Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

BT/PEA/9508

# Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético

Marco Antonio Saidel
Lineu Belico dos Reis

São Paulo - 1995

Saidel, Marco Antonio
Usinas hidrelétricas em rotação ajustável : novas premissas para o planejamento energético / M.A. Saidel, L.B. dos Reis. -- São Paulo : EPUSP, 1995.
15p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/9508)

1. Geração (Energia elétrica) 2. Planejamento elétrico I. Reis, Lineu Belico dos II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

CDD 621.312
333.914

# USINAS HIDRELÉTRICAS EM ROTAÇÃO AJUSTÁVEL: NOVAS PREMISSAS PARA O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

**Autores : Marco Antonio Saidel**

**Lineu Belico dos Reis**

## 1. INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas, quando supridoras de um sistema interligado, devem atender padrões de qualidade de freqüência e de tensão que garantam o atendimento das cargas instaladas e atendam as características que permitam sua interligação à malha do sistema elétrico.

A necessidade de um valor fixo de freqüência impõe que as turbinas hidráulicas, mecanicamente acopladas ao eixos dos geradores, operem com rotação fixa.

Quando uma turbina encontra-se em operação real as condições físicas não reproduzem as de projeto durante todo o tempo, apenas a rotação deve se manter invariável. Assim, a altura de queda d'água varia em função das características topográficas do reservatório e do regime de vazões afluentes e defluentes, podendo levar a turbina a permanecer por longos períodos fora da região de máximo rendimento. Quanto maior o período em operação fora da região de máximo rendimento maior será a queda na eficiência do aproveitamento.

A operação do conjunto turbina-gerador em regime de rotação ajustável permite que em cada condição operacional a rotação seja escolhida em função da altura de queda existente e da vazão disponível ou desejável. Este ajuste garante a operação sempre com o máximo rendimento possível, como será mostrado a seguir.

A evolução tecnológica da eletrônica de potência, nos últimos 20 anos, que permitiu ampliar a potência instalada em sistemas de transmissão CCAT dos quase 5 GW em 1970 para aproximadamente 50 GW em 1994, possibilita hoje, a fabricação de componentes semicondutores com crescente capacidade de corrente e suportabilidade a tensões, viabilizando a produção de dispositivos e equipamentos capazes de realizar o acoplamento entre subsistemas de diferentes freqüência, permitindo a quebra de vínculo entre a freqüência de geração e a rotação da turbina.

Este acoplamento pode ser viabilizado por um elo de transmissão em corrente contínua, por um sistema back-to-back, ou, ainda, por arranjos com conversores estáticos de freqüência.

Este artigo trata da operação de usinas hidrelétricas em rotação ajustável, abordando os seguintes aspectos: a) como a variação de rotação pode influenciar o desempenho do sistema; b) quais os meios de quebrar os vínculos entre a freqüência de geração e a rotação da turbina; c) a perspectiva de maior eficiência e menores impactos ambientais devido a operação em rotação ajustável, apresentando resultados de simulação para aproveitamentos existentes ou planejados.

## 2. OPERAÇÃO EM ROTAÇÃO AJUSTÁVEL

Nos sistemas tradicionais, operando com fortes requisitos de tensão e freqüência, com a turbina em rotação fixa, o valor da rotação síncrona é dado pela expressão:

$$N = \frac{f}{p} \times 60 \qquad (1)$$

Nesta expressão, $N$ representa a rotação nominal do gerador acionado pela turbina em rpm, $f$ representa a freqüência do sistema em Hz, e $p$ o número de pares de pólos do gerador.

Uma turbina hidráulica, usualmente, é projetada para operar sob uma certa altura de queda d'água (denominada de projeto - ***Hp***), com rotação ***Np*** definida, produzindo a potência ***Pp***, correspondente a vazão ***Qp***. Nestas condições, espera-se que a turbina encontre-se no ponto de máximo rendimento, como mostra a figura 1.Variações na altura de queda ou no regime de vazões, devido a sazonalidades próprias do aproveitamento, também são levadas em consideração no projeto da turbina. Tais condicionantes, para um dado projeto de turbina, são considerados visando maximizar a energia gerada, mas podem representar uma redução do valor do rendimento máximo possível.

Porém, com a turbina em funcionamento, as condições de operação podem não reproduzir as de projeto durante todo o tempo. Apenas a rotação deve ser constante. O nível d'água a montante e a jusante variam, a potência a ser extraída da usina também pode variar, em função de requisitos do sistema elétrico, ou pela própria sazonalidade do regime de vazões. Assim, o ponto de operação da turbina pode afastar-se do ponto de máximo rendimento, por longos períodos.

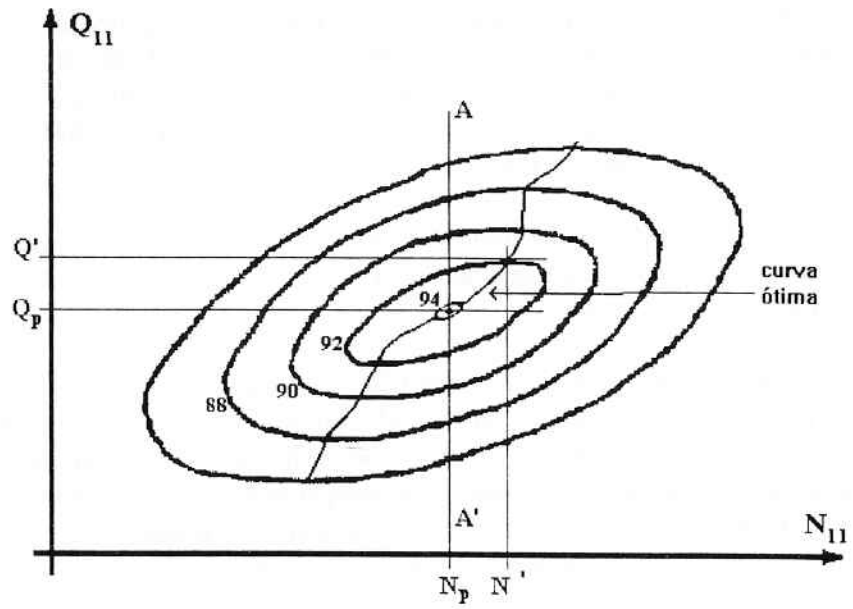



Figura - 1 - Curvas de colina da turbina

A figura 2, para uma turbina Francis, ilustra seu campo de operação e como a eficiência pode ser influenciada pela altura de queda e pela vazão.

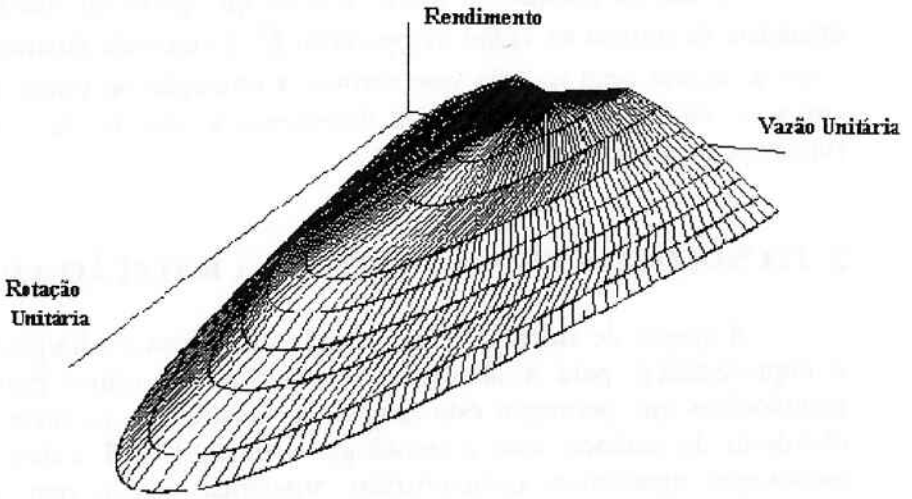



Figura 2 - Características operacionais da turbina

O princípio conceitual da operação em rotação ajustável consiste em escolher a rotação da turbina, em função da altura de queda d'água existente, visando operar no ponto de maior rendimento possível. Esta escolha tem como condicionante a potência a ser extraída do aproveitamento. A figura 1, com curvas de mesmo rendimento, ilustra o princípio de operação em rotação ajustável.

Por exemplo, vamos considerar a turbina operando no ponto $(Q_p, N_p)$ em rotação fixa. Este ponto de operação corresponde a altura de queda $H_p$, relacionada com a rotação $N_p$, pela expressão:

$$N_{11} = \frac{N_p}{\sqrt{H_p}} \tag{2}$$

ou pela expressão

$$N_{11} = \frac{N_p D}{\sqrt{H_p}} \tag{3}$$

onde, $N_{11}$ é a rotação unitária e $D$ o diâmetro do modelo. A escolha entre as equações (2) e (3) depende da forma de obtenção das curvas de colina, respectivamente, a partir do protótipo ou do modelo.

Assim, um dado valor de $H$ define um segmento de reta, perpendicular ao eixo das abscissas, como o lugar geométrico dos possíveis pontos de operação e qualquer variação de $H$ resulta numa translação horizontal deste segmento. Como pode ser observado na Figura 1, qualquer variação de $Q$, e portanto de $P$, desloca o ponto de operação sobre o segmento de reta anteriormente definido.

No caso da operação em rotação ajustável, a alteração da rotação permite um novo controle da posição da linha vertical, que pode ser utilizado para maximizar a eficiência da turbina na vazão de operação $Q$. Como está ilustrado na figura 1, para $Q'$ pode-se ajustar uma rotação que permita a operação no ponto $(Q',N')$ pertencente a curva de eficiência ótima, que irá determinar a rotação de referência do sistema de regulação de velocidade da turbina.

## 3. TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA A ROTAÇÃO AJUSTÁVEL

A quebra de vínculo entre a rotação da turbina e a freqüência elétrica do sistema é imprescindível para a liberdade de rotação nas usinas hidrelétricas. Alternativas tecnológicas que permitam esta quebra de vínculo são possíveis graças ao avanço da eletrônica de potência com a tecnologia sistemas CCAT e dos cicloconversores. Tais tecnologias apresentam características específicas que devem ser avaliadas em cada projeto para alcançar a melhor solução em cada caso.

### 3.1. Tecnologia de Transmissão CCAT - A Conexão Unitária Gerador-Conversora

As primeiras indicações do interesse em conectar diretamente geradores síncronos a conversores aparecem na literatura técnica na segunda metade da década de 60 [09]. Tal interesse foi despertado em função do projeto Kingsworth-Londres, que previa a interligação da estação conversora de Kingsworth a único gerador de 500 MW, operando isolado do sistema em corrente alternada.

Desde então, vários estudos e pesquisas têm sido realizados com o objetivo de demonstrar sua viabilidade e determinar os principais problemas e soluções, bem como, estabelecer as bases de uma avaliação econômica, enfatizando os custos e benefícios principais. As primeiras investigações cobriram a análise de configurações possíveis, seu desempenho, requisitos sobre os equipamentos e avaliação econômica frente aos sistemas CCAT convencionais [09]. Mais recentemente, as investigações estão centradas nas vantagens de operar em rotação ajustável, buscando eficiência e aspectos ambientais, como por exemplo estudos realizados pelo Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da EPUSP, sobre a transmissão a longa distância de blocos de energia oriundos da Amazônia [10].

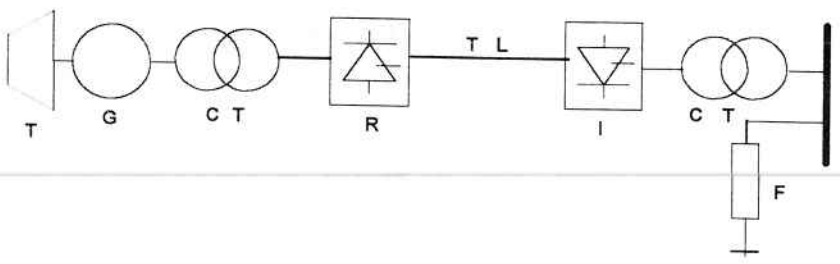



Figura 3 - Esquema em Conexão Unitária

Neste sentido, associado a transmissão em corrente contínua, a Conexão Unitária já apresenta vantagens significativas quando comparado com o sistema CCAT convencional, mesmo considerando-se a rotação fixa. Possíveis ganhos energéticos e melhor integração ambiental são benefícios adicionais decorrentes da rotação ajustável.

Para outros casos, de menores potências e pequenas distâncias, em que a tecnologia de transmissão CC não é naturalmente competitiva, a Conexão Unitária associada a configuração "back-to-back", pode ser considerada. Esta alternativa pode ser uma boa solução, por exemplo, se os benefícios energético e ambientais forem suficientes para cobrir os custos incrementais devido aos conversores. Pode-se supor situações, onde tais esquemas, devido ao menor impacto ambiental, viabilizem a execução de alguns aproveitamentos.

### 3.2. Os Cicloconversores

O cicloconversor é um conversor AC/AC, que é utilizado para alimentar o rotor de uma máquina assíncrona com freqüência equivalente a diferença entre a rotação do motor e a freqüência elétrica do sistema, de forma que, o campo girante visto pelo estator apresenta sempre a rotação síncrona. A configuração básica deste arranjo está apresentada na figura 4.

Sua concepção básica é similar a de um motor de indução a exceção da corrente rotórica que não é induzida mas alimentada pelo cicloconversor. Portanto, freqüência, corrente e torque mecânico rotóricos, dependerão do escorregamento. A inversão no sentido da corrente de alimentação permite a operação da máquina, como gerador ou como motor. Por esta razão, a tecnologia dos cicloconversores tem sido utilizada principalmente em aproveitamentos reversíveis, com capacidade de poucos até centenas de megawatts [08].

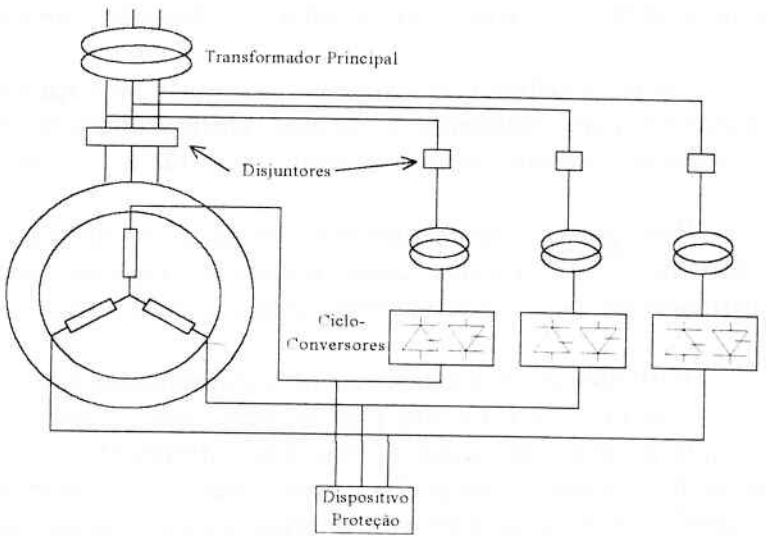



Figura 4 - Configuração para cicloconversores

Em relação as máquinas síncronas convencionais, este esquema apresenta custos adicionais devido ao sistema de controle e aos cicloconversores, bem como, devido ao maior custo e dimensão do rotor. Sua utilização em usinas hidrelétricas para implementação da rotação ajustável depende da avaliação econômica: serão os benefícios energéticos e ambientais suficientes para cobrir os custos adicionais? Para responder esta questão deve-se lembrar que a operação com variação de rotação pode impor requisitos de projeto mais exigentes que aqueles para uma usina reversível, em que existem pontos de operação bem determinados. Tal fato pode levar a custos adicionais que devem ser considerados em uma análise de viabilidade.

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

A pesquisa sobre a rotação ajustável em usinas hidrelétricas, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, teve início em 1989 no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. Projetos de pesquisa financiados pela ELETROBRAS e CEPEL dedicaram-se a verificar a viabilidade de utilização da Conexão Unitária na transmissão da energia gerada na região amazônica, inclusive quanto a avaliação de benefícios energéticos e ambientais proporcionados pela rotação ajustável. Tais projetos tiveram seus principais resultados apresentados nas referências [2,3].

Estudos adicionais e complementares tem sido desenvolvidos pela Universidade, abordando pequenos e médios aproveitamentos e uma melhor avaliação da possibilidade de ganhos energéticos e ambientais. Este estudo levou a análise dos esquemas de Conexão Unitária, arranjos "back-to-back" e Cicloconversores e ao desenvolvimento de software que permite a simulação da operação de usinas, considerando-se reservatórios, turbinas e geradores em rotação fixa e ajustável, com características físicas detalhadas dos aproveitamentos e períodos de simulação baseados nos dados históricos de vazões.

Foram estabelecidas as bases para uma avaliação econômica e de benefícios energéticos para pequenos e médios aproveitamentos. Benefícios ambientais são enfocados sob o ponto de vista qualitativo, devido a características não tangíveis.

Para grandes aproveitamentos, o custo do arranjo em Conexão Unitária com transmissão CCAT a longa distância pode ser estimado com certa confiança devido a experiência brasileira e internacional nesta área tecnológica.

Portanto, os principais resultados apresentados aqui são: a) um resumo da análise técnica e econômica elaborada para grandes aproveitamentos da região amazônica, com base nos projetos patrocinados pela ELETROBRAS e em avaliações adicionais, e b) análise da eficiência energética e dos benefícios ambientais da operação em rotação ajustável, elaborado para aproveitamentos já existentes ou planejados no Brasil.

## 4.1. Avaliação de aproveitamento de grande porte na região amazônica

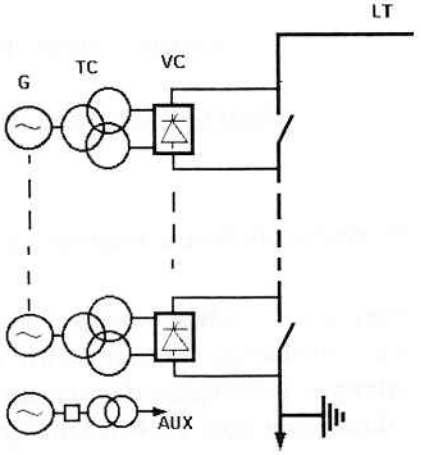
Durante o estudo patrocinado pela ELETROBRAS e em investigações adicionais, uma análise foi desenvolvida abordando um grande aproveitamento na região amazônica. A avaliação considerou um aproveitamento já existente, Tucuruí, planejado para 7000 MW, 20 máquinas de 350 MW, tendo atualmente uma capacidade instalada de 4200 MW. Os principais resultados relatados em [2,3] são:

- O arranjo em Conexão Unitária permite a redução de 12 a 33 % no custo da estação retificadora de um arranjo CCAT convencional, com a comparação apenas do custo de equipamentos. Para o exemplo avaliado (transmissão CC de 4000MW por 2400 Km), isto corresponde a 1.2 a 4.3 % do custo total de transmissão.

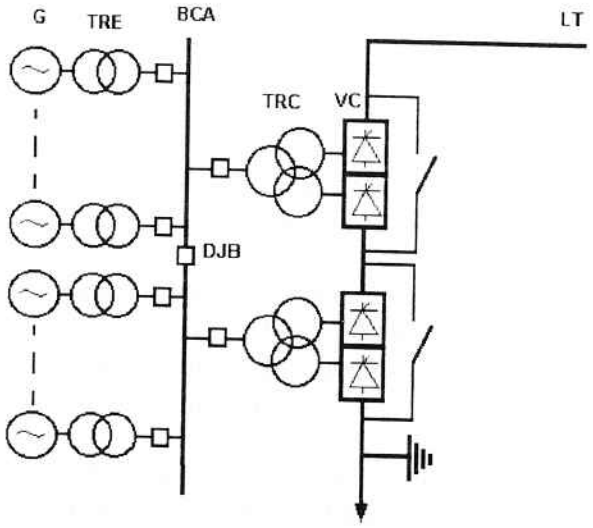
- Maiores reduções de custo em equipamentos podem ser obtidas se as válvulas conversoras forem colocadas dentro das casas de força. Três leiautes alternativos, figura 5, foram considerados, sendo que a configuração híbrida é a melhor para o aproveitamento considerado. Redução adicionais de custos podem ser consideradas neste caso, devido a menores requisitos das equipes de operação e manutenção.

- A operação em rotação ajustável permite um ganho adicional em torno de 0.5 a 0.8 % da energia anual gerada em rotação fixa. Em valor presente, tais números equivalem de 4 a 8 % do custo da energia produzida durante a vida útil do aproveitamento. Deve-se comentar que este ganho energético foi menor que a expectativa, o que indicou uma melhor investigação do processo. A análise detalhada das simulações mostrou que benefícios energéticos e ambientais são muito dependentes das características específicas do projeto, reforçando a necessidade de simulação de outros aproveitamentos.

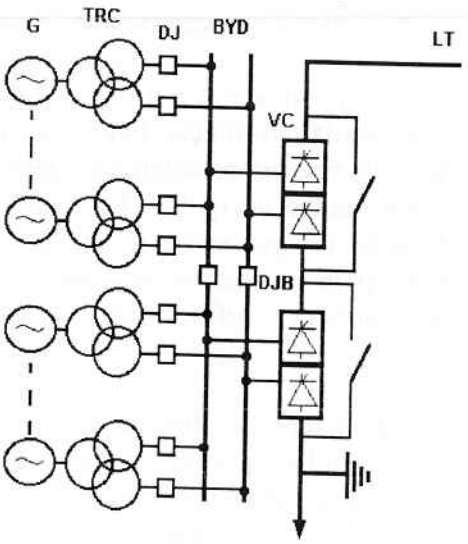
- Foi verificado também que, usualmente, maior ganho energético pode ser esperado para aproveitamentos onde haja grande variação de altura de queda, durante todo o tempo de operação. Isto pode ser facilmente entendido ao observar-se a variação de rotação que ocorre no eixo $N_{11}$ (relacionando rotação e altura de queda) da figura 1.




Conexão Unitária Real




Conexão Unitária em Grupo




Conexão Unitária Híbrida

Figura 5 - Leiautes alternativos

## 4.2. Possibilidade de maior eficiência energética e melhor integração ambiental

Com o objetivo de obter maior abrangência dos estudos, diferentes aproveitamentos foram avaliados com respeito a rotação ajustável. Alterações nas características da turbina e estratégias de operação foram também consideradas, com base em sugestões e discussões com especialistas em turbinas.

Para enfatizar os principais resultados, dois aproveitamentos brasileiros de diferentes portes foram escolhidos: Caconde (80 MW) e Cachoeira Porteira (700 MW).

Suas principais características estão na tabela I.

Tabela I - Dados dos aproveitamentos analisados

| Aproveitamento | Caconde | Cachoeira Porteira |
|---|---|---|
| Capacidade (MW) | 80 | 700 |
| Número de unidades | 2 | 4 |
| Queda de referência (m) | 101 | 61 |
| Vazão de referência ($m^3/s$) | 94 | 1808 |
| Variação de queda (%) | 29.3 | 30.8 |
| Fator de capacidade | 0.65 | — |

Foram realizadas simulações para períodos significativos dos dados históricos de vazões, considerando características operacionais do reservatório e de estratégia de operação, curva de colina das turbinas, diferentes solicitações de carga, etc. Nas tabelas a seguir os resultados são apresentados com base energia diária, com forma de identificar a solicitação imposta. Deve-se observar que o programa de simulação é capaz de trabalhar com menor intervalo de tempo e com maior horizonte de estudo, que pode ser necessário em avaliações mais detalhadas, por exemplo, na fase de projeto.

O aproveitamento Caconde foi simulado com diferentes fatores de carga, e considerou-se períodos de um ano, com vazões equivalentes a média no período de 58 anos. Este procedimento subestima as vantagens da rotação ajustável, pois os valores de vazão reais permitiriam maior variação da altura de queda e portanto maior benefício energético. A tabela II resume os principais resultados obtidos.

Tabela II - Ganhos energéticos - UHE Caconde

| **Energia Diária Rotação Fixa** | **Fator de Carga** | **Ganho Energético** | **Faixa de Rotação (porcenagem da síncrona) (%)** | |
|---|---|---|---|---|
| **(MWh)** | | **(%)** | **superior** | **inferior** |
| 1443 | 0.75 | 3.2 | -6.1 | -17.0 |
| 1224 | 0.75 | 4.1 | -5.5 | -17.0 |
| 1251 | 0.65 | 3.7 | -3.9 | -17.0 |
| 1062 | 0.65 | 3.0 | -2.4 | -17.0 |
| 1059 | 0.65 | 1.6 | -0.2 | -12.7 |
| 1059 | 0.55 | 1.2 | 0.5 | -9.1 |

Estes resultados mostram que ganhos energéticos significativos podem ser obtidos, até 4.1 % da energia total anual. Estes valores podem ser ampliados quando se considera o valor presente destes ganhos: por exemplo, cerca de 41 % para taxa de remuneração do capital de 10% e vida útil de 50 anos.

Outras simulações foram realizadas para avaliar a potencialidade de benefícios ambientais, em termos de área alagada, com a manutenção da energia gerada e utilizando-se a rotação ajustável para permitir a redução do nível máximo do reservatório. Os principais resultados desta simulação estão apresentados na tabela III,

em que a porcentagem de área alagada corresponde a base de 30.9 $Km^2$, equivalente ao nível máximo do reservatório.

Tabela III - Avaliação ambiental, redução de área alagada - UHE Caconde

| Energia Diária | Fator de Carga | Redução do nível | | Redução da área alagada | |
|---|---|---|---|---|---|
| (MWh) | | (m) | (%) | ($km^2$) | (%) |
| 1224 | 0.75 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 6.1 |
| 1251 | 0.65 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 5.2 |
| 1059 | 0.55 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 3.6 |

Os dados apontam que significativa redução da área alagada pode ser obtida na UHE Caconde. Deve-se considerar que tais reduções implicam em diminuição dos custos de obras civis. A seguir, outras simulações foram realizadas para verificar a influência de projetos modificados de turbinas ou número de máquinas diferentes nos ganhos energéticos. Apoiado em discussões e sugestões de especialistas em turbinas, para quem: se a turbina é projetada para operar em rotação ajustável, seria possível obter curvas com maiores valores de rendimento. Tal condição foi simulada, como exemplificado na figura 6, considerando curvas de rendimento com maiores valores máximos.

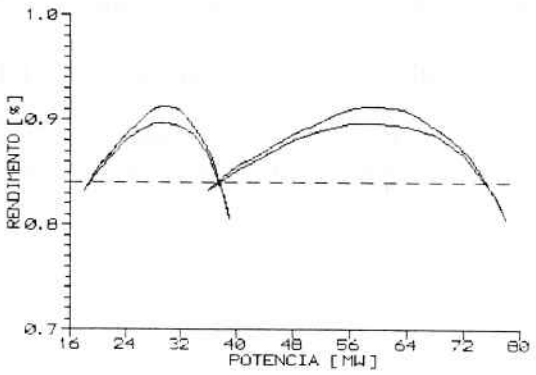



Figura 6 - Curva para turbina modificada

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela IV.

Tabela IV - Turbina modificada UHE Caconde

| Energia Diária | Ganhos Energético Anual | Faixa de Variação da Rotação | |
|---|---|---|---|
| (MWh) | (%) | superior | inferior |
| | | (%) | (%) |
| 1443 | 3.8 | -6.1 | -17.0 |
| 1224 | 5.0 | -4.8 | -17.0 |
| 1251 | 4.7 | -3.6 | -17.0 |
| 1062 | 4.1 | -1.8 | -17.0 |
| 1059 | 2.5 | -0.2 | -12.4 |
| 1059 | 2.1 | 0.5 | -9.0 |

Os resultados mostram que maiores ganhos podem ser obtidos, que podem ser vistos como ganhos energéticos ou maiores possibilidades de redução dos níveis de operação do reservatório. Simulações realizadas mostram que a redução de área pode chegar a 8.5 %.

Para a UHE Cachoeira Porteira, simulações foram realizadas para determinar os ganhos energéticos e a influência do regime de vazões nestes ganhos. A tabela V apresenta os principais resultados considerando dados históricos desde 1931 a 1988 e três conjuntos foram considerados: média do período, média anual máxima (1983) e média anual mínima(1971).

Tabela V Ganhos energéticos, diferentes conjuntos de vazões - Cachoeira Porteira

| Energia Diária | Fator de Carga | Ganho Energético Anual (%) | | | Faixa Total de Variação da Rotaçãoe | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (GWh) | | Vazão Média (1931-88) | Vazão Máxima (1983) | Vazão Mínima( 1971) | superior (%) | inferior (%) |
| 11.76 | 0.7 | 1.6 | 1.0 | --- | -6.0 | -24.3 |
| 10.08 | 0.6 | 1.0 | 0.84 | 1.5 | -10.2 | -17.1 |
| 8.40 | 0.5 | 1.5 | 1.2 | 2.4 | -7.0 | -28.1 |
| 6.72 | 0.4 | 1.1 | 1.0 | 2.1 | -14.9 | -19.6 |
| 5.04 | 0.3 | --- | --- | 1.2 | -15.1 | -16.9 |

Os resultados apontam ganhos inferiores aos de Caconde, confirmando que os benefícios são totalmente dependentes das especificidades do projeto. No entanto, são ganhos ainda significativos.

## 4.3. Possibilidade de maior eficiência energética em usinas reversíveis

As usinas reversíveis, também denominadas de usinas de acumulação por bombeamento, permitem o armazenamento de energia hidráulica a partir do aproveitamento do excedente de eletricidade existente em período de carga.

A experiência brasileira nesta área é tímida. Na Europa as primeiras usinas deste tipo, de pequena potência, foram construídas na década de 20. No Brasil existe a usina de Pedreira, do sistema Eletropaulo, com oito turbinas-bombas tipo Francis para queda de 25m, as cinco primeiras instaladas entre os anos de 1939 e 1953 e as demais entre 1976 e 1993.

Com capacidade instalada para bombear até 395 $m^3/s$, na rotação de 150 rpm, Pedreira opera quase que exclusivamente como bomba - para controle de cheias -, alimentando os reservatórios Billings e Rio das Pedras, da Eletropaulo, permitindo a geração de energia pela usina de Henry Borden, com queda de aproximadamente 700m.

Estudos da CESP, realizados em 1986 para o suprimento de energia elétrica do estado de São Paulo até o ano de 2010, apontam o potencial de cerca de 43.000 MW de capacidade em usinas reversíveis, com custos compatíveis aos custos incrementais de supermotorização de usinas convencionais.

Para avaliação da rotação ajustável em usinas reversíveis tomou-se a UHR Pedra do Cavalo, situada nas proximidades da cidade de Salvador. Os estudos preliminares definem quatro unidades geradoras, das quais apenas duas operando como reversíveis.

A tabela VI apresenta as principais características da UHR Pedra do Cavalo.

Tabela VI - Características da UHR Pedra do Cavalo

| | |
|---|---|
| Potência instalada de geração | 620 MW |
| Potência instalada para bombeamento | 300 MW |
| Número de unidades de geração | 4 |
| Número de unidades para | 2 |
| Tipo de Turbina | Francis |
| Queda de referência | 106 m |
| Variação de cota no reservatório | 11,3% |
| Variação de cota no reservatório | 6,1% |
| Rotação de operação na geração | 150 rpm |
| Rotação de operação no bombeamento | 150 rpm |

Nas simulações, a UHR Pedra do Cavalo foi submetida a diferentes ciclos operacionais, procurando verificar seu comportamento frente a diferentes condições de solicitação. A tabela VII resume os resultados obtidos.

Tabela VII - Resultados para UHR Pedra do Cavalo

| Período | Ident. | Variação da energia gerada | Variação da energia para bombear | Variação da cota | Variação da rotação (%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Turbina | | Bomba | |
| | | % | % | % | sup. | inf. | sup. | inf. |
| Seco | 1 | 3,5 | 0,10 | 10,8 | 3,3 | -16,3 | -8,9 | -10,7 |
| | 2 | 3,4 | -0,48 | 10,8 | 3,1 | -16,4 | -8,9 | -10,7 |
| | 3 | 3,0 | -0,49 | 10,8 | 0,86 | -16,3 | -9,0 | -10,8 |
| | 4 | 2,9 | -0,74 | 10,8 | 1,2 | -16,3 | -9,0 | -10,8 |
| Úmido | 1 | 4,0 | -0,13 | 10,8 | -0,49 | -17,2 | -8,9 | -10,7 |
| | 2 | 2,5 | -2,1 | 10,8 | -0,43 | -17,2 | -8,9 | -10,7 |
| | 3 | 2,3 | -0,85 | 10,9 | -0,49 | -17,0 | -9,0 | -10,8 |
| | 4 | 2,6 | -1,5 | 10,9 | -0,37 | -17,1 | -9,1 | -10,8 |

Os resultados obtidos apontam ganhos energéticos de geração entre 2,9 e 3,5 % para o período seco e entre 2,3 e 4,0 % para o período úmido. De modo geral, há economia de energia, também, para o bombeamento de água.

## V. CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa mostram que ganhos significativos em eficiência energética podem ser obtidos com a operação de usinas hidrelétrica em rotação ajustável. Por outro lado, para a mesma energia gerada pode-se obter melhor integração ambiental do aproveitamento pela redução da área ocupada pelo reservatório. Uma solução considerando ambos, benefícios e ganhos, pode ser avaliada durante a análise do planejamento.

Procurou-se mostrar que a perspectiva de ganhos e benefícios são bastante dependentes das características específicas de cada projeto, e que, usualmente, maior variação na altura de queda pode implicar em maiores benefícios. Tal variação pode ser um forte indicador que a operação com rotação ajustável deve ser considerada como uma alternativa de solução para o projeto.

Foram apresentadas três diferentes configurações que possibilitam a operação com rotação ajustável, baseadas na tecnologia CCAT e dos cicloconversores. Para grandes blocos de energia a longa distância, onde o sistema CCAT é uma solução natural, sugere-se a utilização da Conexão Unitária e a operação com rotação ajustável, desde que os benefícios sejam garantidos. Para outros casos, de menores capacidades e distâncias, requere-se uma análise econômica para mostrar se os benefícios são suficientes para cobrir os custos adicionais das duas possíveis configurações: Conexão Unitária/Back-to-Back ou Cicloconversor. Esta análise deve ser cuidadosamente

realizada, a exceção de casos onde os aspectos ambientais são tão fortes que os benefícios ambientais obtidos sejam suficientes para justificar a rotação ajustável.

Os resultados mostram, também, que maiores benefícios podem ser obtidos, como apontam especialistas, as máquinas hidráulicas forem projetadas considerando-se a operação em rotação ajustável, que significa alteração nos critérios e na metodologia atualmente utilizada.

Finalmente, a rotação ajustável mostrou-se bastante promissora nos aproveitamentos reversíveis. Assim, em futuros estudos de viabilidade de eventuais usinas reversíveis planejadas, a adoção de configurações contemplando a rotação ajustável não pode deixar de ser considerada, sob pena de limitar a eficiência máxima do aproveitamento.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do conjunto de pesquidadores da Universidade envolvidos com os dois projeto sobre a questão amazônica, assim como, a ELETROBRAS, CEPEL e CESP pelo incentivo à pesquisa e pela disponibilidade no fornecimento de informações.

## 7. REFERÊNCIAS

[01] ARRILAGA, J. et al. Direct connection of generators to HVDC converters: main characteristics and comparative advantages. **Electra,** n.149, Aug. 1993.

[02] CESP. **Plano de Suprimento de Energia Elétrica para o Estado de São Paulo até o ano 2010**. São Paulo, CESP, 1986. 93p.

[03] ELETROBRÁS. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis:** política e programa de construção. Rio de Janeiro, 1979.

[04] EPUSP - PEA - LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA. **Pesquisa da aplicação da conexão unitária gerador-conversora de corrente contínua para transporte de grandes blocos de energia à longa distância: relatório** - Etapa inicial. São Paulo, 1991. (Convênio USP/CEPEL/ELETROBRÁS)

[05] EPUSP - PEA - LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA. **Pesquisa da aplicação da conexão unitária gerador-conversora de corrente contínua para transmissão de grandes blocos de energia à longa distância:** Estudo de Viabilidade. São Paulo, 1992. 2 v. (Relatório convênio USP/ELETROBRÁS)

[06] HOLDER, K.L.; IVANOVIC, I. Elektrische Anlagen Im Kraftwerk "Bein Preußischen" / Neckar. **Wasserwirtschaft**. 82, p. 250-4, May 1992.

[07] HUTAREW, A. Converter application for mini hydro generation. **International Water Power & Dam Construction,** v. 43, n. 5, p.17-9, May. 1991.

[08] KITA, E. et al. A 400MW adjustable speed pumped-storage system. **International Water Power & Dam Construction,** v. 43, n.11, p.37-9, Nov. 1991.

[09] REIS, L.B et al. HVDC Unnit Connection Schemes: Dimensioning Turbines and Generators and Characteristics and Advantages of the Operation with Variable Speed. III SEPOPE, Belo Horizonte, Brasil, Maio 1992.

[10] 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 COLLOQUIUN ON HVDC AND FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS, Wellington, 1993. **Papers presented.** Wellington. CIGRETRANSPOWER. 1993 P. 5.1.1-7

[11] REIS, L.B.; SAIDEL, M. A.; CORREIA, J. S. S. Novel technologies: an alternative to reduce environmental impacts of hydroelectric developments in the Amazon Region. In: POLÍTICA ENERGÉTICA PARA O DESENVOLVIMENTO AUTO-SUSTENTADO DA AMAZÔNIA, Brasília, 1993.

[12] REIS, L. B. **Usinas hidrelétricas em rotação variável - opção energética para longa distância, aproveitamento de pequeno porte e reversíveis**. São Paulo, 1993. 256 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[13] TAGUCHI, T. et al. Variable speed pumped storage system fed by large-scale cycloconverter. In: EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATION, $4^0$, Firenze, v. 2, p. 237-42, 1981.

[14] TANAKA, H. An 82 MW variable speed pumped-storage system. **International Water Power & Dam Construction,** v. 43, n. 11 , p.25-6, Nov. 1991.

[15] TERENS, D. L.; SCHAFER, R. Variable Speed in hydro power generation utilizing static frequency converters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROPOWER WATERPOWER, Nashville, 1993.

[16] WESTPHALEN, M.L.; MAZZOLENI, J.C. Variable speed turbine operation with HVDC unit connected generators. IN: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HIDRAULIC RESEARCH (IAHR) CONFERENCE, São Paulo, 1992. São Paulo, IAHR, 1992. p.1-9.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA

BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO , HENRIQUE PRADO ALVAREZ

BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS

BT/PEA/9504- Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervvisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS

BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.

BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provvocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI

BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - CÍCERO COUTO DE MORAES, SERGIO LUIZ PEREIRA