



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH 09  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO I**

### **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH**

#### **ANÁLISE DO EMPREGO DE TECNOLOGIAS DE ROTAÇÃO AJUSTÁVEL EM APROVEITAMENTO DE PEQUENO PORTE**

**Ricardo C. de Vasconcellos \*      Mauro K. I. Uemori      Andreia Antloga      Fábio Salomão F. Sá**

**ALSTOM HYDRO ENERGIA BRASIL LTDA**

## **RESUMO**

A geração de energia elétrica em rotação ajustável se tornou interessante por permitir ganhos energéticos adicionais em relação ao sistema convencional da operação de usinas hidrelétricas em rotação fixa. Além disso, outros benefícios podem ser obtidos em termos ambientais, com menor área de reservatório, e, em termos de sistema elétrico, com a geração de serviços auxiliares. Na turbina, os problemas em função de cavitação e de vibração por instabilidades hidráulicas podem ser reduzidos a ponto de se poder aumentar a vida útil da roda.

As tecnologias de rotação ajustável têm sido empregadas com sucesso em usinas reversíveis por serem particularmente interessantes no gerenciamento da curva de carga, possibilitando a operação com carga parcial no modo de bombeamento.

Atualmente o emprego de geradores síncronos ou assíncronos, conectados a conversores de frequência, no estator ou no rotor, permite a operação de usinas hidrelétricas em rotação ajustável fornecendo tensão com frequência constante ao sistema elétrico interligado. Graças à evolução dos dispositivos semicondutores se pode quebrar o vínculo entre a rotação mecânica do gerador e a frequência da tensão nos seus terminais, liberando a turbina para ajustar-se à rotação que permita o seu melhor desempenho de acordo com a sua curva de colina ou de rendimento.

Como outros trabalhos já identificaram que para grandes centrais o emprego destas tecnologias dependerá de uma mudança na filosofia de transmissão de energia a favor do sistema de alta tensão em corrente contínua, neste trabalho é apresentado um estudo de caso para exemplificar emprego desta solução em aproveitamento de pequeno porte. Serão analisados os benefícios adicionais passíveis de serem obtidos e verificar se eles são suficientes para cobrir os custos da eletrônica de potência embutida nos conversores e o atendimento aos requisitos especiais no projeto do gerador.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Pequenas Centrais Hidrelétricas, Geração hidrelétrica, Eficiência energética, rotação ajustável.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Este trabalho visa apresentar o resultado da análise da aplicação de tecnologias de rotação ajustável em aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte. Através de um caso exemplo serão explorados os benefícios associados à melhoria de rendimento, redução de cavitação, redução do momento de inércia e geração de serviços ancilares. Em seguida serão apresentados os parâmetros de custeio da sua implantação, para concluir se estes benefícios obtidos seriam suficientes para cobrir os custos adicionais das tecnologias empregadas no conversor e no gerador.

## 2.0 - ANÁLISE DO SISTEMA HIDRÁULICO

### 2.1 As características da turbina hidráulica empregada no estudo

A turbina utilizada no estudo é a turbina Poço, que é uma otimização da turbina Bulbo aplicável a aproveitamentos de pequeno porte. As diferenças entre elas residem na facilidade de acesso direto às partes internas da turbina Poço, assim como, a utilização de multiplicadores de velocidade e os rendimentos que não apresentam grandes perdas.

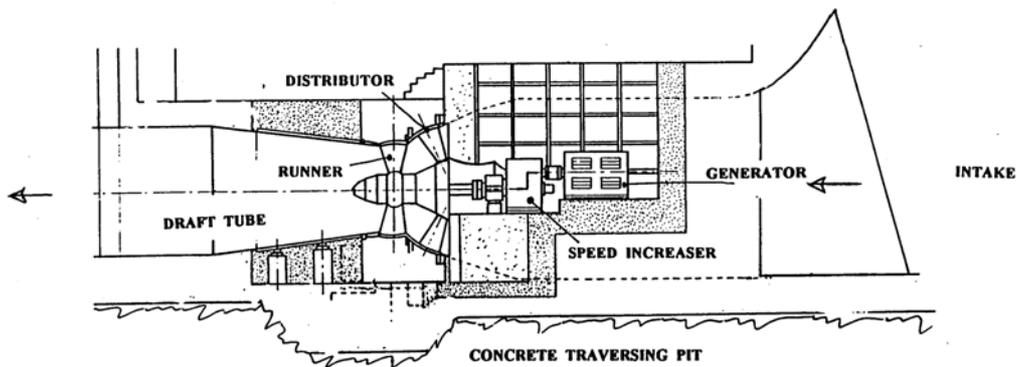


Figura 1: Corte da casa de força

### 2.2 Curva de Rendimento

Uma comparação típica entre a turbina operando em rotação ajustável e em rotação fixa, pode ser observada na curva abaixo, apresentando um ganho significativo de rendimento para as vazões mais elevadas, levando a uma maior eficiência global da usina.

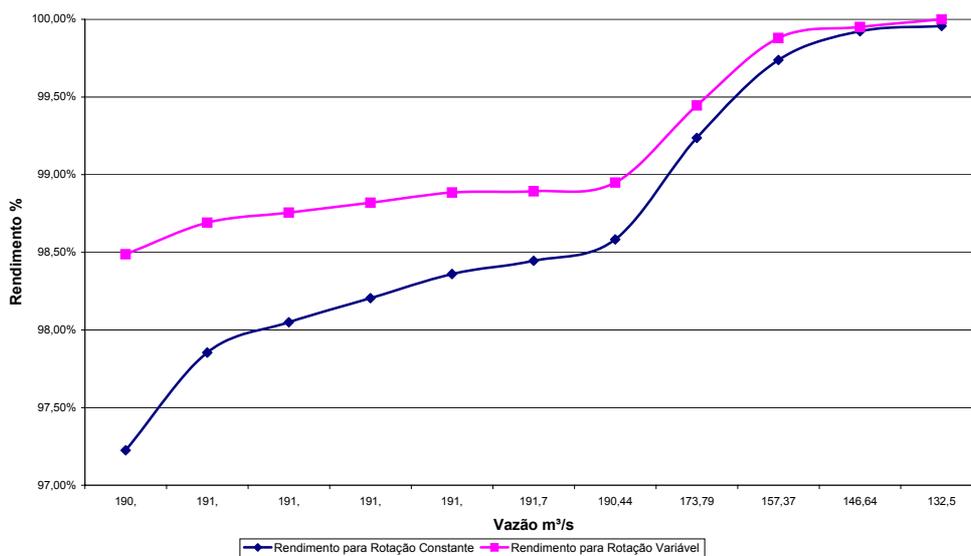


Gráfico 1: Comparação dos rendimentos relativos da turbina entre rotação ajustável e rotação fixa

### 2.3 Possibilidade de ganhos energéticos

Quando a permanência de quedas oferece faixas de operação muito amplas, a aplicação da tecnologia de rotação ajustável permite uma melhor centragem operacional de maneira que os pontos de queda mínima e/ou máxima, normalmente afastados na queda nominal, possam ser trazidos para uma região de melhores rendimentos e melhor estabilidade.

Tal condição leva a um melhor aproveitamento energético da usina. Caso a permanência operacional ocorra com maior intensidade nas quedas máximas e/ou mínimas, o ajuste de velocidade pode levar a uma sensível otimização do aproveitamento energético.

### 2.4 Análise da cavitação e instabilidades hidráulicas

Uma das principais limitações nas turbinas hidráulicas, devido a variações mais expressivas de queda, é a cavitação de entrada. Este fenômeno pode ocorrer em função da formação de vórtices na aresta de entrada que criam uma zona de baixa pressão na superfície lateral adjacente das pás. A cavitação é bastante danosa quando ocorre em quedas superiores à nominal, no lado de sucção das pás.

Quando o fenômeno ocorre nas quedas inferiores à nominal, atingindo neste caso o lado de pressão das pás, a condição é menos agressiva.

Para quedas elevadas, este fenômeno geralmente ocorre próximo ao coração (ponto de máximo rendimento) da curva de operação, o que obriga a utilizar uma velocidade síncrona que afaste os pontos de operação deste limite, levando muitas vezes a uma curva não otimizada para o melhor aproveitamento das turbinas.

Com a rotação variável, é possível corrigir (ou ajustar) a velocidade em função da queda disponível, neste caso assíncrona, mantendo a operação das turbinas sempre próxima da melhor curva de aproveitamento e suficientemente distante das cavitações de entrada, no lado de sucção, e de saída, no lado de pressão.

### 2.5 Definição da faixa de ajuste da rotação e de queda

A faixa de ajuste de rotação, em função das características do sistema elétrico associado, é da ordem de +/- 10%, o que equivale a uma faixa de ajuste de queda da ordem de +/- 20%, permitindo uma otimização tanto mais sensível quanto maiores forem as variações de queda.

### 2.6 Considerações sobre ganhos adicionais com projeto específico – Modificação da turbina

A possibilidade de ajuste da rotação pode levar a uma série de outras otimizações, dependendo de cada projeto em particular. Dentre elas, vale ressaltar as seguintes:

- Otimização do Diâmetro da Turbina, em função de um melhor ajuste dos pontos de operação.
- Melhoria dos rendimentos parciais e por conseqüência melhoria do rendimento médio ponderado
- Possibilidade de melhoria do aproveitamento energético da usina
- Diminuição do risco de cavitação de entrada
- Redução de vibração e ruído, principalmente em quedas abaixo da nominal.

### 2.7 Otimização da estabilidade de regulação

A estabilidade de regulação é função da variação de frequência durante variações de carga, o que depende basicamente da inércia mecânica das partes girantes e do tempo de manobra. Toda usina possui uma faixa permissível de variação de frequência, o que limita por sua vez a variação de carga estável dos grupos geradores.

Uma vez que o sistema de rotação variável permite uma maior faixa de variação da frequência de rotação do grupo sem causar interferência na frequência de saída, se torna possível otimizar a inércia mecânica das partes.

Numa turbina poço, como a utilizada como referência para este artigo, ou noutros tipos de turbinas de baixa queda, a inércia hidráulica a compensar com inércia mecânica a fim de se buscar maior estabilidade é mais importante que para outros tipos de turbinas, fazendo com que a possibilidade de redução oferecida pela tecnologia de rotação ajustável possa se mostrar ainda mais relevante para a viabilidade do empreendimento.

## 3.0 - ARRANJO DE GERADOR E CONVERSOR ESTÁTICO DE FREQUÊNCIA

É imprescindível que a relação existente entre rotação mecânica da turbina e a frequência do sistema elétrico seja relaxada. Hoje em dia avanços tecnológicos oriundos dos progressos da eletrônica de potência possibilitam a quebra deste vínculo. Na realidade, há basicamente uma matriz de possibilidades passíveis de serem exploradas para concepção de uma usina hidrelétrica operando em rotação ajustável. Dentre as mais utilizadas podem ser citadas as seguintes tecnologias:

- A) Para potências acima de 60 MVA e abaixo de 400 MVA resulta mais econômico o emprego de Geradores Assíncronos de Rotor bobinado alimentado por cicloconversores ou conversor do tipo GTO de 2 ou 3 estágios:
- B) Para grandes blocos de energia, acima de 1000 MVA, a serem transmitidos por grandes distâncias o arranjo da Conexão Unitária empregando a transmissão em corrente contínua é considerado uma solução natural.
- C) Para aproveitamentos de pequeno porte, abaixo de 60 MVA, concluiu-se em estudos prévios internos que a configuração de um gerador síncrono transmitindo energia para pequenas distâncias resulta mais econômica quando se emprega a Conexão Unitária associada a uma configuração de conversor “back-to-back”, como apresentada na Figura 2.

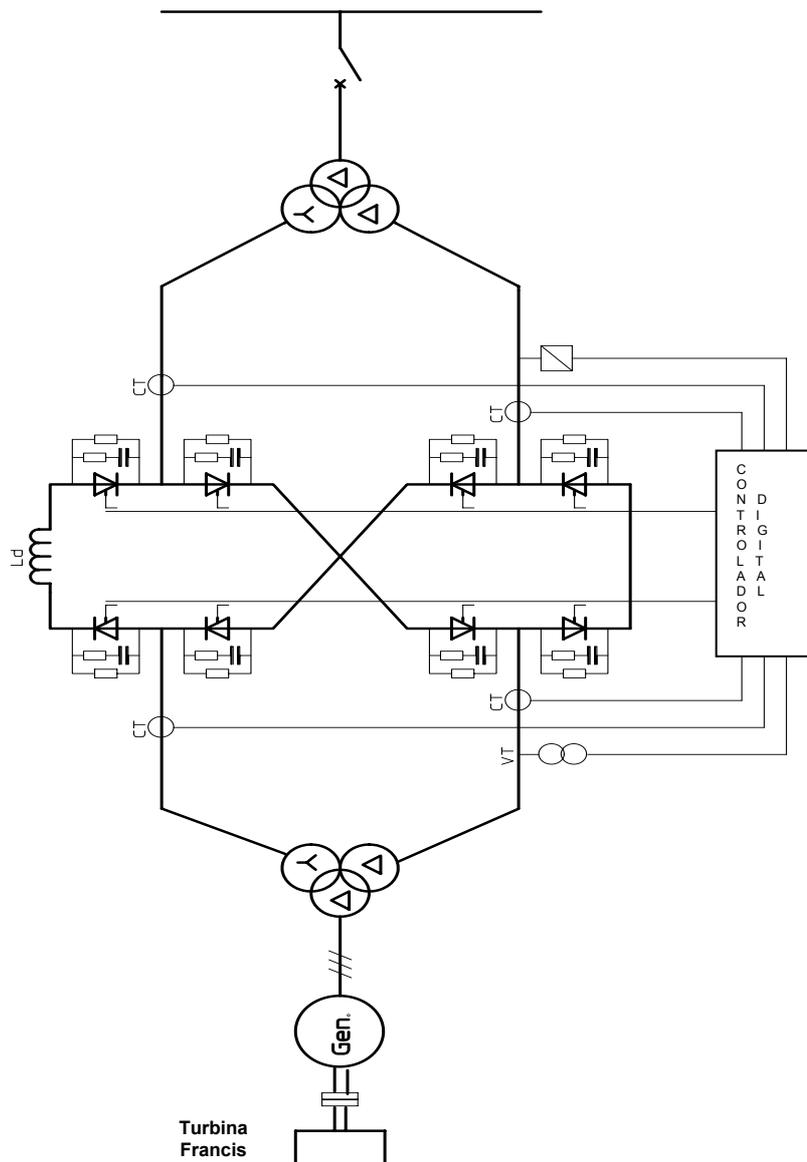


Figura 2 : Gerador Síncrono associado a um conversor em Conexão Unitária Back-to-Back

### 3.1 Gerador síncrono e conversor de frequência em conexão unitária “back-to-back”

#### 3.1.1 Dados principais do Gerador Síncrono

A partir dos dados da turbina hidráulica foi dimensionado um Gerador Síncrono com as características apresentadas na Tabela 1. O gerador poderá ter a sua rotação variando dentro dos limites declarados sem exceder os limites térmicos considerado.

Parâmetro	Unidade	Valor
Potência nominal	KVA	19300
Fator de potência nominal		0,95
Tensão nominal (fase-fase)	V	6000
Faixa de variação da tensão	%	±5
Rotação nominal	Rpm	514
Banda de variação da rotação	Rpm	462,6 a 565,4
Tensão de excitação nominal	V	140
Corrente de excitação nominal	A	590
Conexão do enrolamento estatórico		Estrela (Y)
Classe de Isolamento		F
Elevação de temperatura do estator / rotor	K	80 / 80
Efeito de inércia ( GD <sup>2</sup> )	tm <sup>2</sup>	100
Número de pólos		14
Arranjo mecânico do gerador	Eixo horizontal	7305

Tabela 1 : Dados do gerador síncrono

No projeto do gerador algumas premissas foram adotadas para tornar o seu dimensionamento otimizado, sendo as mais importantes as seguintes:

- A) A sua potência nominal foi dimensionada para a máxima rotação de 565,4 rpm, ponto que coincide com a máxima potência disponibilizada pela turbina;
- B) Não foi adotado nenhum sobredimensionamento em função dos harmônicos injetados pelo conversor, considerou-se que a reserva de 12% para operação em regime desequilibrado (sequência negativa) foi mantida e na configuração proposta ela não seria utilizada para esta finalidade.
- C) A reatância síncrona segundo eixo direto (Xd) não foi considerada como quesito para o projeto, pelo fato do conversor isolar o gerador do sistema elétrico. O ajuste do Xd ficou por conta do mínimo entreferro, tendo em conta, o aquecimento da sapata dos pólos, devido aos harmônicos de ranhura. Adicionalmente este fator proporciona significativa redução no valor da corrente de excitação e por conseguinte no custo do sistema de excitação do gerador.
- D) O GD<sup>2</sup> considerado foi aquele necessário para compensar os transitórios determinados pelas condições do circuito hidráulico e sobrepressão na tampa da turbina.
- E) A tensão nominal do gerador foi adotada como 6,0 kV. Este nível de tensão reduz os custos de fabricação do gerador, do transformador e do conversor de frequência.

#### 3.2.1 Conversor de frequência

Nesta configuração o conversor estático de frequência deverá ser dimensionado para a mesma potência do gerador, isto é, 18335 kW. O conversor apresentado na Figura 2 será de 12 pulsos, composto por duas pontes de 6 pulsos ( Ponte Gräetz), para minimizar os harmônicos de tensão gerados pelas harmônicas de correntes do lado do gerador ou do lado do sistema elétrico.

O conversor de 12 pulsos é composto por duas pontes de 6 pulsos (Pontes Gräetz) no lado do gerador e duas outras no lado do sistema elétrico. Há também um elo intermediário independente para conectar cada ponte do lado gerador com a respectiva ponte no lado do sistema elétrico e um reator no elo intermediário para alisamento da corrente.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os principais dados básicos do conversor e do reator.

Parâmetro	Unidade	Valor
Tipo da conexão das pontes		12 pulsos no lado gerador e 12 pulsos no lado sistema elétrico
Número de pontes		2 pontes no lado gerador e 2 pontes no lado sistema elétrico
Número de tiristores em paralelo		6 em série por 1 paralelo por braço – Lado gerador e sistema elétrico
Número total de tiristores		144
Tensão no lado gerador	V	6000
Tensão no lado Sistema elétrico	V	6000
Potência nominal	KW	19300
Sistema de resfriamento		Água/Água
Grau de proteção		IP54

Tabela 2: Características básicas do conversor de frequência “back-to-back”

Parâmetro	Unidade	Valor
Tipo do reator		Núcleo a ar
Indutância	mH	2
Corrente nominal	A	3000
Elevação de temperatura	K	80
Enrolamento		Cobre

Tabela 3: Características básicas do reator de alisamento da forma de onda da corrente

### 3.2.2 Transformadores

O conversor para ser de 12 pulsos deve ser alimentado por um transformador que possui dois enrolamentos secundários: um ligado em estrela e o outro em triângulo. Este transformador tem o seu primário conectado ao gerador síncrono.

De fato, com os dois enrolamentos secundários defasados de 30° elétricos, os harmônicos de ordem 5, 7, 17, 19, etc são fortemente reduzidos. Lembrando que os harmônicos de ordem 11, 13, 23, 25, existirão sempre.

Igualmente na saída este conversor alimenta o sistema elétrico através de outro transformador, cujas características em termos de quantidade de enrolamentos e defasagem entre eles são iguais, possibilitando a redução dos harmônicos citados no parágrafo anterior. O primário deste transformador está conectado ao sistema elétrico.

A Tabela 4 apresenta os dados principais dos transformadores aplicados nesta configuração, os quais terão como acessórios as suas buchas, reservatório de óleo, relé do tipo Buchholz, termômetro, termostato. Trocadores de calor e bomba.

Parâmetro	Unidade	Transformador abaixador	Transformador elevador
Norma		IEC 76	IEC 76
Tipo		Refrigerador a ar	Refrigerador a ar
Potência nominal	KVA	22000	22000
Tensão no primário	V	6000±5%	13800±5%
Tensão no secundário	V	2 x 6000 V	2 x 6000 V
Tensão de curto-circuito	%	13	12
Ligação dos enrolamentos		Dy1d0	Dyn1d0
Resfriamento		ODWF	ODWF
Classe de isolamento		F	F
Elevação de temperatura	K	65	65

Tabela 4: Características principais dos transformadores

### 3.2.3 Sistema de Controle

A configuração proposta se completa com um sistema de controle e regulação baseado em microprocessadores digitais. Este sistema se comunica através de saídas digitais e analógicas com o regulador de velocidade, o sistema de excitação do gerador e com o conversor. Um programa computacional específico é utilizado para gerenciar as tarefas deste controlador, de acordo com as características operativas da usina, da altura de queda d'água e da vazão turbinada. A maior especificidade deste equipamento é selecionar de forma inteligente a rotação que proporcione o maior rendimento.

### 3.2.4 O custo de implantação da tecnologia proposta

Uma forma de verificar os benefícios passíveis de serem obtidos com o emprego de tecnologias de rotação ajustável em aproveitamentos do porte deste exemplo seria verificar os custos adicionais que esta tecnologia implica.

As diferenças básicas entre o esquema da operação em rotação fixa e o proposto são o impacto do relaxamento de parâmetros ( $V$ ,  $X_d$ ,  $I_{exc}$ ,  $GD^2$ ), a inserção dos transformadores, conversor e reator. A Tabela 5 apresenta o custo referencial destas diferenças.

Componente	Custo em pu
Custo do gerador e do transformador elevador	1,0 pu
Impacto do relaxamento de parâmetros do gerador	-0,2 pu ( redução)
Conversor de freqüência	1,3 pu
Total do acréscimo	1,1 pu

Tabela 5: Custos da tecnologia de rotação ajustável aplicada

## 4.0 - AS VANTAGENS DA OPERAÇÃO EM ROTAÇÃO AJUSTÁVEL PARA O SISTEMA ELÉTRICO

O emprego de tecnologias de rotação ajustável agrega benefícios importantes, tanto para a usina, maior rendimento, como para a operação do sistema elétrico. Para o sistema elétrico podem-se citar as seguintes vantagens da aplicação de tecnologias de rotação ajustável:

- A) Contribuição para a estabilidade do sistema elétrico durante transitórios com queda de tensão brusca. Através do conversor de freqüência é possível controlar o ângulo interno de fase, através de injeção instantânea de reativos. Este benefício se assemelha com a função do PSS (Estabilizador de Potência do Sistema). Como não há ocorrência de oscilação de corrente estatórica e nem de torque, esta vantagem sobressai na comparação com uma usina convencional.
- B) O conversor poderá ser utilizado para abastecer a usina quando os geradores não estão operando.
- C) Controle de potência reativa no ponto de interconexão com a rede, de forma a fornecer ou absorver potência reativa com tempo de ação curto. Este benefício equivale ao da operação do gerador síncrono como compensador de potência reativa.
- D) Possibilidade de injeção instantânea de potência ativa armazenada nas massas rotativas redução da rotação. Este benefício pode implicar redução da necessidade de reserva girante de máquinas, tipo de controle de segunda ordem utilizado pelos sistemas elétricos interligados, para correção da freqüência do sistema.

Estes benefícios, gerados dentro da usina e que serão utilizados pelo sistema elétrico, portanto fora dela, são denominados serviços ancilares. O seu valor precisa ser conhecido para possibilitar uma melhor análise de custo-benefício em cada caso.

## 5.0 - A ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO

A premissa para aplicação de tecnologias de rotação ajustável adotada é a de que sua viabilidade implicaria conhecer os custos adicionais do emprego do conversor e acessórios e confrontá-los com os ganhos energéticos advindos do novo modo operacional da turbina. Como se pode observar na Tabela 5, os custos adicionais da nova tecnologia de 1,1 pu deveriam ser pagos com os ganhos energéticos.

Neste caso em particular, os ganhos energéticos foram apenas suficientes para compensar as perdas internas no conversor, contudo, é possível obter-se ganhos superiores para aproveitamentos com maior variação de quedas.

## 6.0 - A CONCLUSÃO

O emprego de tecnologias de rotação ajustável em aproveitamento de pequeno porte é fortemente dependente dos ganhos energéticos passíveis de serem obtidos com o novo modo operativo da turbina. Através deste caso exemplo, foi possível observar que esta solução seria interessante tecnicamente, uma vez que se pode vislumbrar menor nível de cavitação na faixa de queda estudada, mas sem oferecer um ganho financeiro. Em termos elétricos a tecnologia permitiria geração de serviços ancilares para o sistema interligado.

Quando o aproveitamento se mostrar mais atrativo financeiramente, este poderá ser feito da forma mais econômica através do emprego de conversores de frequência arrançados na configuração "back-to-back". O emprego de geradores assíncronos de rotor bobinado com conversores do tipo GTO poderia implicar em custos ainda maiores, estimados em torno de 0,5 pu, com relação à tecnologia proposta.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] HUTAREW, A. Converter application for mini hydro generation. International Water Power & Dam Construction, v. 43, n. 5, p. 17-19, May, 1991
- [02] KITA, E. et al. A 400 MW adjustable speed pumped-storage system. International Water Power & Dam Construction, v. 43, n. 11, p. 37-9, Nov. 1991
- [03] TANAKA, H. An 82 MW variable speed pumped storage system. International Water Power & Dam Construction, V. 43, n. 11, p.25-6, Nov. 1991
- [04] MARINO, J. et LOPEZ, A. ABB variable speed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant. ABB Review 3, February 1993
- [05] GISCH, W.B. et al. An adjustable speed synchronous machine for hydro power application. IEEE Transaction, Vol. PAS-100, p. 2171, May, 1981
- [06] TERENS, D. L.; SCHAFFER, R. Variable Speed in hydro power generation utilizing static frequency converters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROPOWER WATERPOWER, Nashville, 1993.
- [07] REIS, LINEU BELICO DOS. Usinas hidrelétricas operando em rotação ajustável. Novas premissas para o planejamento energético. EPUSP, Tese Livre docência, 1995
- [08] REIS, L.B. et al. Study of the application of HVDC variable speed unit connected generation to hydro development in the Brazilian Amazon Region. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON HVDC AND FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM, Wellington, 1993. Papers presented, Wellington. CIGETANSPOWER, 1993. P.51.1.-7.
- [09] ARRILAGA, J. et al. Direct connection of generators to HVDC converters: main characteristics and comparative advantages. Joint work Group 11/14-09, HVDC UNIT CONNECTEC GENERATORS.
- [10] Power systems harmonics. An overview. IEEE Transactions on PAS vol. 102, August, 1983.
- [11] KLOSS, ALBERT. Harmonics in power systems with converters ABB Review, April 1991
- [12] SAIDEL, M.A.; REIS, L.B. A operação de usinas hidrelétricas em rotação ajustável: Perspectivas de melhor integração ambiental do aproveitamento. XIV SNPTEE, Belém, Brasil, 1997.
- [13] SCHAFFER, D.; SIMOND, J.; Adjustable speed asynchronous machine in hydro power plants and its advantage for the electric grid stability, Switzerland, 1997.