



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

GGH 12
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA

APLICAÇÃO DE UNIDADES BULBO E KAPLAN VERTICAL EM APROVEITAMENTOS DE MÉDIAS POTÊNCIAS E BAIXAS QUEDAS

Ricardo Cabral de Vasconcellos *

Mauro Uemori

Laurent Tomas

ALSTOM HYDRO ENERGIA BRASIL LTDA

RESUMO

A implementação de usinas hidroelétricas de baixa queda utilizando unidades geradoras bulbo não é largamente conhecida do Brasil, uma vez que muito poucas usinas com esta configuração estão atualmente instaladas em nosso país. Por outro lado, há diversos estudos de baixa queda para novas usinas hidroelétricas, muitas das quais com desafios significativos para alcançar a viabilidade técnica e econômica.

O objetivo deste artigo é apresentar as diferenças entre unidades bulbo e Kaplan verticais para uma mesma configuração, guiando a melhor escolha entre elas, dependendo das limitações e condições de contorno do aproveitamento.

Da mesma forma, será apresentada a experiência da Alstom e suas principais e últimas práticas aplicadas durante os estudos e desenvolvimento destes tipos de unidades, incluindo comentários sobre a otimização do projeto hidráulico utilizando poderosas e dedicadas ferramentas CFD e ensaios de modelo reduzido nos laboratórios da Alstom.

PALAVRAS-CHAVE

Turbinas Hidráulicas, Turbinas Kaplan, Turbinas Bulbo, Baixa Queda, Hidrogeradores

1.0 - INTRODUÇÃO

Hidroeletricidade é hoje em dia uma das maneiras mais amplamente difundidas de produzir eletricidade. Além disso, água é uma fonte renovável de energia e quando usada corretamente permite um desenvolvimento sustentável do país.

Desde o final do século 19 quando a primeira aplicação industrial de hidroelétrica apareceu na Europa, e ao longo de todo o século 20 quando hidroelétricas foram usadas com sucesso em todos os continentes, um empenho contínuo tem sido feito para melhorar o conhecimento e a tecnologia envolvida, tal como a fluidodinâmica, assim como as ciências elétricas, mecânicas, de materiais e simulações de cálculo. Esse esforço resultou em maiores performances, produtos confiáveis e soluções que preservam o meio ambiente. Graças ao contínuo progresso, o alcance da aplicação de hidroelétricas é agora bastante ampliado: de poucos metros de queda com turbinas bulbo para centenas de metros de queda com turbinas bombas ou turbinas Pelton. Na continuação deste artigo vamos focar em turbinas de quedas muito baixas e baixas.

Para baixas quedas (tipicamente abaixo de 60m), não é necessário ter um rotor de turbina com uma cinta como é a regra para turbinas Francis. Isso significa que as pás (de três a nove, de acordo com a queda) podem suportar a queda sem serem soldadas juntas à cinta do rotor. Isso permite ter pás móveis com a possibilidade de ajustar suas posições angulares para o fluxo que vem de montante. O primeiro desenvolvimento deste tipo de rotor de

pás móveis ocorreu no primeiro quarto do século 20 na Europa (Victor Kaplan patenteou sua idéia do que veio a se tornar um rotor Kaplan em 1912). Quando usado com um distribuidor clássico (i.e. com palhetas móveis), essas turbinas são chamadas turbinas duplamente reguladas uma vez que a posição angular das pás e palhetas podem ser ambas ajustadas.

A principal vantagem da turbina de dupla regulagem é a habilidade para se adaptar a variações relativamente amplas de queda (principalmente com as palhetas) e de vazão (principalmente com as pás). Como consequência, as eficiências das turbinas permanecem próximas à do ponto de melhor eficiência em uma faixa operacional relativamente ampla quanto comparada à faixa de uma turbina de simples regulagem. É por este motivo que a escolha da turbina de dupla regulagem tornou-se regra para usinas com baixas quedas, mesmo considerando-se que seu ponto de melhor eficiência possa ser menor do que em uma turbina de simples regulagem. Outro recurso significativo das unidades de dupla regulagem é a ausência de flutuação de pressão no tubo de sucção para pontos de operação distantes do ponto de melhor eficiência.

É importante mencionar que, em alguns casos, a solução *propeller* (unidades com pás fixas) pode ser particularmente interessante quando o número de unidades numa dada usina for grande. Como consequência, algumas unidades podem ser de simples regulagem: a variação da vazão para essas unidades pode ser limitada já que a maioria da variação da vazão pode eficientemente focada nas unidades remanescentes de dupla regulagem.

Há poucas décadas, duas famílias de unidades com dupla regulagem são encontradas: as clássicas turbinas Kaplan e, mais recentemente, as chamadas turbinas bulbo (por causa da forma da blindagem do gerador no fluxo de água). A principal diferença entre estas duas famílias de turbinas é a orientação do eixo. A turbina Kaplan possui eixo vertical enquanto a turbina bulbo tem eixo horizontal. Esta diferença implica no fato de que uma turbina Kaplan típica tem uma dupla curvatura na passagem da água (uma entre o distribuidor e o rotor e outra no cotovelo do tubo de sucção), enquanto a turbina bulbo típica tem uma passagem de água reta (incluindo o tubo de sucção). Por outro lado, o gerador de uma turbina Kaplan está fora do canal de passagem de água enquanto um bulbo gerador está dentro no canal de passagem de água (dentro do "bulbo"). Veja-se a figura 1.

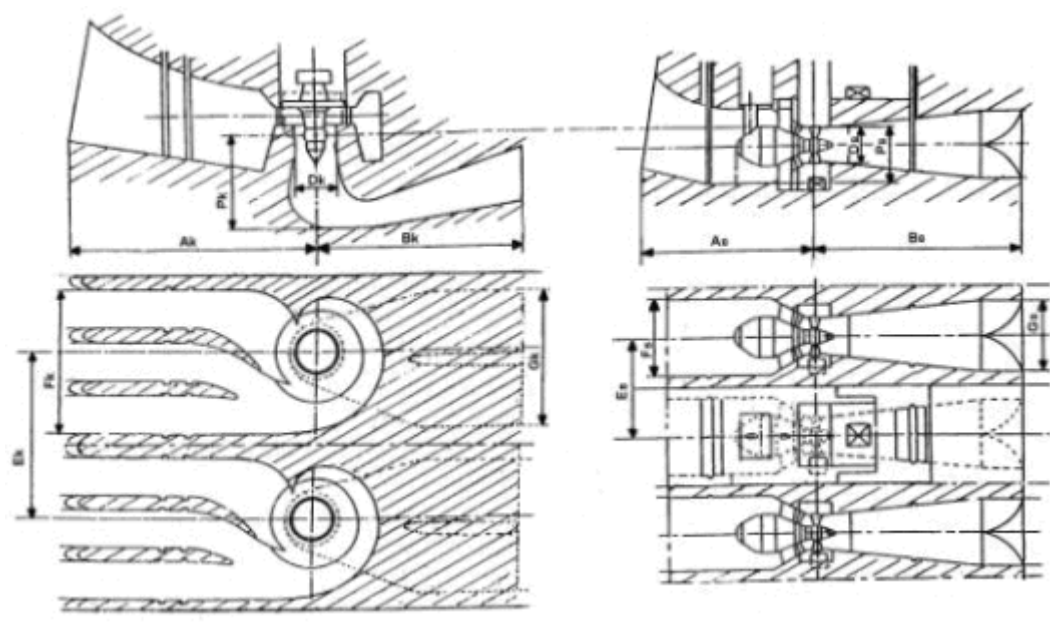


Figura 1 : Desenhos esquemáticos de unidades Kaplan e Bulbo

Dentre as numerosas unidades bulbo da ALSTOM em operação no mundo, podem ser apresentadas algumas referências brasileiras, como: Porto Primavera (18 unidades Kaplan de 103 MW), Ourinhos (2 unidades Bulbo poço de 15 MW), Igarapava (5 Bulbogeneradores de 44,2 MVA; 6,9 kV; 0,95 pf e 112,5 rpm), Canoas (6 Bulbogeneradores de 28,1 MVA; 6,9 kV; 0,95 pf; 138,5 rpm). Outras referências importantes são Qiao Gong (4 unidades bulbo de 58,5 MW), na China; Brilliant (1 unidade Kaplan de 130 MW) e Grand Mère (3 unidades Kaplan de 74 MW), ambas no Canadá.

No próximo capítulo, serão detalhadas as diferenças entre unidades Kaplan e bulbo pela comparação de suas vantagens.

2.0 - COMPARAÇÃO DE UNIDADES KAPLAN E BULBOS

2.1 Vantagens de unidades Kaplan

Existem diversas vantagens de uma turbina Kaplan comparada a uma turbina bulbo.

Em primeiro lugar, quando a máxima queda líquida é superior a cerca de 30 metros, a solução Kaplan é considerada em lugar da solução bulbo. De fato, para estas relativamente elevadas quedas, a solução bulbo é evitada devido a restrições mecânicas ligadas à própria segurança mecânica do bulbo: para assegurar transmissão adequada de torque e cargas ao concreto através da estrutura central seria necessário uma solução que não seria competitiva, seja com relação a custo, seja com relação a eficiência.

A acessibilidade à unidade é melhor numa Kaplan que numa turbina bulbo. De fato, a acessibilidade do rotor da turbina é comparável, mas a acessibilidade do gerador é muito mais fácil numa unidade Kaplan, uma vez que ele está localizado acima do rotor da turbina e não está dentro do canal de passagem de água. No caso de uma unidade bulbo o acesso ao gerador é possível através das passagens verticais.

Quanto ao dimensionamento de geradores que se destinarão a serem acoplados a turbinas Kaplan, pode-se observar o seguinte:

- O diâmetro interno mínimo do estator é limitado pelo diâmetro da tampa da turbina, a qual deverá passar pelo estator.
- O diâmetro máximo é restringido pelos esforços que surgem no rotor durante um evento de rotação máxima (rotação de disparo).
- Com os diâmetros máximos passíveis de serem obtidos em geral a obtenção do momento de inércia (GD^2) necessário tanto pelo sistema elétrico como pelo hidráulico não apresenta problema, apresentando valores típicos de constante de inércia entre 2,5 a 4,5 kWs/kVA.
- Possibilita obter valores de reatâncias síncronas segundo eixo direto não saturada (x_d) na faixa de 0,8 a 1,1 pu de forma mais simples que geradores destinados para operar com turbina Bulbo. Além disso, maiores valores de rendimento e concepção de sistema de ventilação mais simplificado são geralmente obtidos.
- A manutenibilidade do gerador é muito mais vantajosa neste tipo de gerador, pelos generosos acessos para retirada do rotor, trocadores de calor ar-água, pólos, anéis coletores, barras estatóricas e mancais.

2.2 Vantagens de unidades bulbo

Quando a queda líquida não é tão alta, uma turbina bulbo tem significativas vantagens quando comparada a uma turbina Kaplan. Para quedas líquidas menores que cerca de 30 metros, a solução bulbo é geralmente preferida.

Como já mencionado, a passagem de água de uma unidade bulbo é toda reta: não há curvaturas. Como resultado, para uma dada queda líquida e uma dada vazão, a eficiência de uma turbina bulbo é mais elevada que a de uma turbina Kaplan. Isso se deve ao fato das perdas no tubo de sucção serem muito menores numa turbina bulbo em função de não haver um cotovelo (o mesmo se aplica, de certa forma, às perdas na parte a montante do rotor da turbina).

Outra vantagem do eixo horizontal das unidades bulbo é que menos obra civil é necessária quando comparada a unidades Kaplan. Basicamente, o comportamento quanto à cavitação é similar em unidades bulbo e Kaplan, o que leva se utilizar praticamente o mesmo nível de implantação do rotor da turbina para um dado projeto. Contudo, no caso da unidade Kaplan, a forma do tubo de sucção implica em maior escavação. Da mesma forma, uma unidade Kaplan geralmente requer uma caixa semi-espiral em concreto, com uma larga entrada que é tipicamente da ordem de três vezes o diâmetro do rotor da turbina. No caso de uma unidade bulbo, a entrada tem uma forma mais simples e sua largura é tipicamente ao redor de duas vezes o diâmetro do rotor da turbina. Por estas três razões, uma unidade bulbo é menos cara com relação aos custos de obras civis.

De forma geral, em se tratando de cavitação, uma vez que unidades bulbo e Kaplan possuem comportamento similar, para um dado projeto as duas soluções são viáveis. Nestes casos, geralmente é observado que as soluções bulbo resultam em rotores de menor diâmetro quando comparados a soluções Kaplan. Novamente, isso faz com que a solução bulbo seja a melhor do ponto de vista econômico. Adicionalmente, o tempo de construção é menor para turbinas bulbo, e desta forma, a os ganhos com a operação são melhores.

Finalmente, para usinas de baixa queda com diversas unidades, as turbinas bulbo podem oferecer a interessante possibilidade de operação em modo descarregador. Uma unidade bulbo equipada com uma comporta vagão adequada para tal, pode permitir o descarregamento com vazão através da unidade da magnitude de 70% da vazão nominal. Isso é muito mais do que é possível obter com uma unidade Kaplan e pode resultar numa otimização significativa do vertedouro. Atenção especial deve ser dada aos requisitos da comporta vagão para este tipo de aplicação, pois ela pode sofrer um incremento considerável de custo.

Quanto ao dimensionamento de geradores que se destinarão a serem acoplados a turbinas do tipo bulbo a ALSTOM aplica diferentes tecnologias em função da potência unitária.

- Geradores com potência abaixo de 20 MW:
 - São geradores com rotação entre 600 e 900 rpm. Devido à baixa rotação da turbina, em geral se utilizam multiplicadores de velocidade para que seja possível a aplicação de um projeto de padronização de geradores de pequeno porte da ALSTOM.
- Geradores com potência acima de 20 MW:
 - São geradores que utilizam a própria envoltória do Bulbo para acomodar o estator do gerador.
 - O rotor do gerador se posiciona em balanço apoiado sobre dois mancais:
 - Um mancal guia radial próximo à turbina:
 - Um mancal escora e contra-escora e guia radial do outro lado, tomando o cuidado de projetá-lo o mais próximo possível da linha de centro do rotor do gerador.

Para geradores com potências entre 20 MW e 30 MW a própria água do rio é canalizada e direcionada para retirar uma parcela das perdas internas geradas no estator do gerador. Aletas soldadas no lado interno da calota são utilizadas para direcionar o fluxo de ar e remover estas perdas.

Quando o método citado anteriormente não é suficiente, o circuito de refrigeração é reforçado com a aplicação de ventiladores acionados por motor elétrico associado com o emprego de trocadores de calor ar-água do tipo convencional. Este método é obrigatório para geradores de potência acima de 30 MW. Em geral o projeto é feito considerando um dos motoventiladores e trocadores de calor ar-água fora de serviço.

Estando o bulbo no mesmo caminho de passagem da água deve-se otimizar o seu perfil de forma que isso não venha a ser um problema para o circuito hidráulico. Por isso, o diâmetro da envoltória do bulbo é de 1,0 a 1,3 vezes o diâmetro da roda da turbina. Para o gerador isto resulta em diâmetro pequeno, o que dificulta o seu dimensionamento, tendo então que considerar as seguintes desvantagens em relação a Kaplan tradicional:

- Devido ao limitado diâmetro a constante de Inércia se encontra na faixa de 1,0 a 1,4 kW/kVA;
- A vazão de ar não é conseguida pelo rotor do gerador, mas para isso se torna necessário o emprego de motoventiladores para obter a pressurização adicional necessária.
- Espaço interno pequeno o que prejudica os trabalhos de manutenção.

Pode-se acima acrescentar que um problema bastante crítico em bulbogeradores é a ondulação do estator, fenômeno conhecido como "*Buckling*". Ele ocorre devido à expansão térmica do núcleo do estator a qual não é devidamente compensada pela expansão da carcaça, pois esta apresenta contração em função da menor temperatura, já que ela está em contato direto com a água. A pressão externa exercida pela água ao redor do bulbo é um fator adicional que auxilia no desenvolvimento deste fenômeno.

3.0 - EXPERIÊNCIA ALSTOM EM PROJETOS DE UNIDADES KAPLAN E BULBO

A fim de se obter performances otimizadas, o projeto da turbina precisa ser apropriadamente investigado. Tal investigação se refere principalmente a três componentes ou conjuntos principais.

Em primeiro lugar, o projeto da entrada e do distribuidor (no caso de bulbos) e da caixa e da dupla grade formada pelo pré-distribuidor e distribuidor (no caso de Kaplans). O objetivo destes componentes a montante é entregar a energia cinética necessária ao rotor com as perdas de carga tão limitadas quanto possível. O projeto destes componentes é numericamente testado graças a programas computacionais atualizados de CFD (cálculo fluidodinâmico).

A seguir, o projeto do rotor é certamente investigado cuidadosamente. A fim de se obter performances elevadas, o projeto do rotor deve ser definido, de acordo com a faixa de operação alvo, com relação a eficiência, cavitação e disparo. Novamente, o estado da arte em termos de métodos numéricos (incluindo algoritmos de otimização de formas) permite encontrar a geometria mais relevante para um dado projeto.

Finalmente, o tubo de sucção não pode ser esquecido, uma vez que, para turbinas de baixa queda, uma grande parte do total de perdas de carga é proveniente do tubo de sucção. É por isso que se deve ter especial cuidado com o bom comportamento do tubo de sucção (levando-se em consideração o campo de velocidades na saída do rotor, ou seja, na entrada do tubo de sucção). Sob um ponto de vista global, também é importante ter cuidado com as perdas de carga na saída do tubo de sucção (a fim de se ter uma estimativa correta da queda líquida para uma dada queda bruta).

A seguir será examinado como a ALSTOM está habituada a lidar com estes diferentes requisitos na fase de projeto.

3.1 Projeto e CFD

Para um dado projeto, alguns pontos chave de operação são escolhidos de acordo com a experiência da ALSTOM e estes pontos são intensivamente investigados durante o projeto da turbina. De certa forma, estes pontos são selecionados em função do comportamento hidráulico adequado neles existente, o que assegura que as características requeridas do projeto possam ser atingidas pela turbina assim projetada.

A ALSTOM desenvolveu programa computacional específico para o projeto de pás de turbina. Este programa permite definir a pá através da definição de parâmetros hidráulicos usuais, tais como: ângulos de entrada, ângulos de saída, espessura, etc. Uma vez que estes parâmetros chave sejam selecionados, este programa é usado para projetar uma turbina que tenha as características desejadas com relação ao momento cinético na entrada do rotor (através de projeto apropriado das palhetas diretrizes), momento cinético na saída do rotor (através de projeto apropriado das pás do rotor) e campo de velocidades na entrada do tubo de sucção.

Estas características desejadas são checadas cuidadosamente graças a programa computacional baseado em modelamento turbulento viscoso tridimensional do fluxo dentro da turbina utilizando as equações de Navier-Stokes (tais como os programas: CFX-Tascflow® ou CFX®). Algumas imagens mostradas na Figura 2 ilustram a aplicação destes programas no caso de simulações conjugadas (distribuidor + rotor + tubo de sucção).

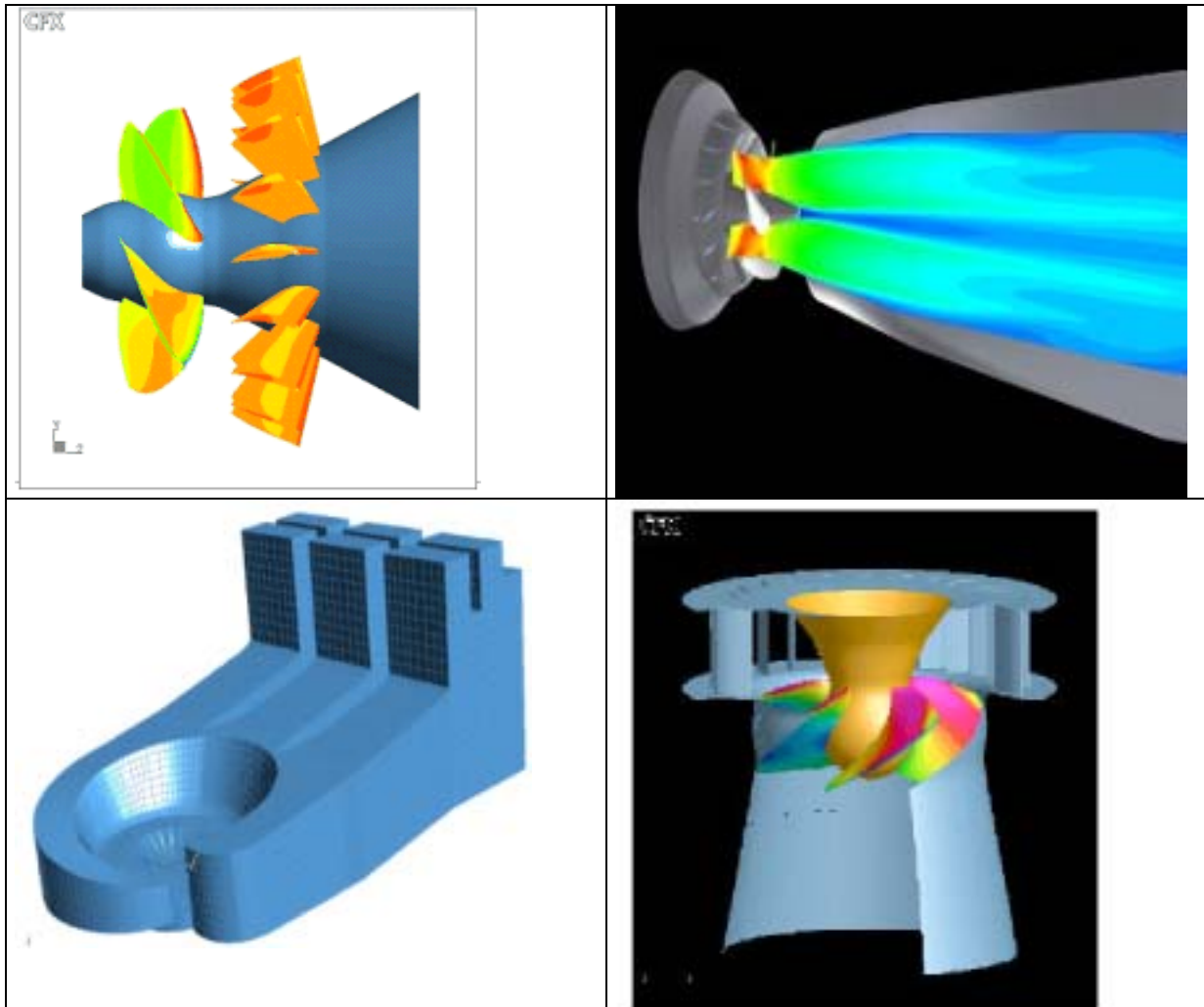


Figura 2: Exemplos de simulações conjugadas: campos de pressão nas pás e campo de velocidade no tubo de sucção em turbinas bulbo (linha superior); malha da caixa semi-esprial e campo de pressão nas pás em turbinas Kaplan (linha inferior)

Ao mesmo tempo, a ALSTOM desenvolveu programa computacional baseado em métodos de otimização de formas. Neste caso, o projeto desejado é procurado como sendo aquele que possa atingir o mínimo de uma função. Esta função é definida de acordo com as características desejadas do projeto e seus argumentos são parâmetros hidráulicos que são utilizados pelo programa. No programa computacional de otimização, é possível utilizar algoritmos locais (tal como o do ponto de sela, etc.), o qual retorna após um tempo relativamente limitado um mínimo local, ou um algoritmo global (tal como um genético), que retorna após um tempo relativamente longo o mínimo global. É de responsabilidade e escolha do projetista escolher o tipo de algoritmo que pensa ser o melhor adaptado para o caso em questão, assim como o número de parâmetros hidráulicos que se permitirá variar. Para maiores referências a respeito destes métodos, recomenda-se pesquisar nas referências bibliográficas apresentadas.

Utilizando-se as metodologias acima, o projetista define a geometria da turbina que será fabricada na escala de modelo e a esta em laboratório hidráulico.

3.2 Teste de Modelo

O teste em modelo reduzido é o caminho usual para checar se os valores garantidos pelo fabricante são realmente atingidos. É bem conhecido que o teste de modelo fornece resultados mais precisos que o teste de protótipo uma vez que a turbina modelo é muito melhor adaptada para se efetuar medições que a turbina protótipo. Por outro lado, o teste de modelo também é uma ferramenta chave para aprimorar a performance uma vez que permite a investigação das condições operacionais que dificilmente poderiam ser simuladas por métodos numéricos (tais como a influência da cavitação no comportamento do rotor, condições de disparo, etc.).

No Centro de Tecnologia de Turbinas da ALSTOM, localizado em Grenoble, França, uma plataforma de ensaios é devotada para ensaios de turbinas bulbo (Figura 3), apesar dos modelos bulbos poderem ser ensaiados em diversas outras plataformas. Uma outra plataforma de ensaios é devotada para unidades verticais de baixa queda (Kaplan ou *propeller*), mas os modelos Kaplan também podem ser testados em diversas outras plataformas.



Figura 3: Plataformas de ensaios e modelos de rotores montados (linha superior: bulbo / linha inferior: Kaplan)

As plataformas de ensaio permitem diferentes tipos de medidas nas condições recomendadas pelo código IEC, tais como: eficiência, potência, cavitação, disparo, estabilidade, medidas de pressão Winter-Kennedy e torques nas pás do rotor e nas palhetas do distribuidor. Uma vez que é possível variar a pressão nos tanques a jusante ou a montante, é muito simples investigar o comportamento da turbina em toda a faixa operacional e até mesmo em condições piores que aquelas esperadas para o protótipo. Finalmente, é possível ainda efetuar testes mecânicos, tais como: o empuxo axial (mesmo que o dimensionamento seja efetuado de acordo com experiências prévias), ou torques no rotor.

3.3 Projeto dos geradores

A ALSTOM emprega várias tecnologias para fazer face às características individuais dos geradores destinados para turbinas Kaplan e para turbinas Bulbo.

Para os geradores verticais a ALSTOM utiliza tecnologia avançada, como por exemplo, elementos oblíquos na carcaça, cruzetas e aranha e sistema de aperto e fixação do núcleo eficiente.

Para os Bulbogeneradores a ALSTOM utiliza a carcaça com os elementos “V” os quais têm a finalidade de prover maior flexibilidade entre a envoltória do bulbo e o núcleo do estator a fim de minimizar problemas de ondulação, ou seja, de “*Buckling*”, e um sistema de aperto do núcleo que proporciona segurança adicional, expandindo de forma uniforme e mantendo o entreferro uniforme.

A aranha do rotor também tem seu projeto baseado nos elementos oblíquos que garantem a expansão mais uniforme do rotor em rotação nominal ou de disparo.

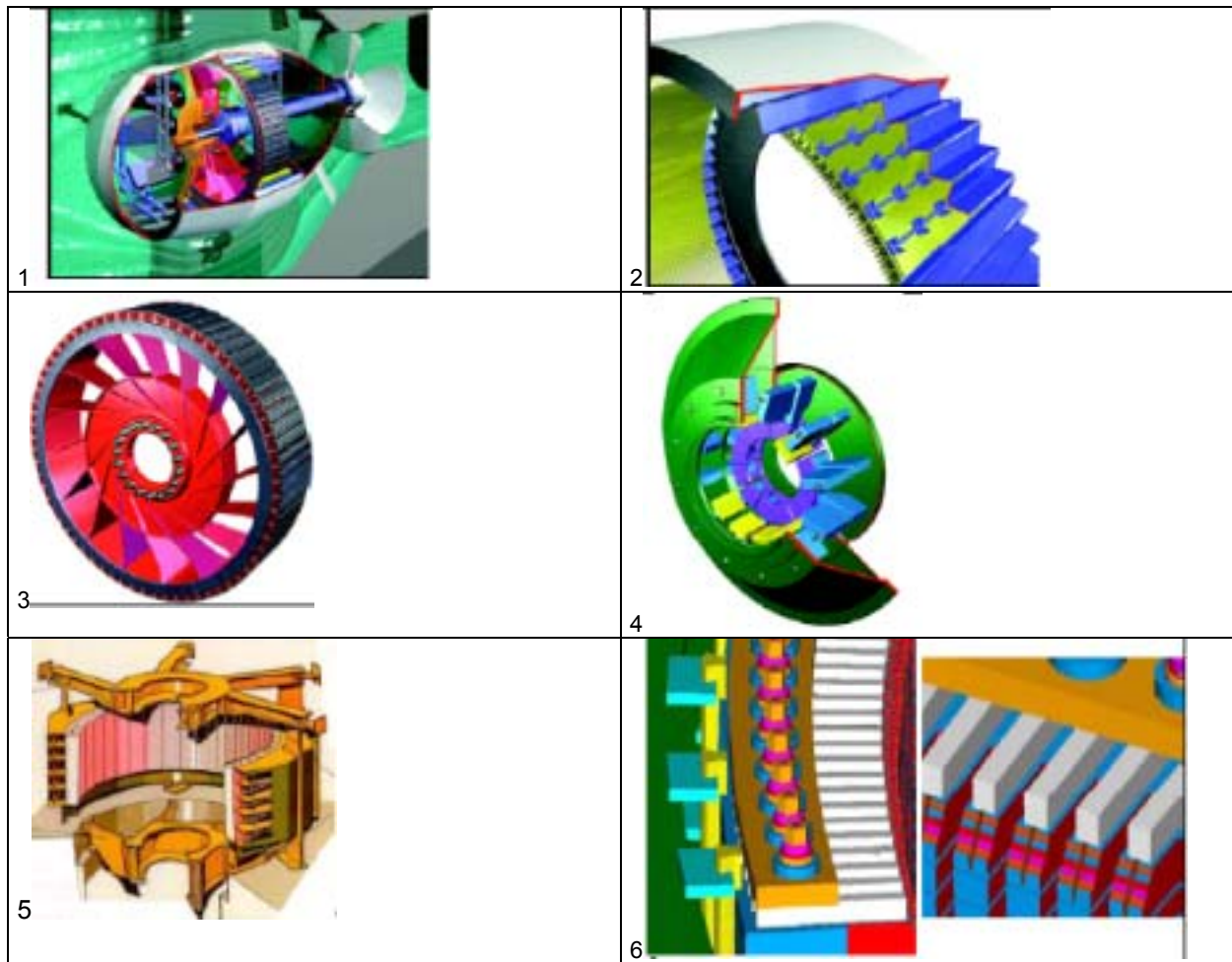


Figura 4: Quadro 1 - Bulbo Gerador / Quadro 2 - Estator de Bulbo com os elementos "V" / Quadro 3 - Rotor do Bulbo / Quadro 4 - Mancal Combinado / Quadro 5 - Gerador vertical com elementos oblíquos / Quadro 6 - Núcleo estator com sistema de prensagem para gerador Vertical e Bulbo.

4.0 - CONCLUSÃO

O emprego de turbinas Kaplan ou bulbo num dado aproveitamento pode significar sua viabilidade ou não, sendo necessário uma análise preliminar cuidadosa e que leve em consideração as vantagens e desvantagens de cada tipo de solução para o caso em questão, assim como as características particulares do aproveitamento.

Para quedas mais baixas, a solução bulbo possui significativas vantagens e sua escolha pode oferecer otimizações e ganhos muito significativos, o que a orienta como solução de base para grande parte dos aproveitamentos de baixa queda onde esta tecnologia possa ser empregada. Da mesma forma, é a solução recomendada quanto se requer a aplicação em modo descarregador, otimizando o vertedouro.

Quanto à qualidade do projeto hidráulico, elétrico e mecânico, estes serão melhores e mais avançados quanto maiores forem os esforços devotados em privilegiar o estudo detalhado e consistente, desenvolvido dentro dos mais recentes avanços tecnológicos e estado da arte, referendado por ensaios de modelo reduzido para usinas de maior porte.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) "Alstom's experience on Bulb units" J.P. Vialle, T. Kunz, F. Gao, L. Tomas, proceedings of the Hydrowater Conference, Beijing, October 2006.

(2) "Multicriteria optimization : viscous fluid analysis – mechanical analysis" F. Mazzouji, M. Couston, L. Ferranco,

F. Garcia, F. Debeissat, proceedings of the 22nd IAHR Conference, Stockholm, June 2004

(3) "Alstom approach for Kaplan turbines design", L. Tomas, M. Traversaz, M. Sabourin, proceedings of the 22nd IAHR Conference, Stockholm, June 2004

(4) "Recent development in bulb design : Chang Zhou case study", L. Tomas, J.B. Houdeline, J. Lei, proceedings of the Hydrovision 2006 conference, Portland, July 2006.

(5) "A New Concept for Bulb Generators applied to the GUIGANG power station", J. Schwanda and D. Schafer

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ricardo Cabral de Vasconcellos

Nascido em Taubaté, Brasil, em 3 de abril de 1971

Graduação (1995) em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI/EFEI) e MBA em Gestão Empresarial (2003) pela Fundação Getúlio Vargas (FGV)

Empresa : Alstom Hydro Energia Brasil Ltda desde 1995

Gerente de Anteprojeto e Orçamento de Turbinas, Service e Marketing Técnico (Alstom Taubaté, Brasil)

Mauro Uemori

Nascido em São Paulo, Brasil, em 28 de maio de 1955

Graduação (1978) em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP)

Empresa : Alstom Hydro Energia Brasil Ltda desde 1979

Gerente de Cálculo Elétrico e Orçamentos (Alstom Taubaté, Brasil)

Laurent Tomas

Nascido em Perpignan, França, em 30 de dezembro de 1969.

Graduação (1992) em Engenharia pela Ecole Centrale de Lyon (França) e PhD (1997) em Matemáticas Aplicadas

Empresa: Alstom Power Hydro desde 1998

Engenheiro da Divisão de Estudos Hidráulicos (Centro de Tecnologia Alstom, Grenoble, França)