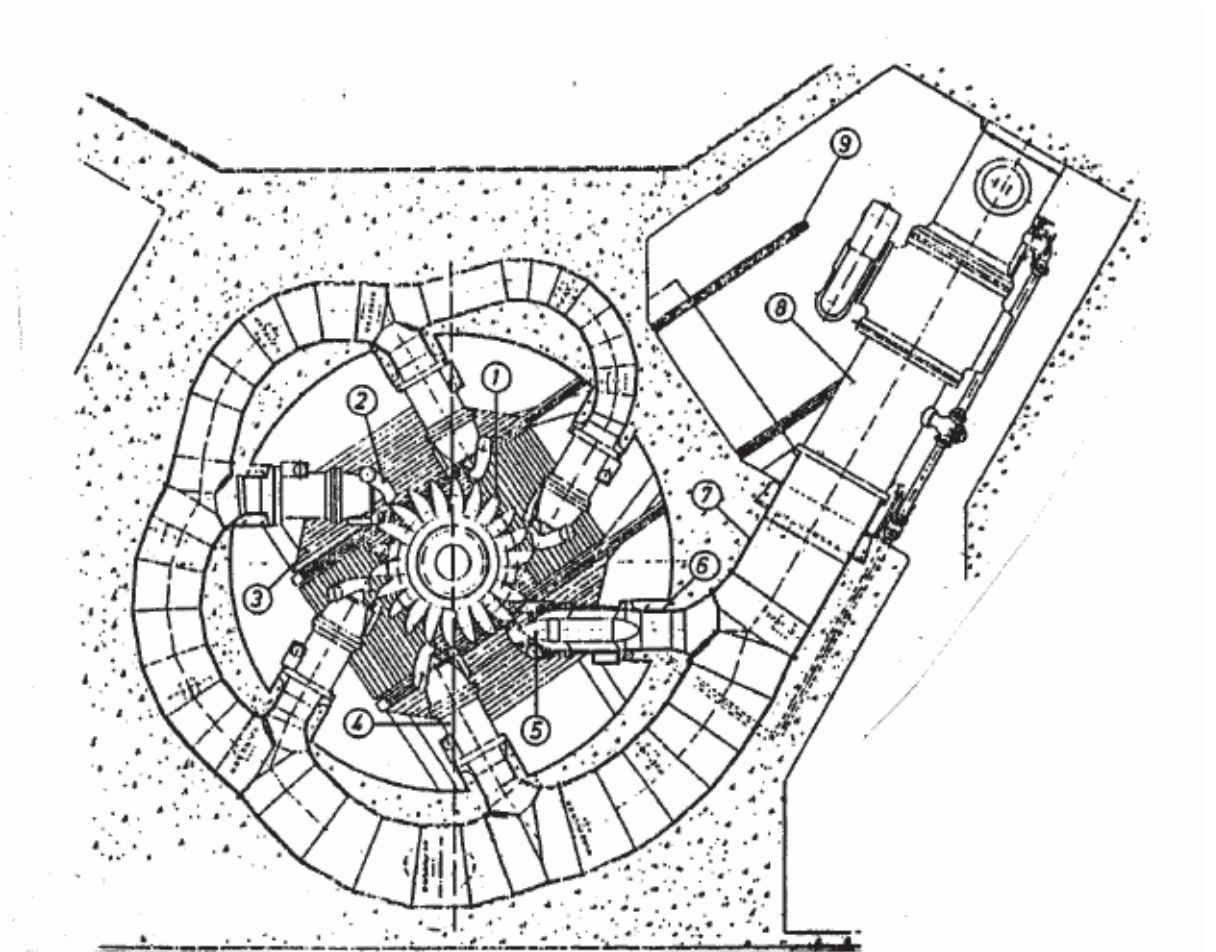
Segundo Arne Kjolle (2001), a energia do fluxo d'água é completamente convertida em energia cinética antes de entrar em contato com o rotor. Isto significa que o fluxo d'água passa no distribuidor sem nenhuma diferença de pressão entre a entrada e a saída. Portanto, somente a ação das forças devido à mudança no vetor velocidade cria a energia mecânica no eixo do rotor. O fluxo entra no eixo com pressão muito próxima da atmosférica na forma de um ou mais jatos espaçados regularmente em torno da borda do rotor. Isto significa que cada jato atinge momentaneamente apenas uma fração ou parte da circunferência do rotor.

2.11.1.1. Turbina Pelton

Segundo Manual de Microcentrais Hidrelétricas (1985) as turbinas de ação, em cuja classificação a turbina Pelton se situa, têm por características a transformação da energia potencial de queda em energia cinética no jato injetor. Posteriormente esta energia cinética é convertida em energia mecânica no rotor da turbina.

A turbina Pelton é constituída basicamente por um rotor, em torno do qual estão fixadas as pás ou conchas, por uma tubulação de adução contendo um, dois ou mais injetores e por blindagens metálicas no caminho da água. A regulação deve-se prever a regulação da descarga da água e, conseqüentemente, da potência fornecida, por meio de uma peça móvel, colocada na parte interna do injetor e acionada por um mecanismo manual ou hidráulico, denominado agulha.

A regulação por meio de um defletor, ou até mesmo uma regulação dupla, por agulha e por defletor, só é empregada em máquinas maiores, onde o aumento de pressão na tubulação de adução durante o fechamento rápido por agulha poderia causar problemas graves.



Fonte: Macyntire (1983)

Figura 10 – Turbina Pelton e injetores

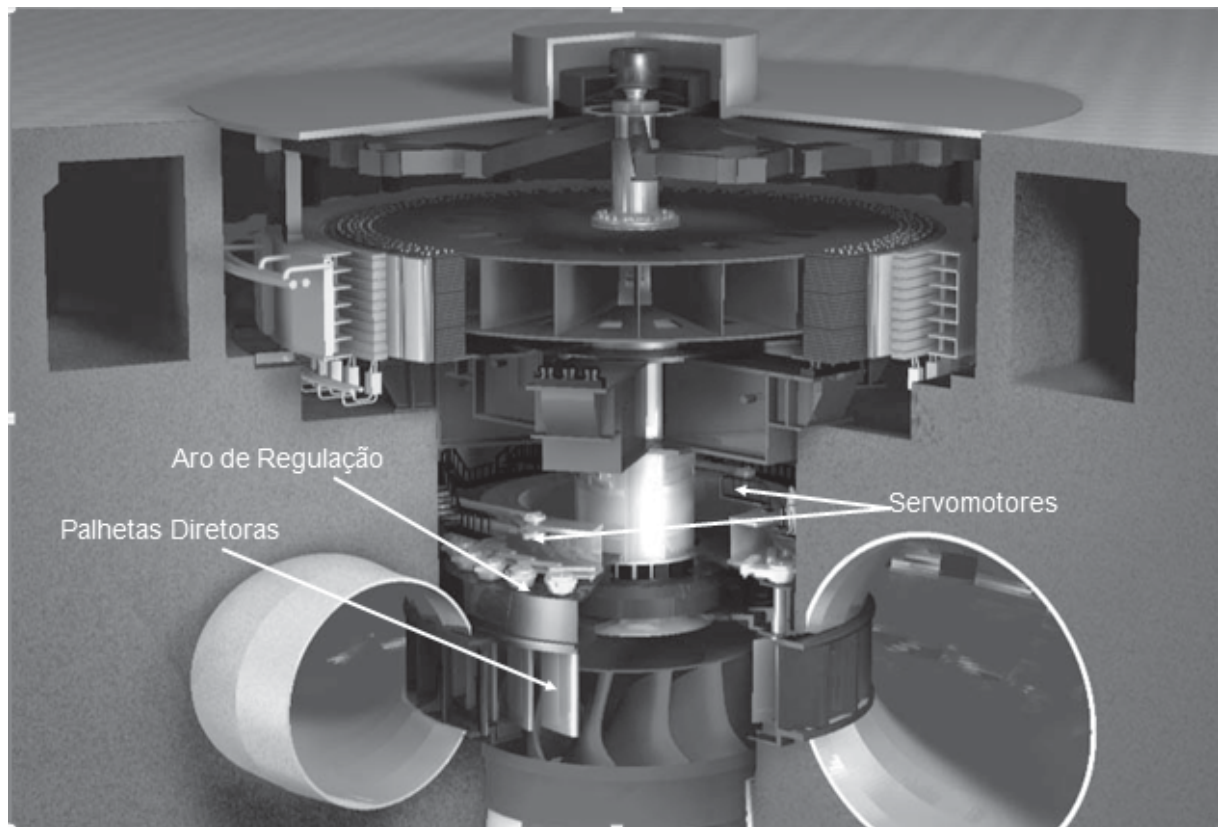
2.11.2. Turbina de reação

Segundo Arne Kjolle (2001), dois efeitos causam a transferência de energia do fluxo d'água para a energia mecânica no eixo da turbina. Primeiramente ocorre uma queda de pressão da entrada para a saída do rotor, gerando uma diferença de pressão que faz com que o rotor mova-se. O outro efeito é a ação das forças devido à mudança no vetor velocidade criando a energia mecânica no eixo do rotor.

2.11.2.1. Turbina Francis

Segundo Schreiber (1977) o rotor é constituído por um certo número de pás com geometria especial visando a melhor construção hidráulica, fixas e estruturadas entre as coroas internas e externas.

Nesse tipo de turbina o fluxo d'água é orientado e distribuído igualmente, na direção radial, por toda periferia da entrada do rotor, saindo na sua direção axial.

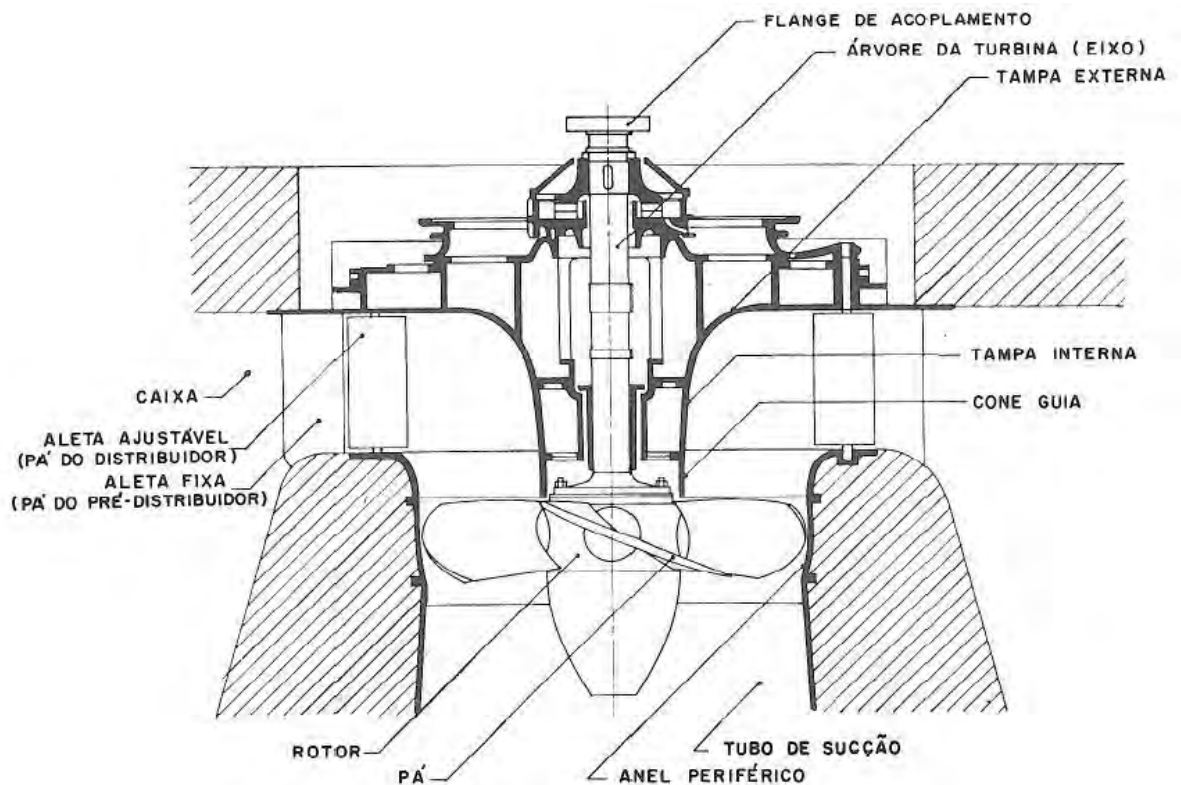


Fonte: Voith Hydro, 2011
Figura 11 – Componentes e turbina Francis

2.11.2.2. Turbina Kaplan

De acordo com Schreiber (1977), as turbinas-hélices o rotor é constituído por um núcleo central, cubo hidrodinâmico, fixo à extremidade da árvore principal, que sustenta um pequeno número de pás em forma de hélice.

Neste tipo de turbina o fluxo d'água é orientado de maneira que tanto na entrada como na saída do rotor, sua direção coincide com a da árvore. As turbinas com pás moveis, ou seja, por haver uma conjugação entre o distribuidor e do rotor chamam-se Kaplan e com pás fixas Propeler.

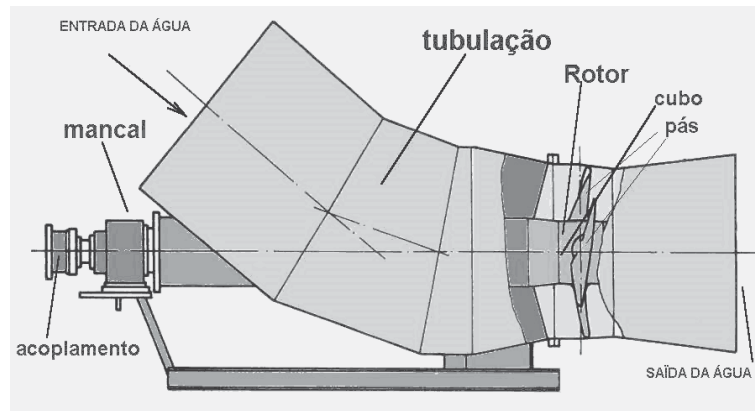


Fonte: Macintyre 1983

Figura 12 – Turbina Kaplan em corte. Indicação dos principais componentes

2.11.2.3. Turbina Kaplan S

As turbinas Kaplan S têm sua aplicação principalmente para aproveitamento em baixas quedas, entre 5 a 20m. Seu emprego em projetos de pequenos aproveitamentos é conveniente por apresentar flexibilidade de operação, simplicidade de montagem e facilidade de manutenção.

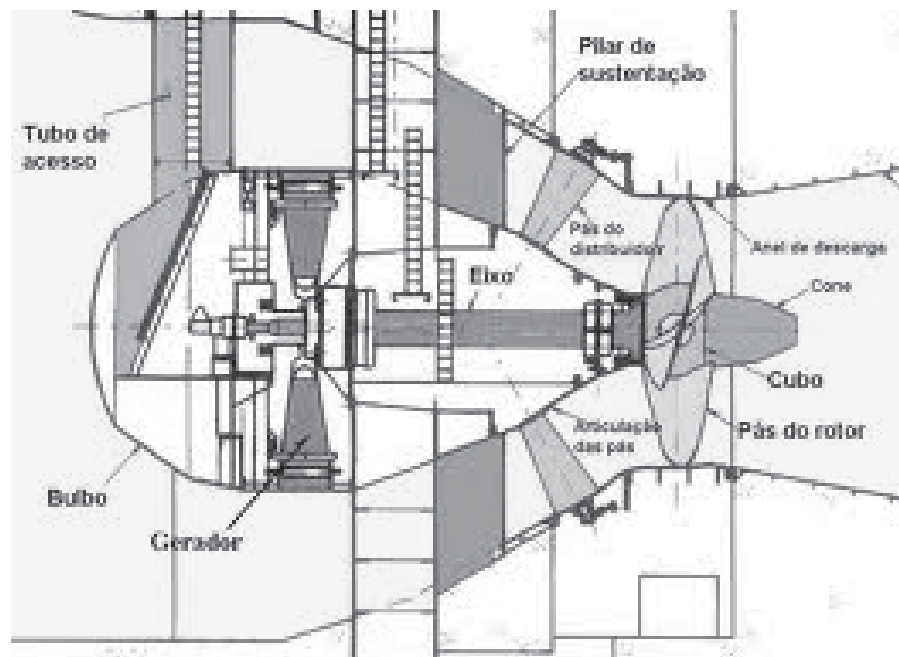


Fonte: Zeraib (2006)

Figura 13 – Turbina Kaplan S. Indicação dos principais componentes

2.11.2.3. Turbina bulbo

É uma solução compacta da turbina Kaplan, podendo ser utilizada tanto para pequenos quanto para grandes aproveitamentos. Caracteriza-se por ter o gerador montado na mesma linha da turbina, em posição horizontal, e envolto por um casulo pelo qual o fluxo d'água passa. Geralmente aproveitada em baixa queda e quase sempre a fio d'água. Este fato minimiza os impactos ambientais, visto que não necessita de grandes reservatórios.

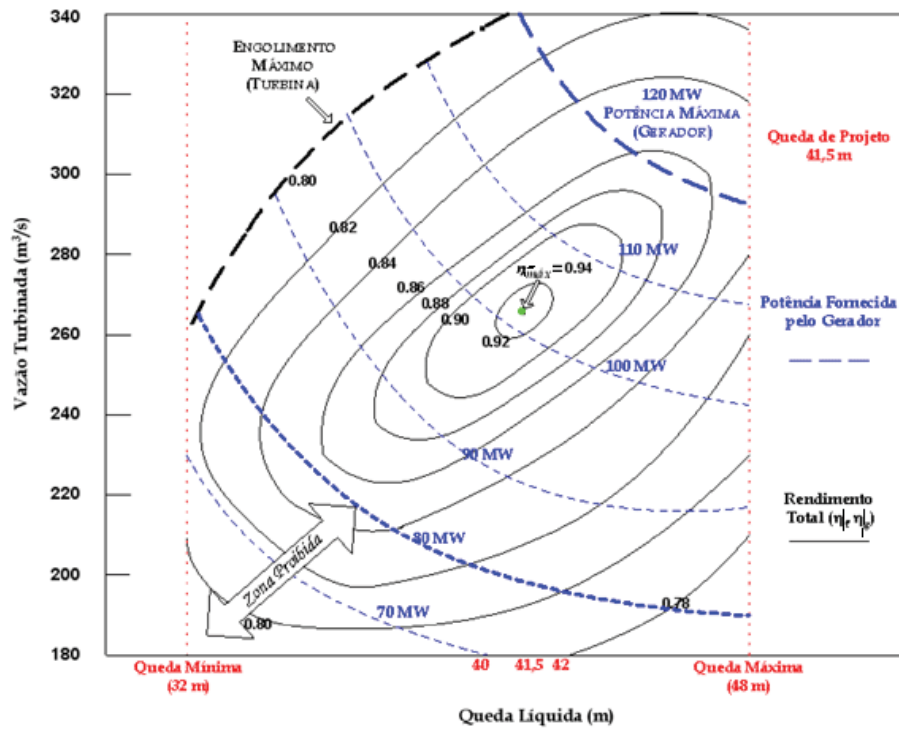


Fonte: www.santoantonio.com.br

Figura 14 – Turbina bulbo

2.11.3. Curvas de colina

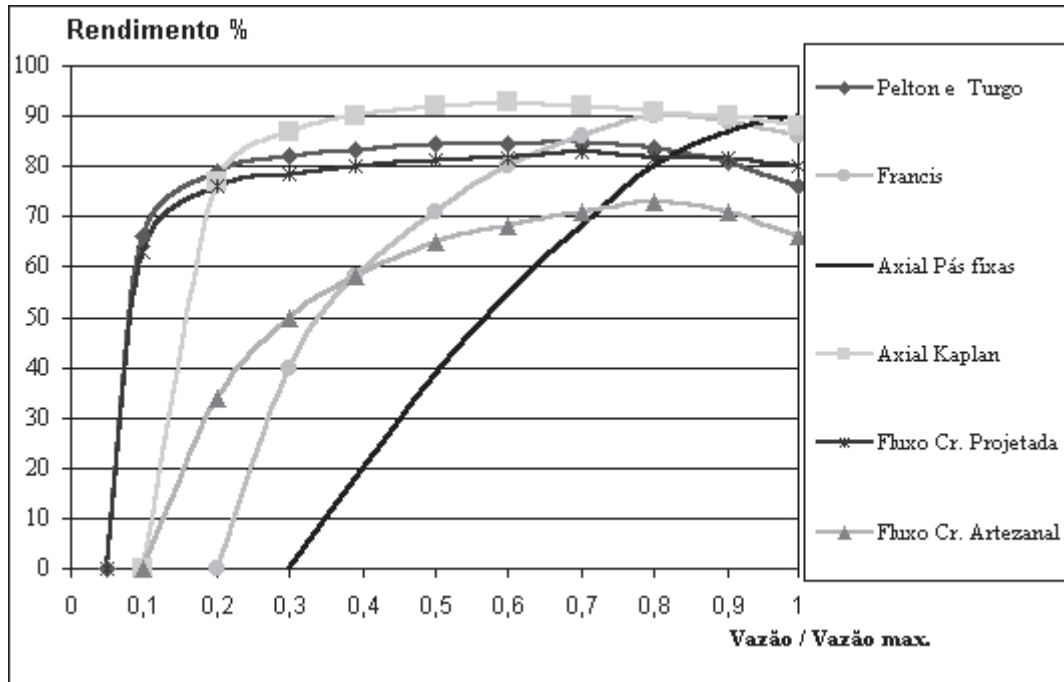
São curvas características das máquinas de fluxo, no qual se encontra a vazão no eixo das abscissas, e a altura no eixo das ordenadas. As curvas de rendimentos são em formatos de colina, em uma determinada rotação.



Fonte: Kjolle (2006)

Figura 15 – Exemplo de curva de colina

Na figura abaixo temos a variação do rendimento em função da relação da vazão pela vazão máxima, uma importante informação para comparação de desempenho.



Fonte: Harvey, Adam 1998

Figura 16 – Rendimentos de alguns tipos de turbinas com variações de vazões

2.12. Geradores

De acordo com Schreiber (1977) os geradores aplicados às plantas hidrelétricas são os síncronos, ou seja, a velocidade de rotação é constante e sincronizada com a frequência e fase da tensão elétrica alternada. Fisicamente o gerador é composto da parte fixa, o estator, e da parte rotativa, o rotor. A carcaça do estator, em fabricação soldada, apóia em seu interior o ferro ativo, composto de pacotes de lâminas que levam as ranhuras para as bobinas. O rotor compõe-se do cubo com o eixo, que está diretamente acoplado ao eixo da turbina e sustentado verticalmente pelo mancal escora. Os números de pólos são regidos pela Equação 2:

$$N = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

N– velocidade angular em rpm

f– frequência da rede em Hz

p– número de pares de pólos

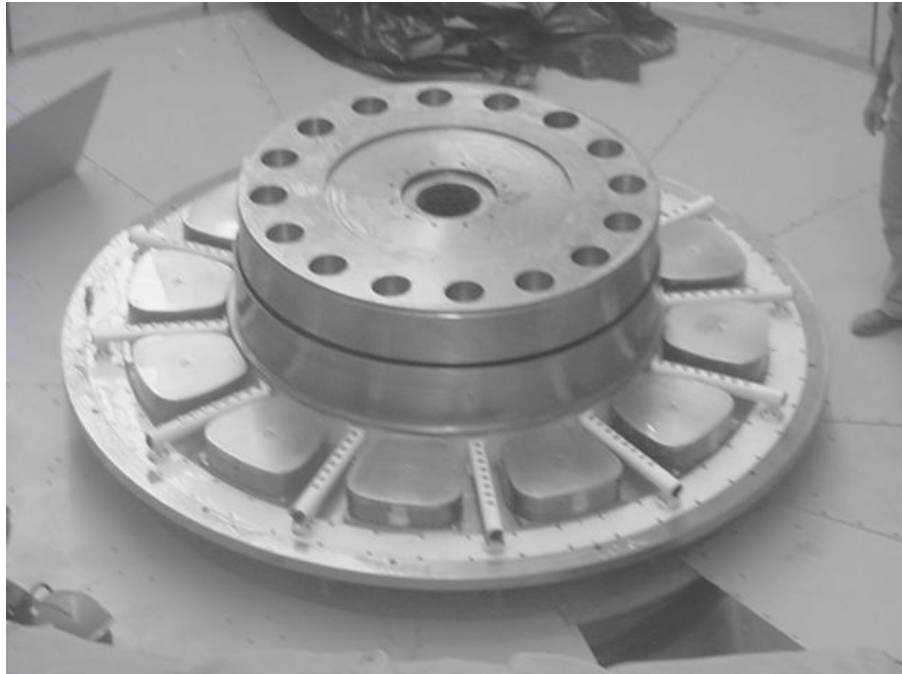
2.13. Mancal guia

É constituído por um conjunto de sapatas axiais suportadas por um disco apoiado no colo usinado do eixo da turbina ou do gerador, ou de ambos. O conjunto fica submerso em óleo em uma cuba formada pelo disco que constitui a carcaça do mancal.

Há a possibilidade de utilização de um mancal de casquilho, no qual a vantagem é a ausência de um skid de lubrificação, visto que este é auto-bombeável; porém, há necessidade do controle da temperatura máxima do óleo no mancal, para não ultrapassar o limite de temperatura do metal patente.

2.14. Mancal escora

O conjunto mancal escora é composto pelo segmento de escora, bloco de escora e espelho de escora. O segmento de escora possui um pequeno orifício que é pressurizado com óleo, para formar um pequeno filme, em que o espelho de escora fica móvel. Por cima do espelho localiza-se o bloco de escora no qual a máquina se apóia. O mancal escora é o dispositivo que suporta todo o peso da máquina. Em algumas configurações há mancais combinados, ou seja, guia e escora juntos.



Fonte: Voith Hydro, 2011
Figura 17 – Mancal escora

2.15. Regulador de velocidade

“O objetivo a que se propõe é o de manter uma árvore de rotação girando com uma determinada velocidade angular e de fazê-la retornar ao valor desejado, quando uma grandeza relacionada com a operação da máquina sofre variação, acarretando alteração momentânea no valor da velocidade.” (Macintyre, 1983, pag 507)

De acordo com Manual Microcentrais Hidreletricas (1985) os reguladores automáticos de velocidades geralmente empregados nas microcentrais hidrelétricas são do tipo mecânicos, de acordo com a Figura 18, constituídos por um servo-mecanismo acionado por um óleo pressurizado, comandado por um pêndulo centrífugo. O pêndulo detecta qualquer variação da velocidade (rotação) da unidade geradora, causada por variação da carga na rede, colocando em funcionamento o servo-mecanismo de acionamento do distribuidor da turbina.

O distribuidor regula o fluxo de água através da turbina controlando desde modo a variação da potência da mesma, de acordo com a variação da carga na unidade geradora.



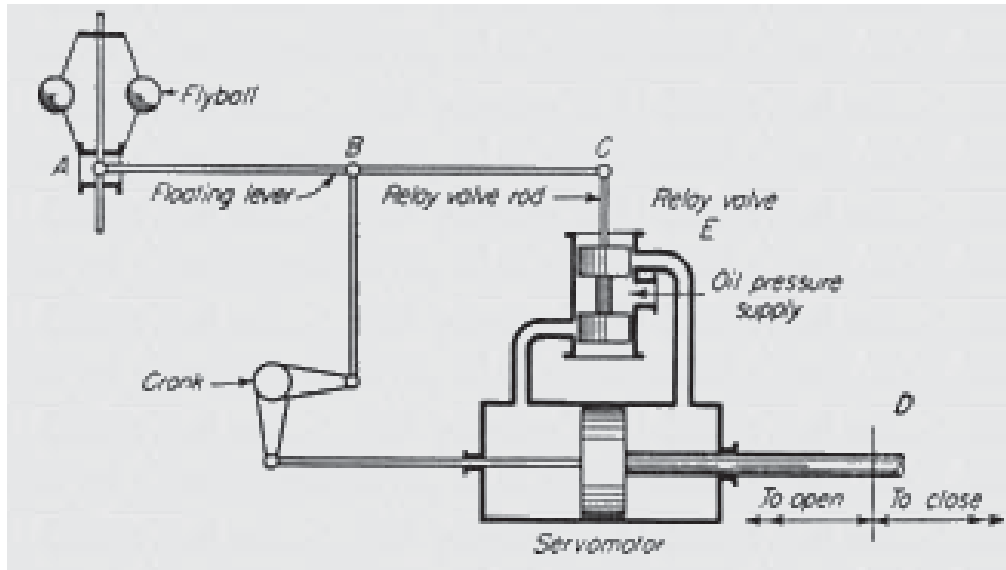
Fonte: Voith Hydro., 2011

Figura 18 – Sistema de regulador de velocidade hidráulico

2.15.1. Regulador de compensação primário

No regulador de compensação primário, com o aumento da velocidade do eixo há uma aceleração centrífuga fazendo com que o ponto A eleve-se. Com esse movimento, o ponto C abaixa o pistão da válvula direcional, fazendo com que o lado esquerdo do servomotor se pressurize no sentido de fechamento e, nesse instante, um sistema de correia no servomotor auxilia numa compensação para que o mesmo pare no momento e ponto exato. No outro sentido, quando a velocidade diminui, o ponto A abaixa-se, fazendo com que o ponto C eleve-se, e o pistão da válvula direcional suba pressurizando o lado direito do servomotor no sentido

de abertura. A compensação primária atua novamente para que o servomotor pare no lugar exato. Como pode ser visto na Figura 19.

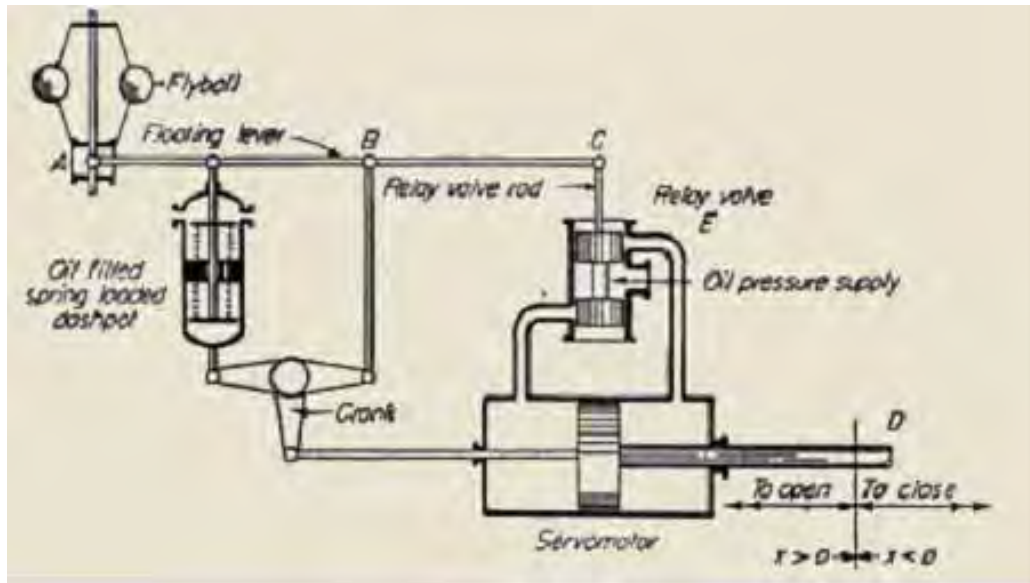


Fonte: Voith Hydro, 2011

Figura 19 – Regulador de velocidade de compensação primária

2.15.2. Regulador com dupla compensação

No regulador de dupla compensação a seqüência é semelhante a do regulador de compensação simples; porém, com a adição do amortecedor no sentido de compensar o movimento do servomotor, visto que, com o amortecedor é necessário mais força para que a barra ABC movimente-se. Com isso, tem-se um estatismo para que a válvula não atue em mínimas mudanças na velocidade centrífuga. O esquema de funcionamento do regulador de dupla compensação pode ser observado na Figura 20.



Fonte: Voith Hydro, 2011
 Figura 20 – Regulador de velocidade de dupla

3 ESCOPO DO ESTUDO

3.1. Comissionamento

O comissionamento é uma parte muito importante em um projeto hidrelétrico, o qual consiste em assegurar que os sistemas e componentes estejam projetados, instalados, testados, operados e mantidos de acordo com as necessidades e requisitos operacionais. O comissionamento pode ser aplicado, tanto em novos empreendimentos, quanto em unidades e sistemas existentes, em processos de expansão, modernização ou ajuste.

Na prática, o processo de comissionamento consiste na aplicação integrada de um conjunto de técnicas e procedimentos de engenharia para verificar, inspecionar e testar cada componente físico da planta hidrelétrica, desde os individuais, como peças, instrumentos e equipamentos, até os mais complexos como módulos, subsistema e sistemas.

O comissionamento é aplicável em todas as fases do projeto, desde a sua concepção, passando por todas as fases até a entrega da unidade ao cliente final, passando muitas vezes, por uma fase de operação assistida.

O objetivo final do comissionamento é assegurar a transferência da unidade do construtor para o proprietário de forma ordenada e segura, garantindo sua operabilidade em termos de desempenho, confiabilidade e rastreabilidade de informações.

De acordo com Memória Técnica de Usinas Hidrelétricas (1988), em sua primeira parte, compreende o conjunto de providências que antecedem a entrega da usina para a entrada em operação comercial. Assim, são apresentadas todas as atividades relativas ao comportamento das principais estruturas e dos equipamentos eletromecânicos, em sua fase final de montagem, ensaios, testes e medições; em suma, todas as providências características da fase de entrega da obra, intermediária entre o final da construção e o início da operação regular.

Segundo a I.E.E.E. Std. 1248-1998 o comissionamento é normalmente dividido em três fases:

- Fase de testes de construção;
- Pré-operacional;
- Operacional.

3.2. Ensaio a seco

Os ensaios a seco classificam-se como pré-operacionais, ou seja, consta como a energização dos sistemas auxiliares e a verificação dos protocolos conforme o projeto e a correta funcionabilidade.

3.2.1. Run-Out

Nesse ensaio é primeiramente ligada a bomba de óleo dos mancais e, em seguida, colocados relógios comparadores radiais e axiais em torno do eixo. Na seqüência, o giro é ativado por força humana, para verificação da excentricidade.

3.3. Ensaio em água morta

Também são pré-operacionais, ou seja, são realizados com água no conduto até o tubo de sucção; porém, sem nenhum fluxo d'água. Verifica-se a estanqueidade de todo o conjunto, a pressão no conduto por meio de transdutores de pressão, a deflexão da tampa da turbina devido ao empuxo hidráulico e a verificação da vedação montante e jusante.

3.4. Ensaio Dinâmicos

São ensaios operacionais, sendo nesta etapa abertas as comportas de tomada d'água e sucção, ocorrendo o fluxo d'água. Essa etapa oferece os ensaios mais importantes como ensaio de sincronismo, ensaio de rejeição de carga, faixa operativa e índice test.

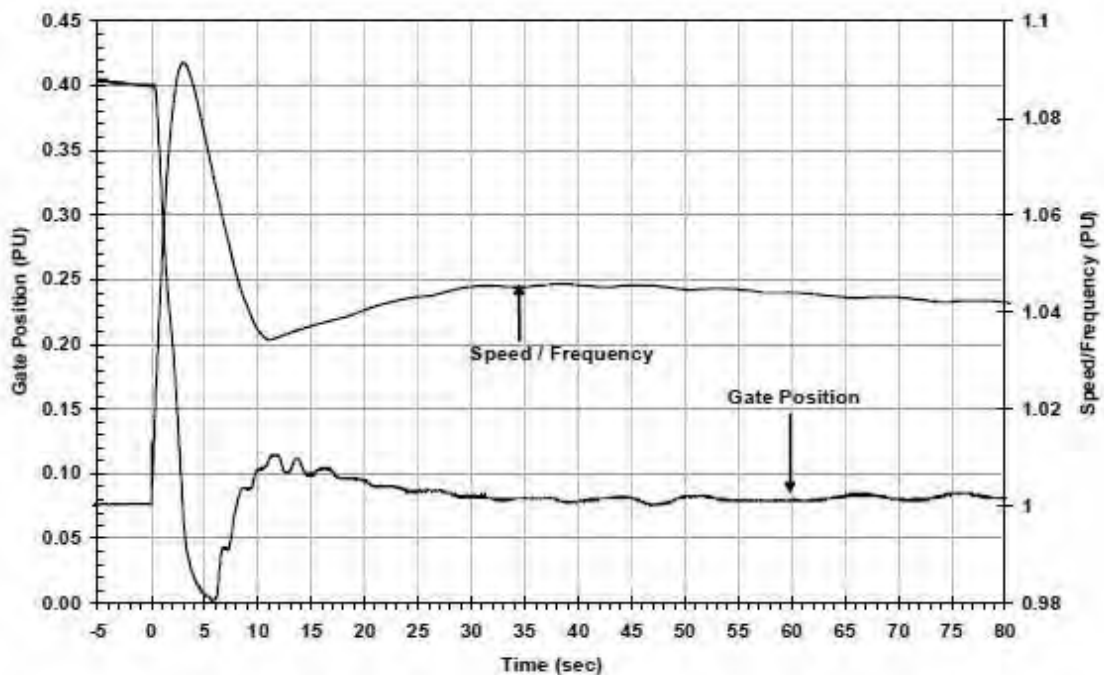
3.4.1. Sincronismo

O ensaio de sincronismo tem o objetivo de efetuar a conexão do gerador à linha viva. Para tanto, é necessário obter, na saída do gerador, a mesma tensão, frequência e fase da linha viva, para que possa ser executado o sincronismo (ou inserção de carga).

A tensão da linha viva é medida e utilizada como referência para o controlador de tensão. Quando são atingidas e estabilizadas estas condições é efetuado o comando de sincronismo atuando em um disjuntor que conectará o gerador a linha.

3.4.2. Ensaio de rejeição de carga

Rejeição de carga é um ensaio realizado para avaliar a capacidade do sistema de retornar à velocidade nominal e de avaliar o aumento de pressão dentro do conduto forçado e na admissão da turbina. Este ensaio é geralmente feito com a unidade conectada à rede com uma potência específica e então desconecta-se o disjuntor principal. Alguns níveis são necessários para o comissionamento da unidade; porém, em alguns casos, é necessário somente um nível de rejeição para a aceitabilidade da unidade. Alguns parâmetros são observados e aquisitados como: pressão na caixa espiral, rotação, abertura do distribuidor e pressão no tubo de sucção. O tempo de resposta do servomotor é usado na aceitação, visto que, está diretamente ligado ao pico de pressão gerado pelo fechamento. Se necessário, ajustes no amortecimento são realizados. A Figura 21 mostra um exemplo de rejeição de carga. No tempo zero segundo ocorre a rejeição, elevando a velocidade e a frequência e fazendo com que o distribuidor feche para diminuir a velocidade.



Fonte:IEEE, 2004

Figura 21 – Resposta à rejeição de carga

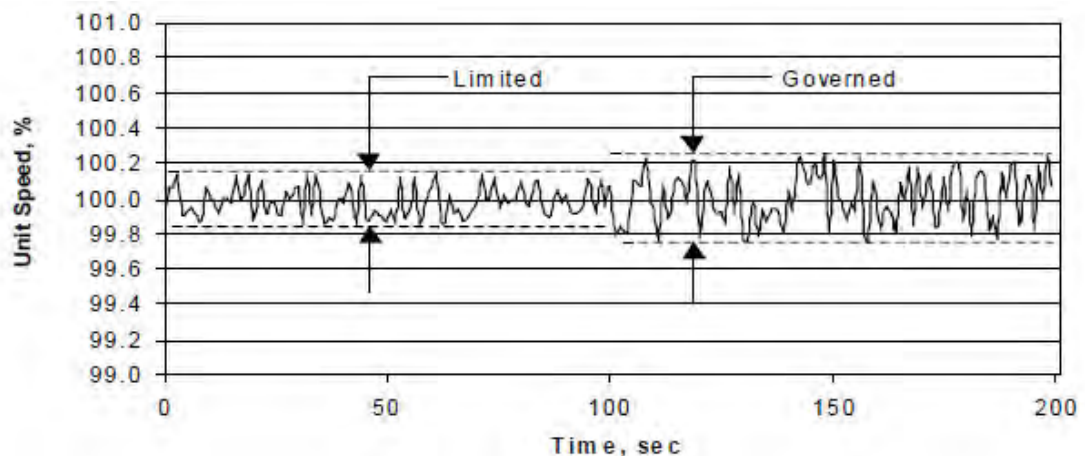
3.4.3. Faixa operativa

O ensaio de faixa operativa consiste em elevar a potência da unidade em vários patamares, para então medir os mesmos parâmetros do ensaio de rejeição de carga; porém, com os acréscimos das medições das vibrações dos mancais e da oscilação do eixo.

Com isso é possível observar as faixas que oferecem menos turbulência, cavitação ou vórtices que diminuem a vida útil da unidade, bem como diminuem a potência.

3.4.4. Teste de estabilidade

O teste de estabilidade pode ser especificado para verificar o índice de estabilidade da velocidade da turbina a pequena variação na rotação nominal, sem que o regulador de velocidade atue. De acordo com a norma I.E.E.E. Std 125-1988, o teste consiste em medir os desvios pico a pico da velocidade da turbina que são causados por perturbações do sistema. Em seguida, estes desvios são registrados durante a execução da unidade sob as mesmas condições da unidade com carga. A diferença entre os picos a picos é interpretada como o índice de estabilidade de velocidade, conforme pode ser observado na Figura 22.



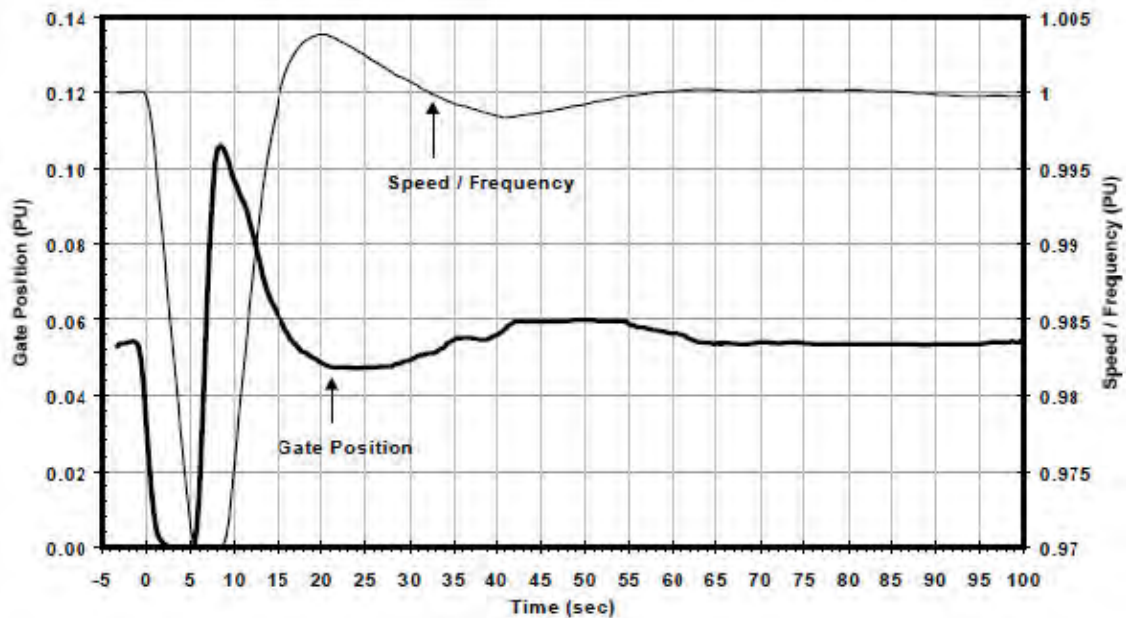
Fonte: IEEE, 2004

Figura 22 – Teste de estabilidade

3.4.5. Teste de estabilidade do regulador de velocidade

O teste de estabilidade do regulador de velocidade consiste em normalizar a velocidade da unidade à sua velocidade nominal sem conexão com a rede. Em seguida, a velocidade é perturbada para um valor especificado, e então observa-se o comportamento da unidade reguladora a fim de que a mesma controle a unidade para que volte à velocidade nominal rapidamente. Na Figura 23, é possível observar que no tempo zero, as palhetas do distribuidor são fechadas e a unidade reduz a velocidade. O regulador é então aberto até que a velocidade

da unidade aumente, e então é ajustado para que a unidade volte a sua rotação nominal. Em alguns casos ajuste no amortecimento são usados para atingir a resposta desejada.



Fonte: IEEE, 2004

Figura 23 – Teste de estabilidade do regulador

3.4.6. Método de pressão diferencial (Winter-Kennedy)

De acordo com a IEC 60041 – Field Acceptance Test to Determine The Hydraulic Performance Of Hydraulic Turbines, Storage Pumps And Pump Turbines, a vazão é uma grandeza de difícil medição devido às incertezas encontradas no processo, geralmente, em instalações hidrelétricas, estas medições são realizadas pelo método Winter-Kennedy, que garante uma exatidão suficiente. O método consiste em instalar transmissores de pressão diferencial tipo piezo-resistivo nas tomadas de pressão em uma determinada seção da caixa espiral. No ensaio de índice test deverão ser utilizados os pares k e n , conforme equação (3), existentes para comparação com os valores definidos no ensaio de modelo transposto para o protótipo. Uma limitação técnica deste método é a necessidade de se ter um modelo reduzido, uma vez que o fator que relaciona a vazão com a diferença de pressão, medida entre dois pontos, deve ser determinado no modelo reduzido e depois aplicado na instalação. De acordo com a queda bruta do ensaio, a unidade é colocada na condição de máximo rendimento, bem como os pontos de vazão definidos no diagrama de colina, e são feitas iterações para alcançar os valores mais próximos. Pela Equação (3) é possível calcular a vazão (Q).

$$Q = k * \Delta h^n \quad (3)$$

Onde:

Q - Vazão turbinada (m^3/s)

n- coeficiente de vazão

K- coeficiente de vazão

Δh -Pressão diferencial (mbar)

3.4.7. Index test

O objetivo deste ensaio é determinar a característica da curva de rendimento da turbina para uma queda líquida média durante a execução do ensaio, em comparação com a curva de rendimento extrapolada do modelo reduzido. E, além disso, determinar se a conjugação entre as pás e a palheta está otimizada, segundo o rendimento relativo no caso das turbinas Kaplan. A unidade é ensaiada em vários níveis de potência, e calcula-se o rendimento em cada nível. A seqüência de cálculo é a seguinte:

Primeiramente é calculada a potência mecânica do eixo da turbina pela Equação (4).

$$P_{Turbina} = \frac{P_{Gerador}}{\eta_{Gerador}} \quad (4)$$

Onde:

$P_{Turbina}$ - Potência mecânica no eixo da turbina (MW)

$P_{Gerador}$ - Potência na saída do gerador (MW)

$\eta_{Gerador}$ - Rendimento do gerador

Em seguida, calcula-se a queda líquida por Bernoulli Equação (5):

$$H_l = \frac{P_{abs1} - P_{abs2}}{\rho * g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2 * g} + \Delta Z \quad (5)$$

Onde:

H_l - Queda líquida (m)

P_{abs1} - Pressão absoluta na adução da unidade geradora (mca)

P_{abs2} -Pressão absoluta na saída do tubo de sucção (mca)

V_1 -Velocidade média da água na adução (m/s)

V_2 -Velocidade média da água na saída do tubo de sucção (m/s)

ΔZ -Diferença entre as cotas dos transmissores de pressão (m)

O rendimento hidráulico da turbina é definido pela Equação (6):

$$\eta = \frac{P_{Turbina}}{\rho * g * Q * H_l} \quad (6)$$

Onde:

$P_{Turbina}$ -Potência mecânica do eixo da turbina (W)

ρ -Densidade da água (kg/m³)

g -Aceleração da gravidade local (m/s²)

Q -Vazão turbinada (m³/s)

H_l -Queda líquida (m)

Após os cálculos e as aquisições dos dados são feitas as extrapolações para a queda líquida de referência, usando semelhança de turbomáquinas Equação (7) e (8).

$$P_1 = P_2 * \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{1,5} \quad (7)$$

P_1 =Potência na queda líquida de referência (MW)

P_2 =Potência na queda líquida média(MW)

H_1 =Altura na queda líquida de referência(m)

H_2 =Altura na queda líquida média(m)

$$Q_2 = Q_1 * \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{0,5} \quad (8)$$

Q_1 =Vazão na queda líquida de referência(m³/s)

Q_2 =Vazão na queda líquida média(m³/s)

H_1 = Altura na queda líquida de referência(m)

H_2 = Altura na queda líquida média(m)

A perda de carga no conduto é calculada conforme Equações (9) e (10):

$$H_{Bruta} = HTW - LTW \quad (9)$$

H_{bruta} - Queda Bruta

HTW – Nível de montante

LTW – Nível de jusante

$$P_{Conduto} = H_{Bruta} - H_l \quad (10)$$

$P_{Conduto}$ - Perda de carga no conduto

H_{bruta} - Queda Bruta

H_l - Queda líquida

3.5. Oscilação de eixo

A oscilação de eixo é um parâmetro muito importante no comissionamento, visto que, quando fora do patamar aceitável de projeto, pode vir a gerar uma série de efeitos danosos a unidade. A norma ISO 7919-5 *Mechanical Vibration of non-reciprocating machines – Measurements on rotating shafts and evaluation criteria* nos fornece as zonas de classificação para as oscilações de eixo. Na Figura 24, são apresentadas as classificações em relação à rotação por minuto e à oscilação de eixo.

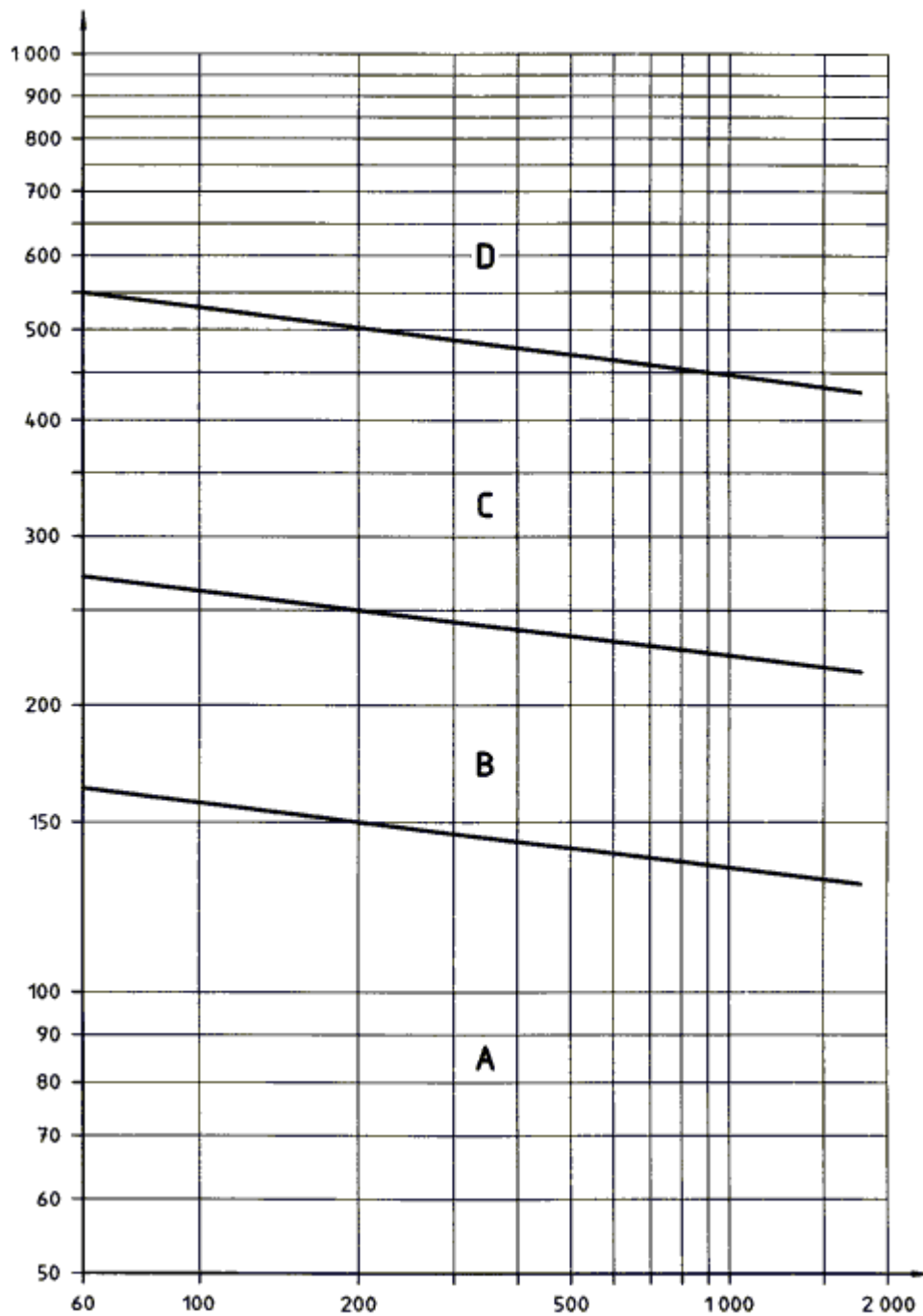


Figura 24 - Classificação ISO 7919-5

3.6. Vibrações dos mancais

As vibrações nos mancais são parâmetros importantes para que a unidade tenha um bom rendimento. Esse parâmetro é essencial para identificar possíveis problemas.

Para as medições foram utilizada as normas *ISO 10816-5 Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on non-rotating Parts*. A Tabela 2 foi

retirada da referida norma e serve de base para avaliação dos valores; porém, é válido somente para as rotações acima de 300 rpm.

Tabela 2 -Tabela de classificação norma ISO 10816-5

Zone boundary	At measurement location 1, 2, 3 and 4	
	Peak-to-peak displacement μm	R.m.s. velocity mm/s
A/B	30	1,6
B/C	50	2,5
C/D	80	4,0

4 RESULTADOS

O estudo tem como base uma PCH localizada entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, contando com duas máquinas tipo Francis de eixo horizontal e potência nominal em torno de 9,5MW. Foram realizados ensaios de maior importância na máquina número um, como: rejeição de carga, índice test e faixa operativa. Os resultados são apresentados por meio de gráficos na aquisição de dados, que recebe sinais dos sensores colocados em vários pontos da máquina.

4.1. Rejeição de carga

Nos figuras 25, 26, 27 e 28 estão os resultados dos ensaios de rejeição de carga nos patamares de 25%, 50%, 75% e 100% da carga nominal. Durante o ensaio não foi constatado nenhum ruído anormal que viesse a evidenciar algum problema.

Seguindo o projeto de transientes hidráulicos, foi possível verificar que todos os parâmetros ficaram entre os patamares aceitáveis. Notou-se que a rotação alcançou seu nível máximo em aproximadamente 145% da rotação nominal e, que o regulador de velocidade hidráulico e eletrônico, forneceu a resposta adequada para cada nível, sem sobrepujar o nível de sobrepressão da caixa espiral, que chegou ao nível de 60mca.

A pulsação de pressão do tubo de sucção ficou no nível de 6 mca, sendo que esta pulsação pode causar uma oscilação no eixo, aumentando a oscilação de potência. Também é possível analisar que a abertura do distribuidor variou entre 25% a 65%.

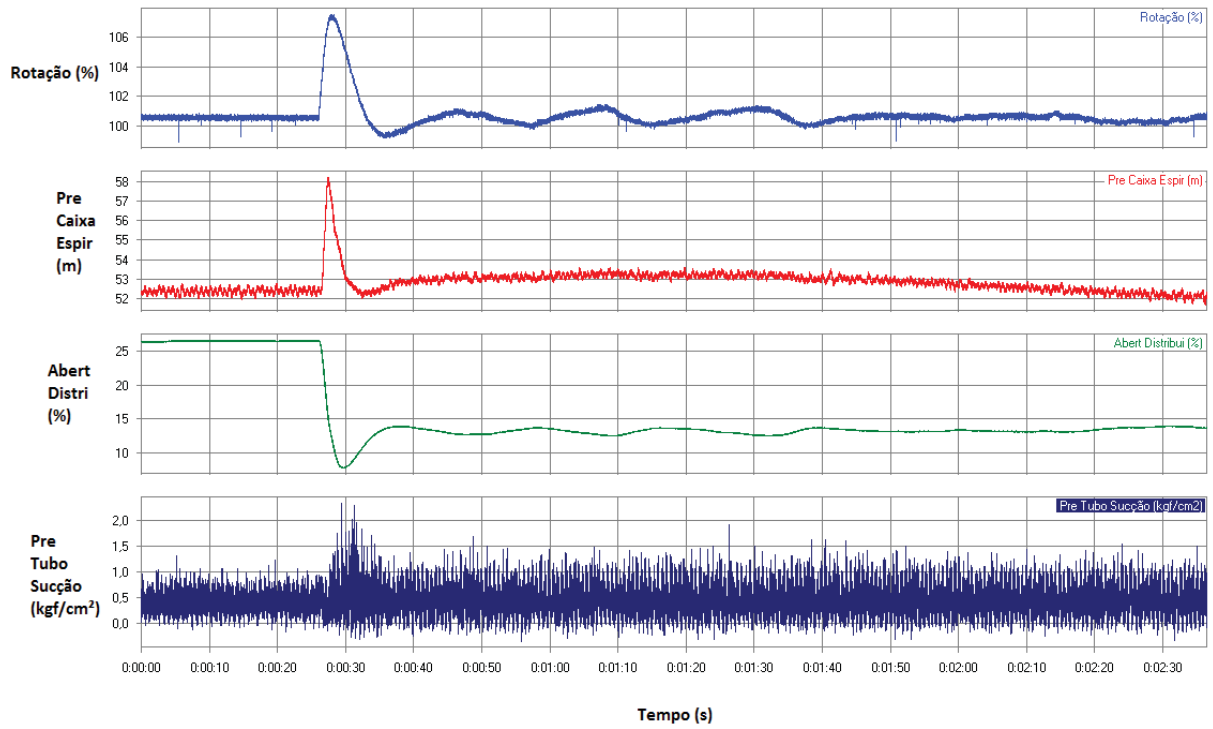


Figura 25 – Rejeição de carga a 25%

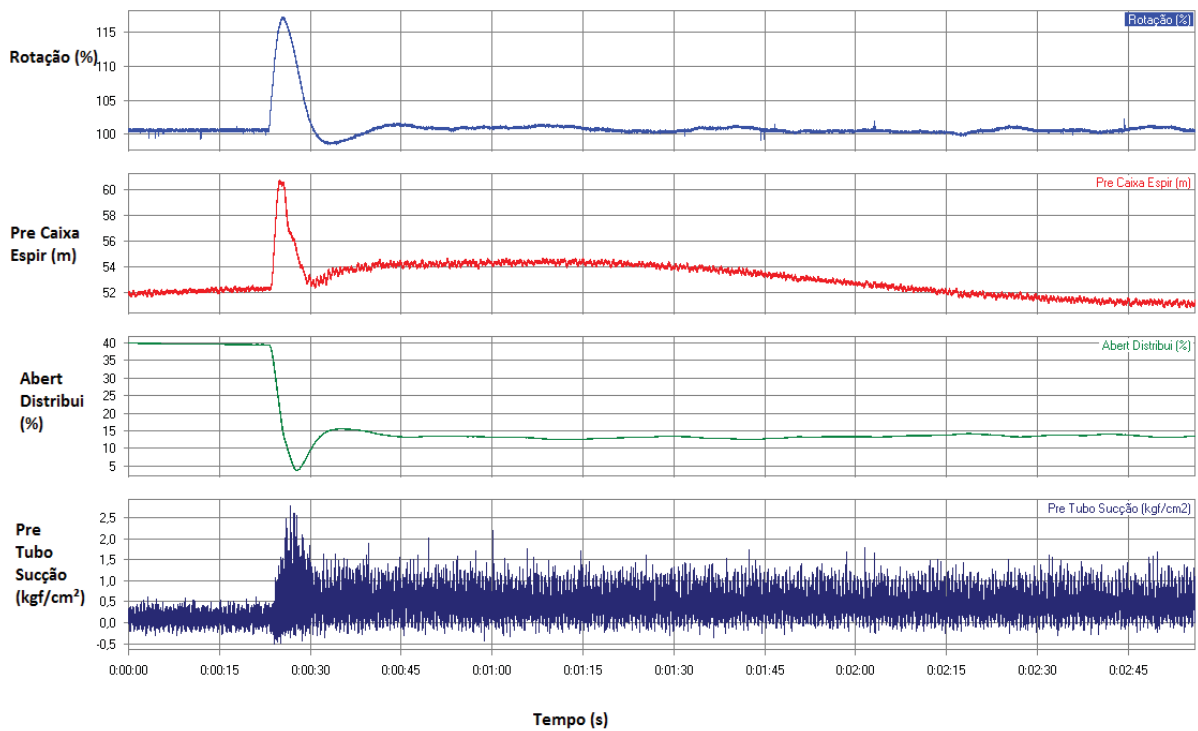


Figura 26 – Rejeição de carga a 50%

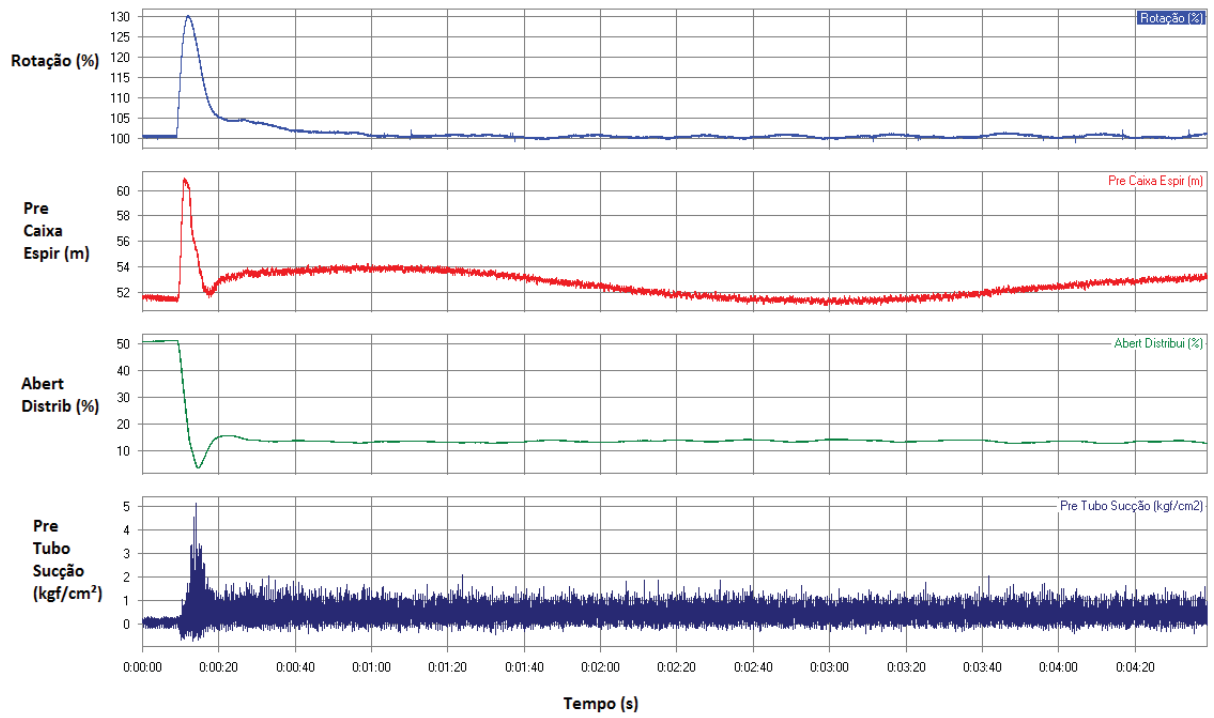


Figura 27 – Rejeição de carga a 75%

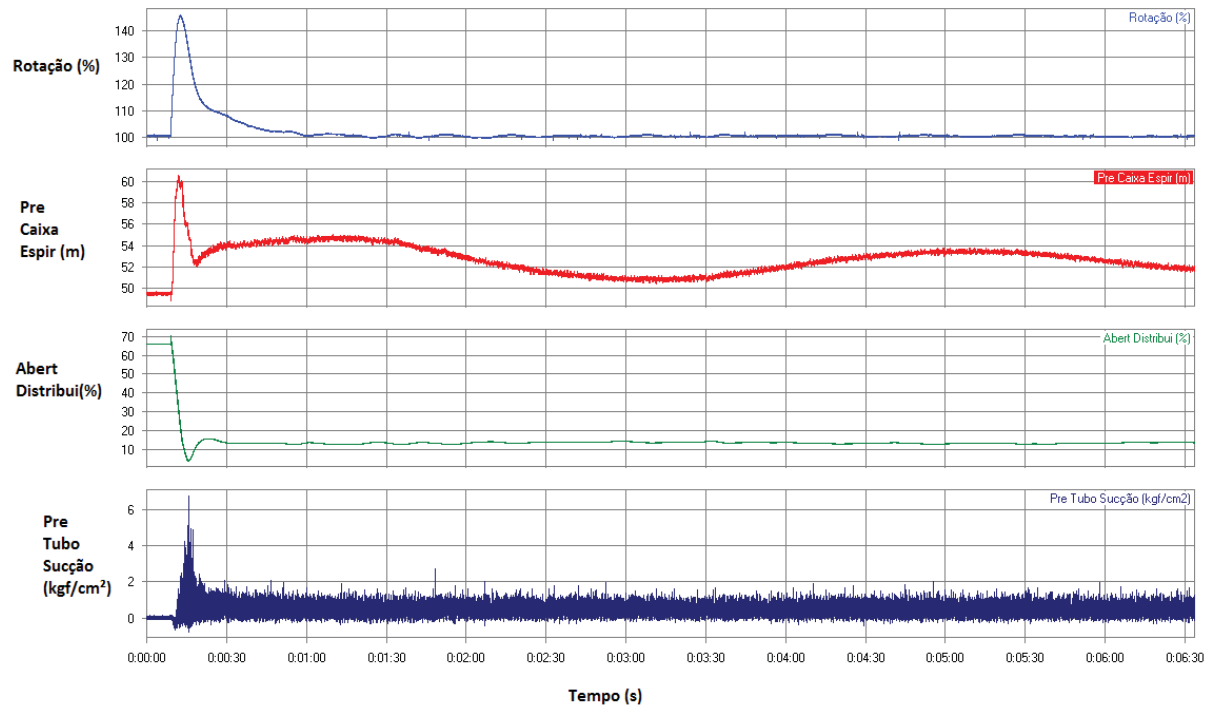


Figura 28 – Rejeição de carga a 100%

4.2. Faixa Operativa

Nesse ensaio foi realizada a medição de alguns parâmetros importantes para o melhor aproveitamento da unidade. Foram colocados proxímetros nas posições radiais e axiais do eixo da turbina (LA) e do gerador (LNA) para a medição da oscilação do eixo, e colocados acelerômetros nos mancais para a medição de vibração.

Estes ensaios são importantes para notar se há uma proximidade entre o eixo e o mancal, visto que, se há uma vibração muito alta e uma oscilação pequena, conclui-se que o eixo está muito próximo. No entanto, se há uma vibração pequena e uma oscilação alta, conclui-se que o eixo está longe do mancal.

É necessário notar a faixa ótima para ter uma menor perda de energia e danos vibracionais. Na Figura 29 observa-se a oscilação dos eixos da turbina e do gerador. Na Figura 30 são apresentadas as vibrações dos mancais guias do gerador e da turbina.

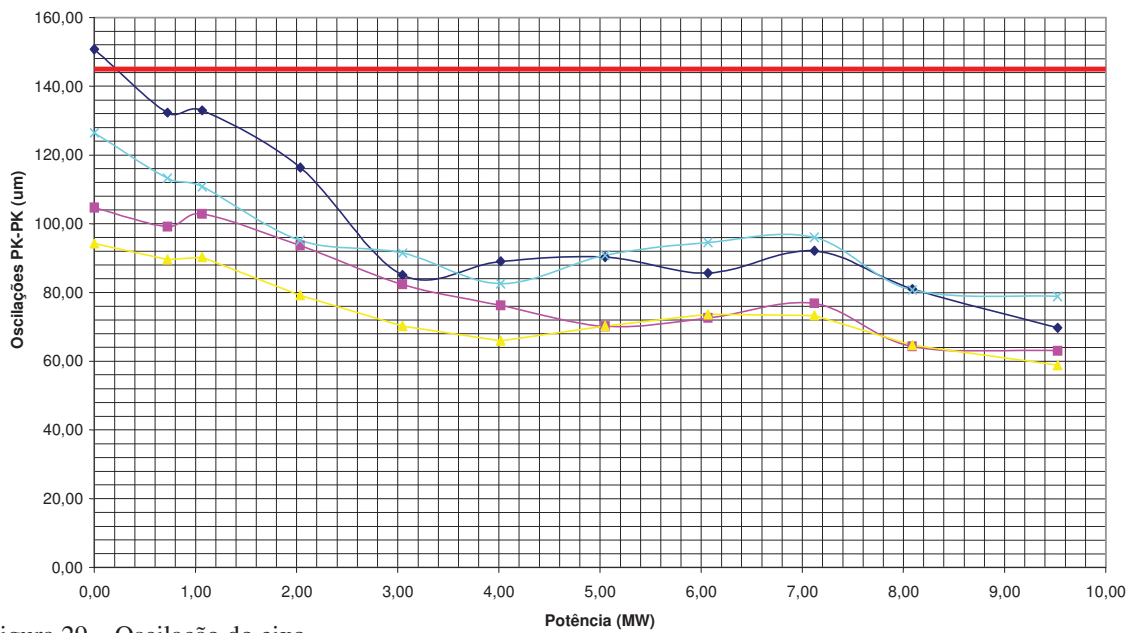
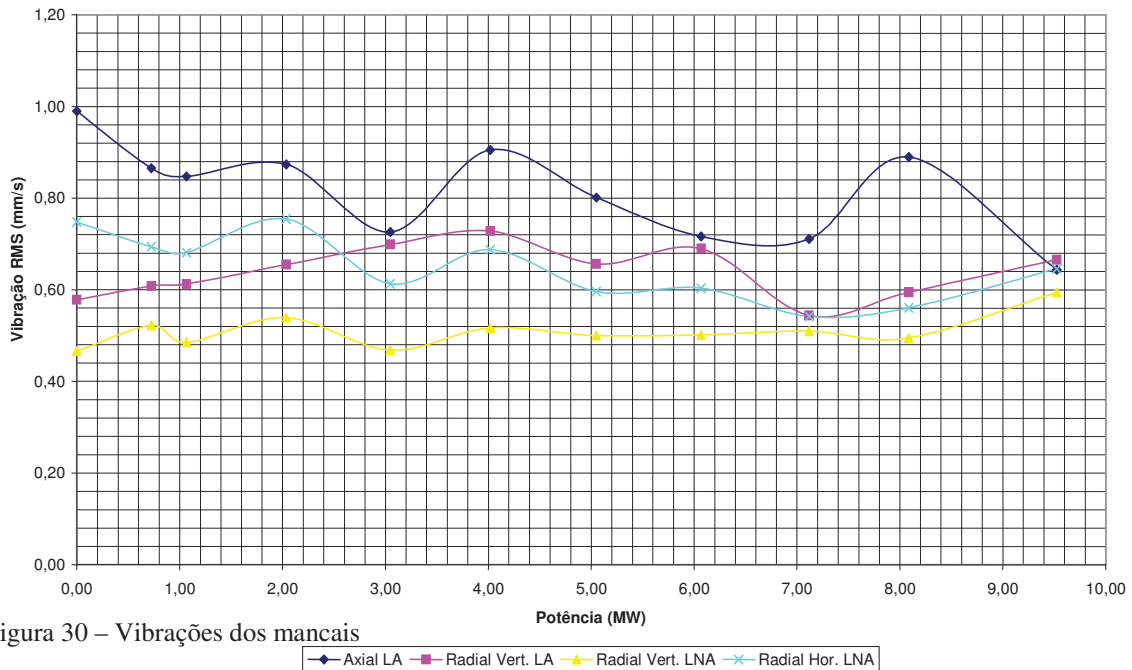


Figura 29 – Oscilação do eixo

—◆— Osc. Eixo V. LA —■— Osc. Eixo H. LA —▲— Osc. Eixo V. LNA —×— Osc. Eixo H. LNA



Nessa etapa primeiramente é colocada a unidade em vazio e excitada, e aquisitados os parâmetros de acordo com as Figuras 31, 32 e 33. Os dados aquisitados são da pressão da caixa espiral, do tubo de sucção, abertura do distribuidor e potência, como também o deslocamento do eixo na região da turbina (LA) e gerador (LNA), e a vibração dos mancais. Logo após, a unidade é sincronizada e aquisitados os mesmos dados de acordo com as Figura 34, 35 e 36. Em seguida foi colocada em alguns degraus de potência de acordo com o comissionador. Neste caso foi feito com 4MW e 9,5MW e aquisitados os mesmos parâmetros para efeito de comparação, Figuras 37, 38 e 39 no caso de 4MW, e Figuras 40, 41 e 42 na de potência máxima. Na unidade em vazio as vibrações são menores em comparação com as vibrações e oscilações obtidas com a unidade sincronizada e em seus degraus de potência. No entanto, as pressões alteram-se pouco, mas a pulsação aumentou na medida em que a potência foi aumentada.

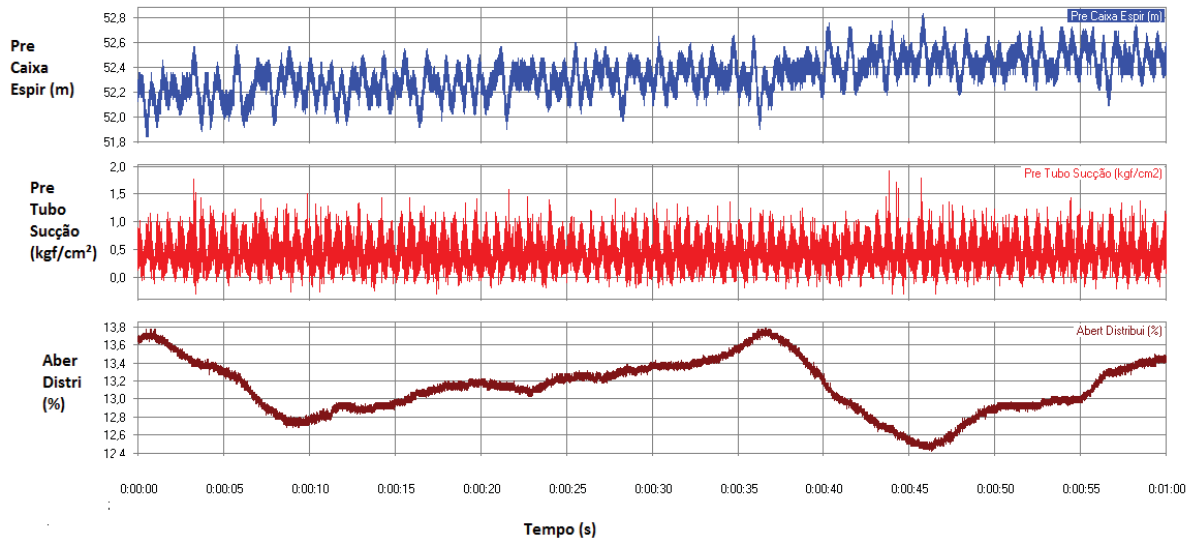


Figura 31 – Máquina em vazio excitada

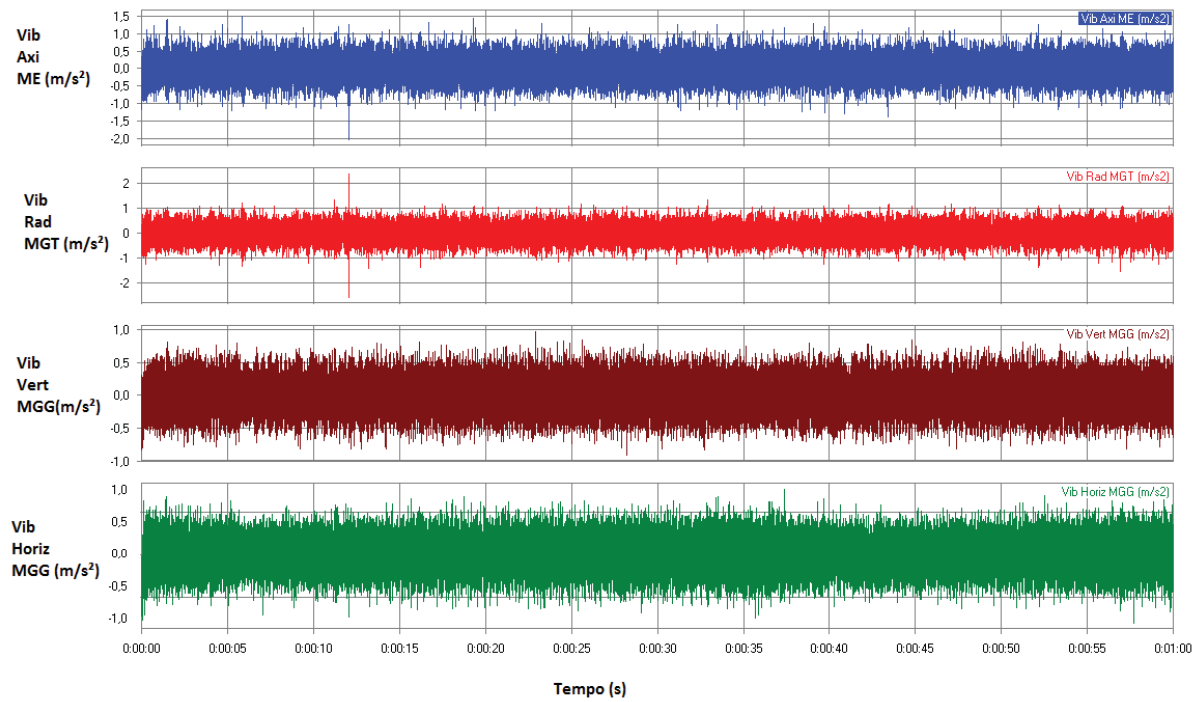


Figura 32 – Vibrações dos mancais com a máquina em vazio e excitada

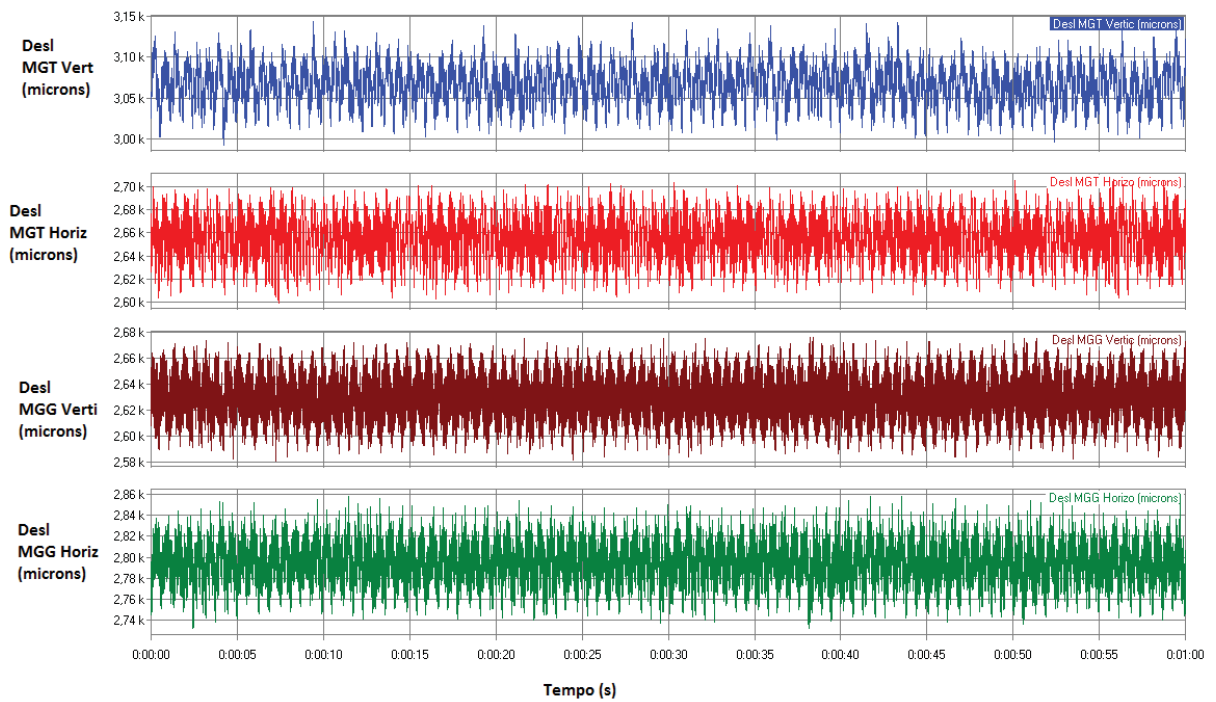


Figura 33 – Oscilação do eixo em vazio e excitada

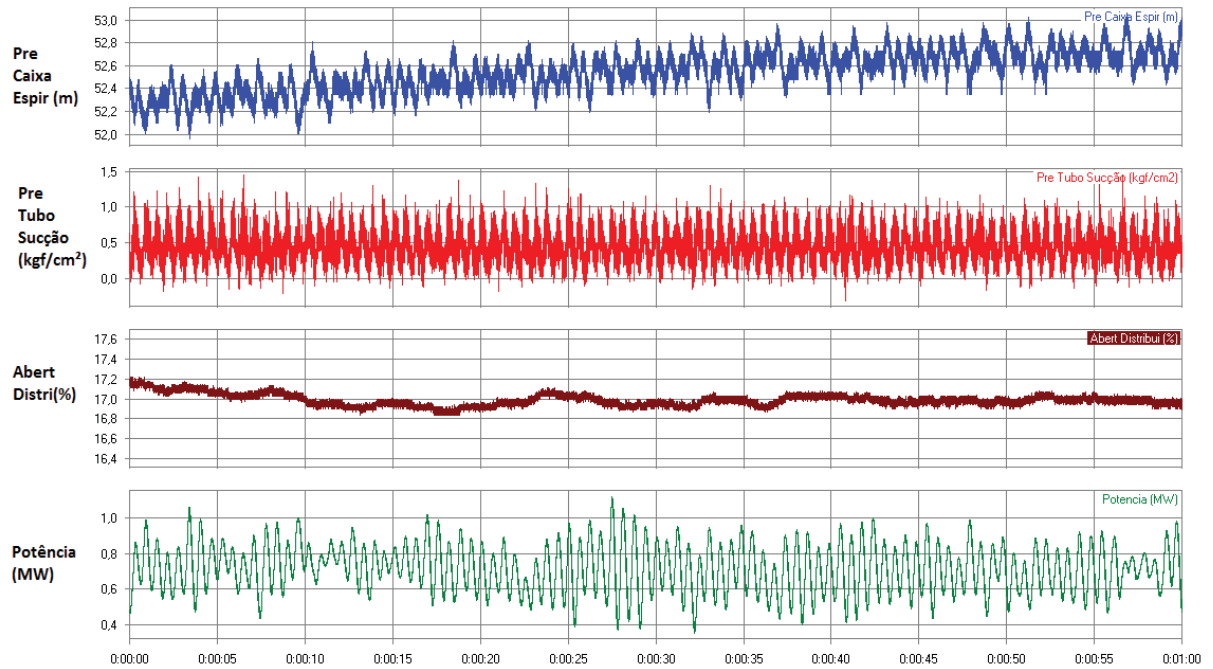


Figura 34 – Máquina sincronizada

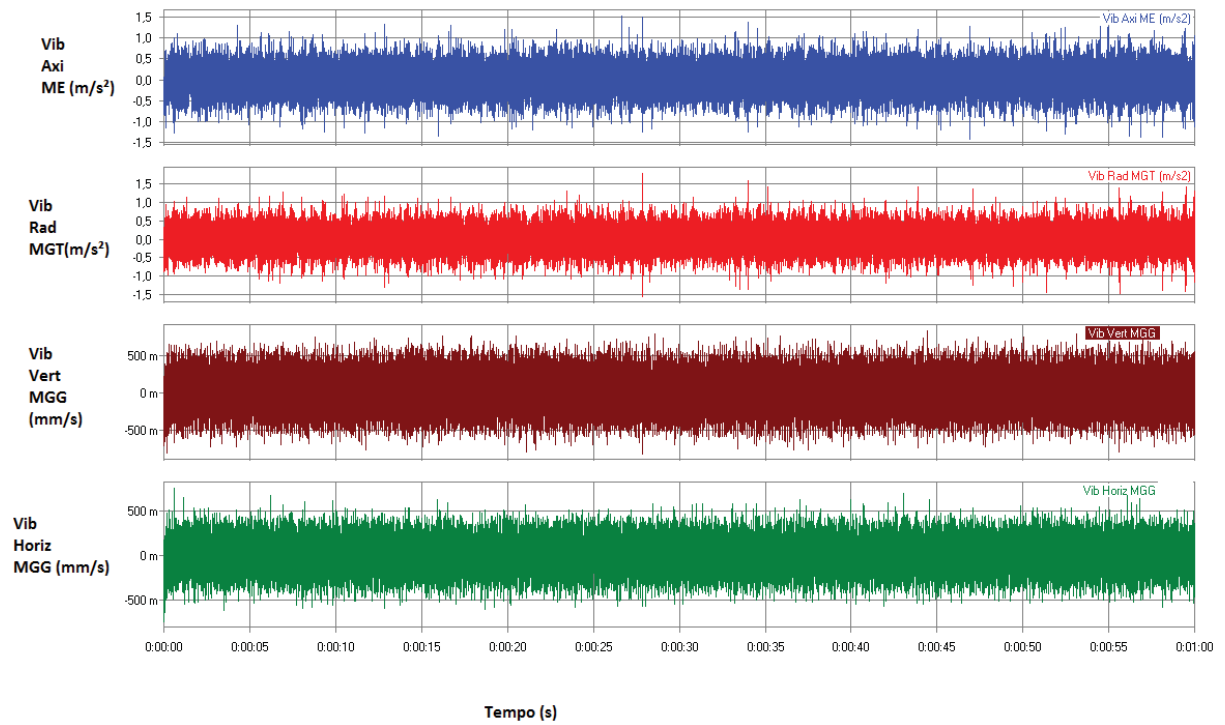


Figura 35 – Vibrações dos mancais com sincronismo

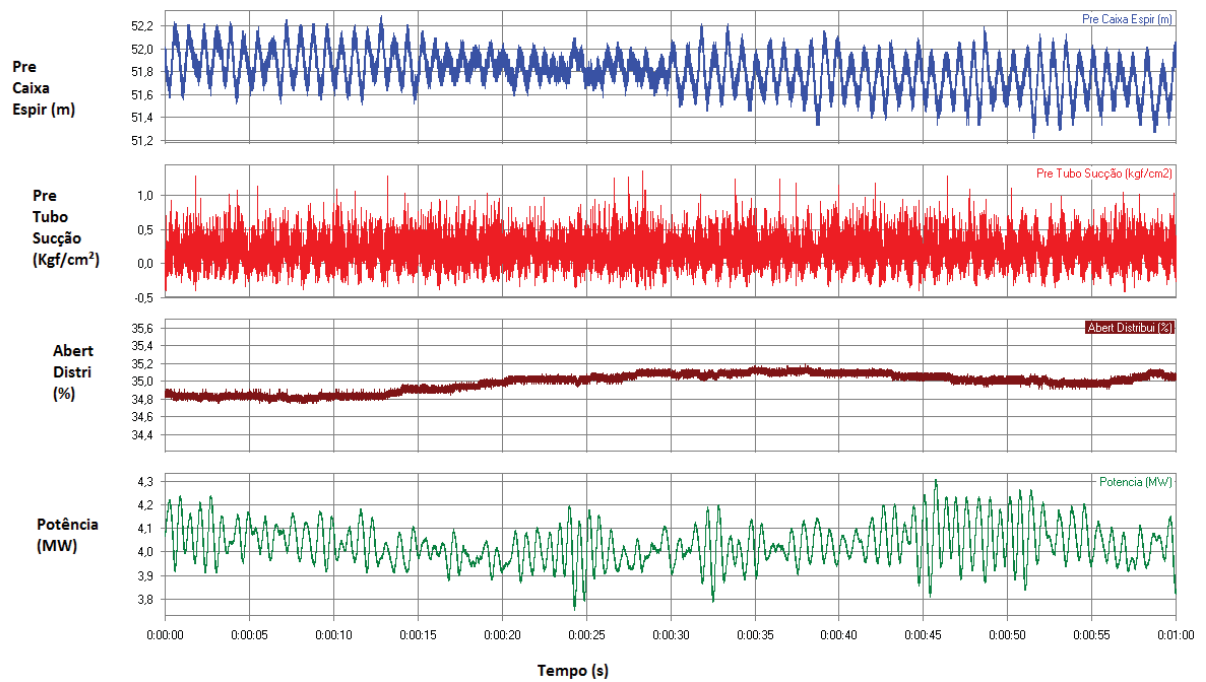


Figura 36 – Oscilação do eixo com sincronismo

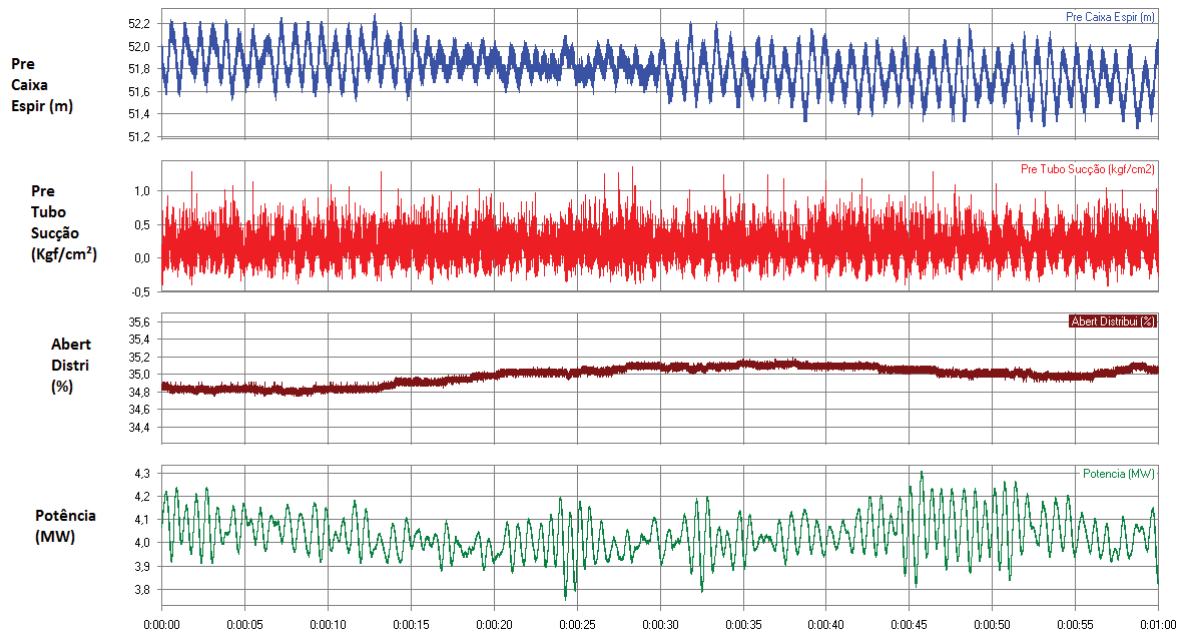


Figura 37 – Máquina sincronizada com 4MW

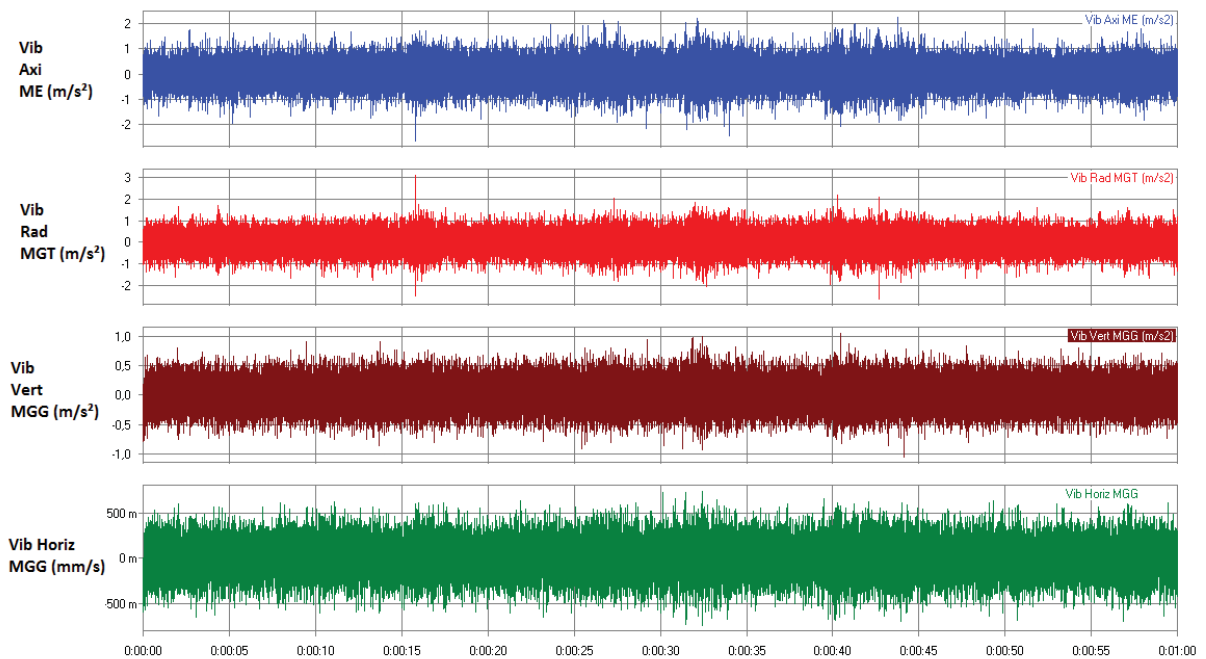


Figura 38 – Vibrações dos mancais com 4MW

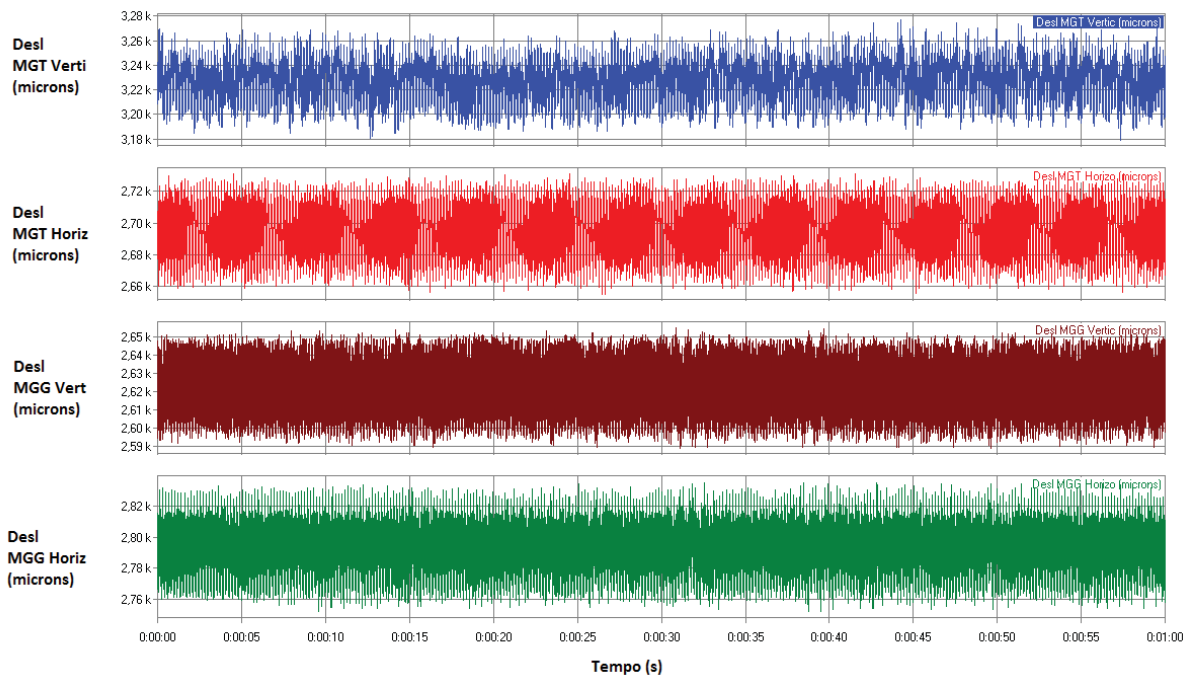


Figura 39 – Oscilação do eixo com 4MW

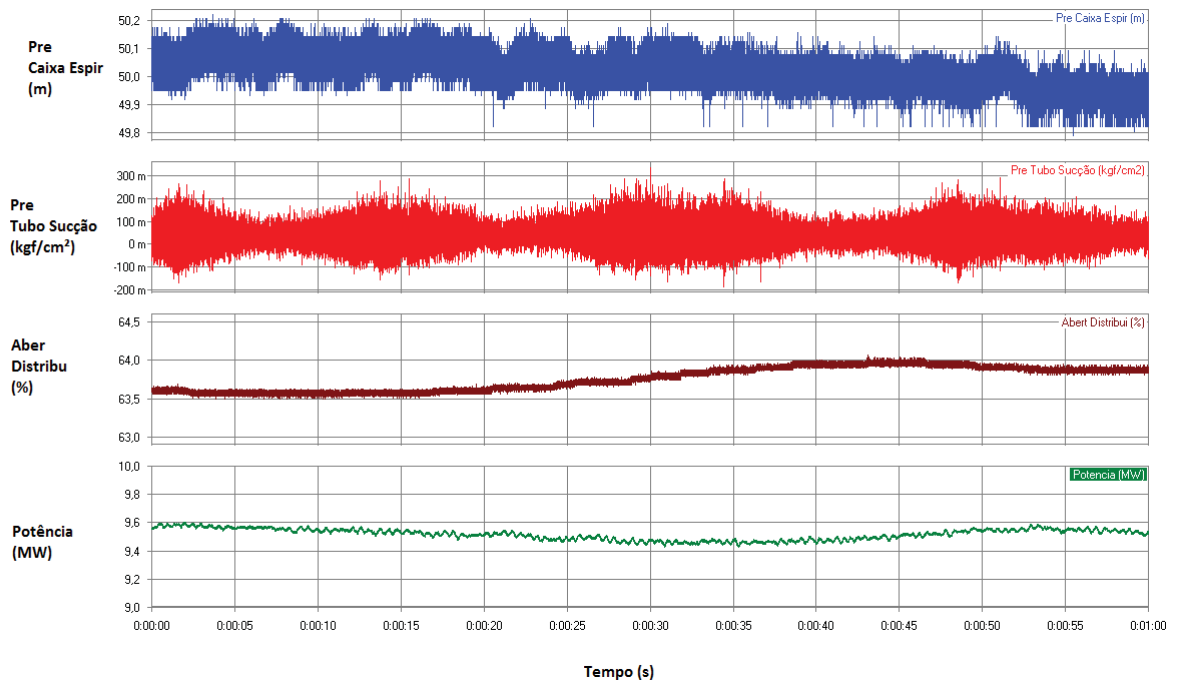


Figura 40 – Máquina sincronizada com 9,5MW

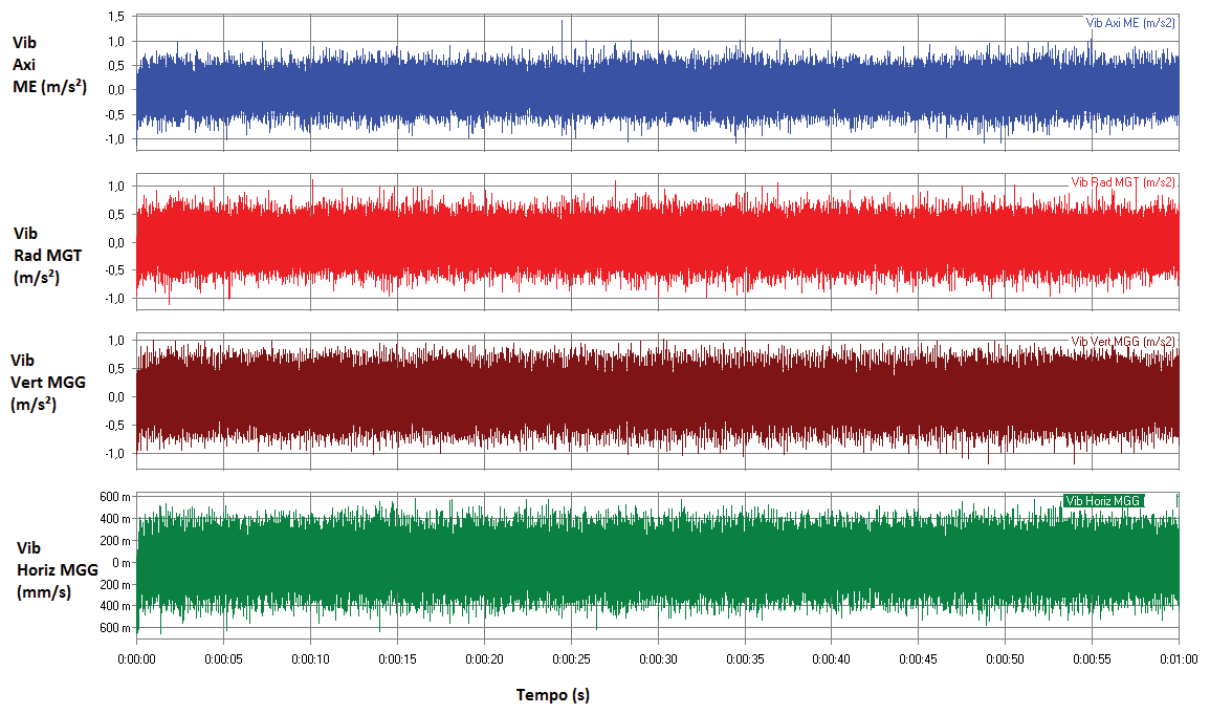


Figura 41 – Vibrações dos mancais com 9,5MW

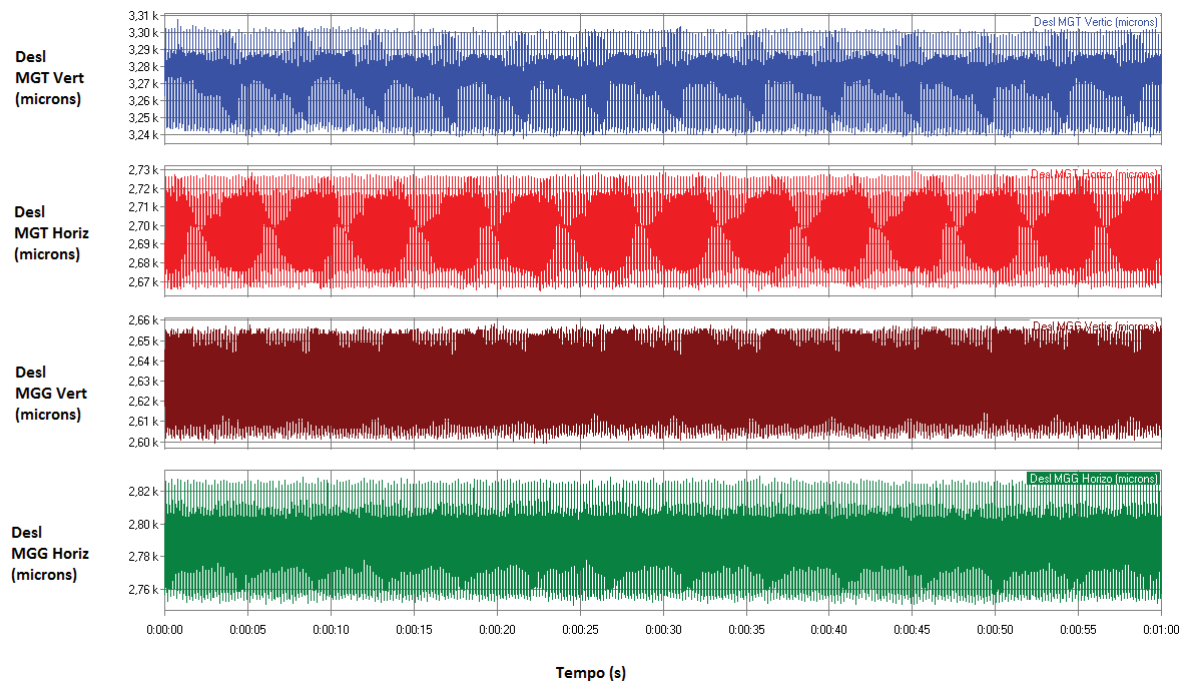


Figura 42 – Oscilação do eixo com 9,5MW

4.3. Index Test

O objetivo do índice test é obter a curva de rendimento da turbina em relação a potência, e também a perda de carga, que é obtida indiretamente por esse ensaio. Primeiramente foi requisitado a curva de rendimento do gerador Figura 43, para obter a potência da turbina. No entanto, a queda escolhida para esse ensaio depende basicamente da queda disponível no momento do ensaio e extrapolada para a queda de referência, por meio da semelhança de turbomáquinas. A Figura 45 a calibração do Winter-Kennedy e sua vazão na potência disponível, sendo que os valores foram $n = 0,47407$ e $k = 2,43$. Após isso temos na Figura 44, a perda de carga no conduto. E finalmente na Figura 46 o rendimento da turbina .

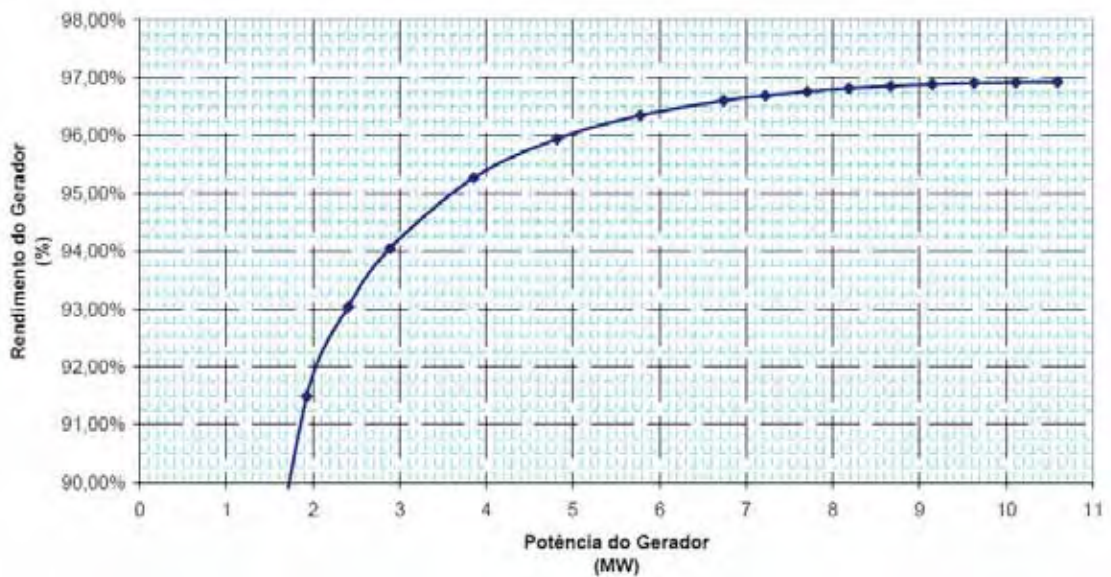


Figura 43 – Gráfico do rendimento do gerador

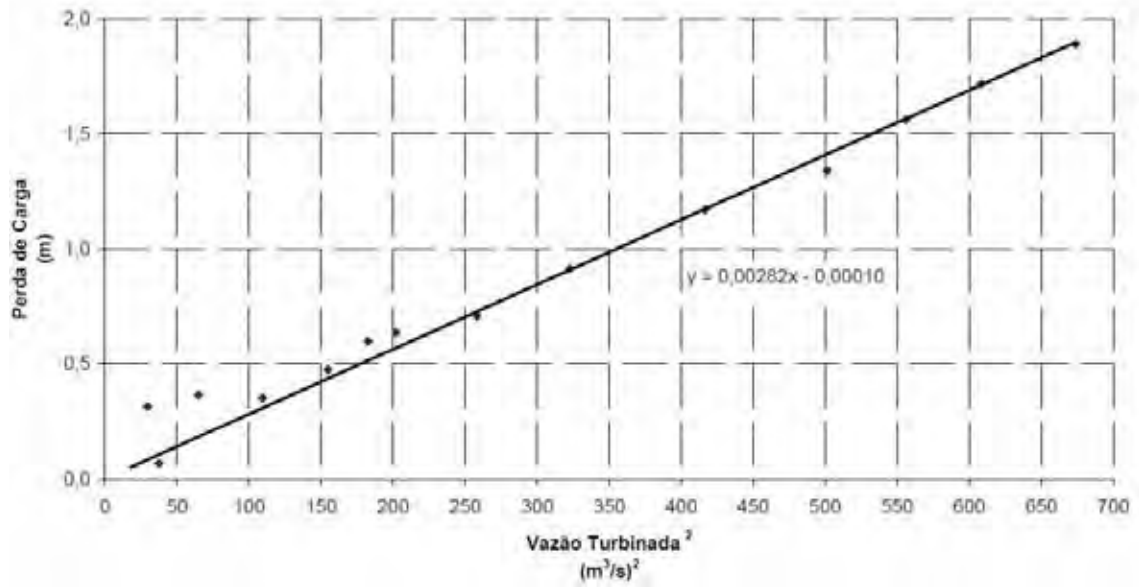


Figura 44 – Perda de carga no conduto

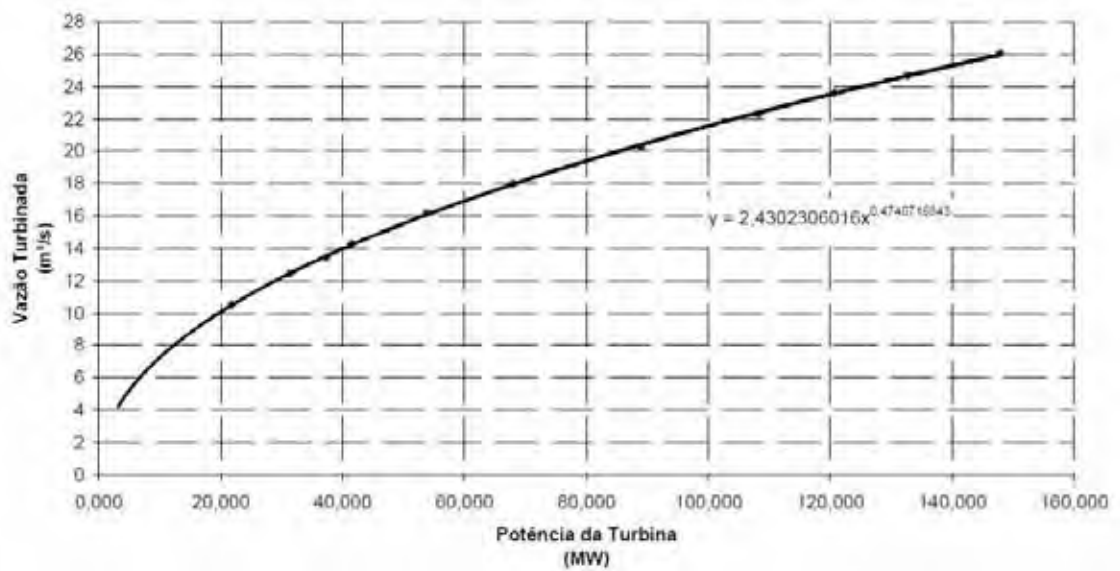


Figura 45 – Gráfico de Calibração Winter-Kennedy

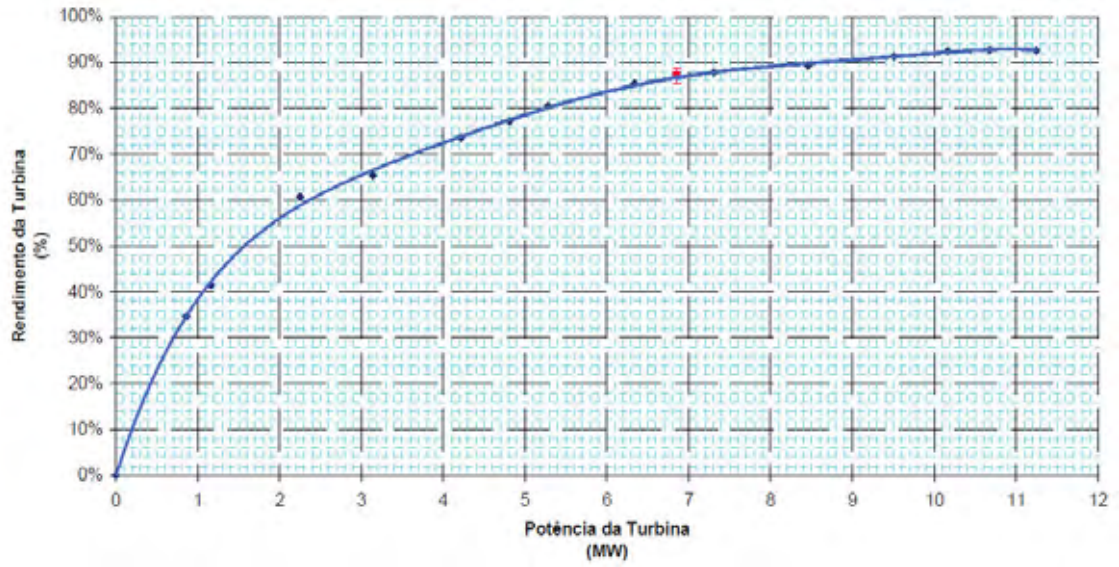


Figura 46 – Gráfico de Rendimento da Turbina

5. Conclusão

Usinas hidrelétricas requerem um investimento alto e prazos de construção relativamente longos. Ainda dependendo da potência instalada, a amortização do investimento pode levar de quinze a vinte anos; porém, é uma fonte renovável de eletricidade e sua relação custo-benefício, eficiência, flexibilidade e confiabilidade são ótimas em relação a qualquer outro tipo de geração de energia.

A operação dos sistemas elétricos depende de fontes de geração rápidas e flexíveis para atender às demandas de pico, manter os níveis de tensão do sistema e restabelecer prontamente o fornecimento após um blecaute. A energia gerada por hidrelétricas pode ser injetada no sistema elétrico mais rapidamente do que a de qualquer outra fonte energética. A capacidade das usinas de irem do zero à produção máxima, de forma rápida e previsível, as torna excepcionalmente adequadas para atender às alterações de consumo.

Por isso, os ensaios de comissionamento são extremamente importantes para as unidades, para que possam desempenhar todo tipo de manobra de maneira rápida, eficaz e com segurança.

O correto comissionamento de uma usina hidrelétrica traz muitos benefícios, como entregar a instalação conforme especificado nos documentos de projeto. Além disso, identificar os erros ou defeitos de projeto. Certificar que as instalações atendam às garantias contratuais e proporcionar um start-up sem riscos de acidentes pessoais, ambientais ou de falha em equipamentos, de modo a facilitar o início da operação.

Os ensaios realizados dão respaldo às operações comerciais, na quais são identificados e testados os sistemas de proteção e automação. Os ensaios mostrados nesse trabalho nos fornecem o real comportamento da unidade mediante as possíveis manobras que ao longo da vida útil serão executadas. O ensaio de índice test sobre o real rendimento da unidade é um parâmetro contratual, que pode vir a levar em ônus ou bônus, mediante a comprovação técnica. O ensaio de faixa operativa mostra-nos os reais níveis de oscilações e vibrações, que quando dentro dos valores especificados na norma e contrato garantem uma vida útil longa, além de preservar peças e sistemas importantes.

O ensaio de rejeição de carga é extremamente importante, visto que, ao longo da utilização possa vir a ocorrer esse tipo de manobra muitas vezes, garantindo então o sucesso da manobra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS INC.
**ANSI/IEEE Std 1207-2004 – IEEE Guide for the Application of Turbine
Governing System for Hydroelectric Generating Units, 2004.**

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS INC.
**ANSI/IEEE Std 125-2007 – IEEE Recommended Practice for Preparation of
Equipment Specifications for Speed-Governing of Hydraulic Turbines Intended
to Drive Electric Generators, 2007.**

IEC 60041 – Field Acceptance Test to Determine The Hydraulic Performance Of Hydraulic
Turbines, Storage Pumps And Pump Turbines

MACINTYRE, ARCHIBALD JOSEPH; **Máquinas Motrizes Hidráulicas**, Rio de
Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1983. 640 p.

CPFL. **Usinas Hidrelétricas** - Conceitos e Noções Básicas. 34 p.

ELETROBRÁS. **Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1982.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais
Hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em <<http://www.eletronbras.gov.br>>.
Acesso em: 14 de maio de 2011.

DE ALMEIDA, ANTONIO TADEU LYRIO; **Máquinas Elétricas**. Escola Federal de
Engenharia de Itajubá, 2000.

DE SOUZA, ZULCY; **Centrais Hidreletricas – Dimensionamento de componentes**.
Editora Edgard Blucher LTDA, Rio de Janeiro, 1992.

DE SOUZA, ZULCY; **Dimensionamento de máquinas de fluxo turbinas, bombas, ventiladores.** Editora Edgard Blucher LTDA, Rio de Janeiro, 1991.

SCHREIBER, GEIHARD PAUL; **Usinas hidrelétricas.** Editora Edgard Blucher LTDA, Rio de Janeiro, 1977.

MACINTYRE, ARCHIBALD JOSEPH; **Bombas e instalação de bombeamento,** Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1980.

KJOLLE, ARNE; **Hydropower in norway mechanical equipment,** Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2001.

DE ANDRADE, LUIS AUGUSTO; **Estudo comparativo dos métodos de medição de vazão – uma aplicação em comissionamento de turbinas hidráulicas,** Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NB 228; **Ensaio de recepção de turbinas hidráulicas,** Rio de Janeiro, 1978.

Souza, Zulcy; **As bases teóricas do modelo Winter-Kennedy para medida de vazão em máquinas de fluxo;** Laboratório Hidromecânico, EFEI, Paper 1, 1979.

Zeraib, Eduardo; **Simulador em tempo real para teste de reguladores de velocidade de turbinas hidráulicas;** Universidade de São Paulo; São Paulo, 2006.

Catálogo, VOITH HYDRO, 2011.