



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

FI/GGH/31
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**SISTEMA ATIVO DE ADMISSÃO NATURAL DE AR EM TURBINAS FRANCIS
EXPERIÊNCIA E EVOLUÇÃO**

**Richard Straatmann (*) Edney Loreatto Alexandre Ferretti
ANDRITZ HYDRO INEPAR DO BRASIL SA**

RESUMO

Admissão natural de ar em turbinas tipo Francis é aplicada em diversas situações. Contudo, a aplicação através de válvula tradicional de aeração ou admissão natural de ar, concebida com sistema mola-amortecedor, tem sido criticada pelo elevado índice de manutenção. A partir desta conjuntura, a Andritz Hydro Inepar desenvolveu um sistema ativo de admissão natural de ar em turbinas Francis e já aplicou em alguns projetos. Trata-se de aplicações pioneiras e ainda explorando pouco as potencialidades que um sistema de monitoramento e controle de aeração pode oferecer, contudo já com excelentes resultados sob o aspecto manutenção e adequação operacional.

PALAVRAS-CHAVE

Automação, aeração ou admissão natural de ar, turbinas Francis, hidrelétricas, estabilidade hidráulica.

1.0 - INTRODUÇÃO

Conforme Daniel Accattini *et al.* [1] é notória a importância e o rendimento das turbo máquinas hidráulicas para geração de energia elétrica através de fontes renováveis. Várias empresas tem buscado soluções técnicas para manter ou ainda aumentar o já elevado desempenho e longevidade das turbinas hidráulicas sob condições operacionais cada vez mais exigentes. Atualmente, principalmente devido à crise hídrica, têm sido cada vez mais demandado despacho das unidades geradoras em condições severas de operação com baixas quedas e cargas parciais ou baixas potências. Tais condições são severas em função do comportamento hidráulico e suas consequências que podem ser danosas à unidade geradora.

De acordo com Peter Stein *et al.* [2], o escoamento no tubo de sucção de turbinas Francis, em carga parcial, desenvolve um padrão de escoamento rotacional instável, conhecido como vórtices do tubo de sucção, que causam pulsações de pressão na turbina (tradução livre do texto original "*At part-load operation the flow in the draft tube of Francis turbines develops an unsteady rotating flow pattern, the so-called draft tube vortex, which causes pressure pulsations in the machine.*"). Tais instabilidades se constituem justamente num dos mais comuns fatores que limitam a potência mínima do campo operacional das turbinas Francis, seja por questões das consequentes flutuações de potência, fadiga dos componentes mecânicos afetados ou ainda erosão no tubo de sucção. Diferentemente das turbinas Francis que possuem simples regulação (apenas as palhetas diretrizes), as turbinas Kaplan não desenvolvem tais vórtices e instabilidades com a mesma importância devido possuírem dupla regulação (palhetas diretrizes e pás do rotor). Por outro lado, as turbinas tipo Hélice, também conhecidas como Propeller, apesar de alguma semelhança com as turbinas Kaplan, as mesmas são de simples regulação e, portanto, são afetadas de forma muito semelhante pelos problemas oriundos dos referidos vórtices do tubo de sucção.

Dentro do contexto apresentado, a aeração ou admissão natural de ar tem demonstrado ser um eficiente aliado para eliminar ou mitigar as consequências de diversas instabilidades indesejadas ou não aceitáveis em turbinas hidráulicas. Dentre as principais aplicações da injeção de ar em condições operacionais não transitórias, é possível destacar: *i)* Absorção do ruído do fluxo, *ii)* Dissonância de oscilações ressonantes ou auto excitadas, *iii)* Alteração de padrões de escoamento instáveis (vórtices helicoidais) no tubo de sucção, para padrões mais estáveis, *iv)* Amortecimento de ondas de choque produzidas pelo colapso de cavidades (ou volumes) formadas no interior de vórtices, *v)* Redução do impacto de alguns tipos de cavitação sobre o rotor e *vi)* Aumento do nível de oxigênio dissolvido na água. Nestes termos já são evidentes que as vantagens mais importantes da aeração são no sentido de aumentar a vida útil e de aumentar a faixa operacional devido, respectivamente, à diminuição da amplitude das excitações hidráulicas indesejadas e daquelas não aceitáveis.

Contudo, a aplicação das válvulas de aeração têm algumas desvantagens. Aspectos, por exemplo, referente a rendimento foram abordados por Daniel Accattini *et al.* [3]. Nas melhorias apresentadas a seguir foram abordados outros aspectos como de manutenção com efeito sobre o índice de disponibilidade da unidade geradora e otimização da aplicação da aeração com efeito sobre o rendimento da turbina.

2.0 - EXPERIÊNCIA E EVOLUÇÃO DO PROJETO

O sistema de aeração tem sua atuação baseada no funcionamento de uma válvula instalada no topo do eixo da unidade geradora cujo possui um furo até o rotor da turbina por onde então entra o ar devido a baixa pressão em determinadas condições operacionais.

Tradicionalmente esta válvula é projetada com a concepção de mola com amortecedor, sendo que uma vez regulada a mola, a abertura da válvula se dá à medida que a pressão de sucção da turbina é suficiente para tal. A lógica é simples e eficaz para amortecer as instabilidades hidráulicas em baixa carga. Mas quando a potência de geração e a pressão no rotor estão próximas do ponto de abertura ou de fechamento da válvula, há um efeito dinâmico, geralmente bastante intenso, de abrir e fechar repetidamente a mesma, causando acelerado desgaste e fadiga dos elementos móveis da válvula. Diz-se que a válvula fica batendo, justamente devido às instabilidades hidráulicas iminentes a serem combatidas. A consequência desta situação é naturalmente uma baixa vida útil dos componentes afetados e elevado índice de manutenção. Nas Figuras 1 a 4 pode-se ver algumas fotos da manutenção da válvula tradicional da UHE de Salto do Rio Verdinho.

Para mitigar os problemas de relativa pequena vida útil desta válvula, foi desenvolvido um sistema que impede que a válvula fique batendo, mas que também ao mesmo tempo fosse confiável e seguro. Em parceria com fornecedor de componentes pneumáticos e automação, foi concebido um projeto robusto e que, mesmo em condições adversas, pudesse garantir o fechamento da válvula para evitar a possibilidade de vazamento de água pela mesma. Nas Figuras 5 a 8 pode-se ver algumas fotos do comissionamento do sistema pneumático e de controle. Este desenvolvimento foi muito bem sucedido e foi publicado na edição número 69, de julho de 2014, da revista festo.atual, na seção de aplicações, páginas 4 a 6. Veja a publicação na íntegra através deste link: <https://drive.google.com/file/d/0B8s9LUzsp8ppWXg3U0V5ZmJqQ2M/view?usp=sharing>



Figura 1 – Válvula antes da manutenção



Figura 2 – Válvula aberta – detalhe da bucha desgastada e da mola cansada



Figura 3 – Nova vedação

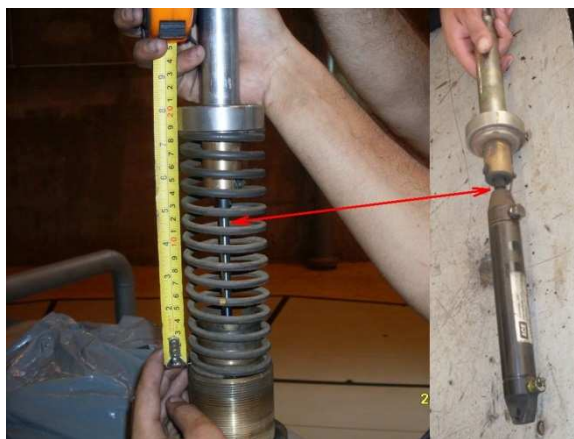


Figura 4 – Ajuste do novo conjunto de mola e amortecedor

O novo sistema automatizado é composto de um cilindro pneumático com trava de segurança conforme apresentado na Figura 5. A trava de segurança foi especialmente instalada para garantir que não haverá abertura involuntária da válvula, mesmo com falta de ar ou falta de energia. Este é um requisito importante para evitar que haja entrada de água na casa de força através da válvula. Contudo, caso haja falta de suprimento de ar, foi adicionado um reservatório junto ao painel, conforme apresentado na Figura 7, para garantir a manobra de fechamento da válvula em situações adversas. Eletricamente o painel do sistema é preparado para ser alimentado por duas fontes de energia, a principal e a reserva em 125Vcc, garantindo seu funcionamento assim como normalmente é feito para os demais painéis de instrumentação da usina.

A lógica programada para abrir e fechar a válvula é baseada principalmente na informação de abertura do distribuidor ou de potência do gerador. Através deste parâmetro o CLP (veja Figura 6) comanda a válvula de tal forma que apenas quando ha baixa pressão, ou seja, sucção de ar pelo eixo da turbina, é que a mesma abre, cobrindo não apenas condições contínuas de operação mas também manobras e condições transitórias.

A confiabilidade do sistema é elevada não apenas pela simplicidade da aplicação, mas também devido aos criteriosos requisitos de segurança, conforme descrito acima, empregados de forma multidisciplinar ao projeto tanto da válvula propriamente dita quanto do acionamento e controle da mesma. Não obstante, mesmo sendo uma aplicação simples, não há depreciação da flexibilidade de configuração da atuação, mas, ao contrário, os ajustes necessários para se otimizar a atuação do sistema de aeração são fáceis e efetivos.

Durante o comissionamento do sistema, são verificados e ajustados os pontos de abertura e fechamento da válvula. Outra vantagem sobre o sistema tradicional, é que estes ajustes são feitos no CLP do painel de controle sem a necessidade de desmontagem do conjunto da válvula. Pode-se observar nas Figuras 6 e 8 o painel de controle do sistema com a conexão ethernet para programação e ajuste dos parâmetros do CLP.

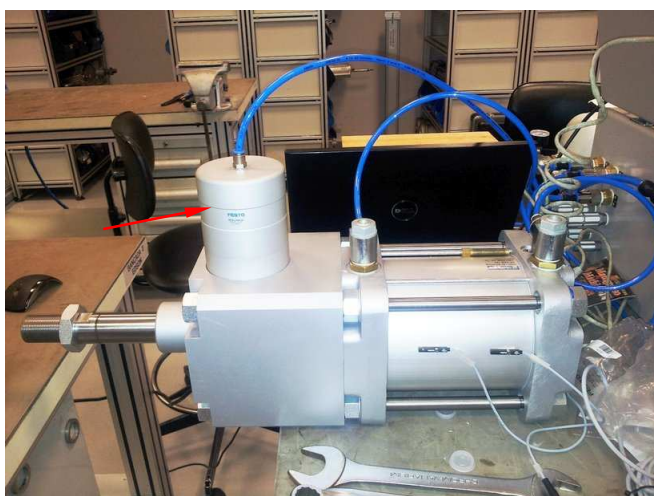


Figura 5 – Atuador com trava de segurança



Figura 6 – Componentes de controle



Figura 7 – Sistema de controle e reservatório de ar

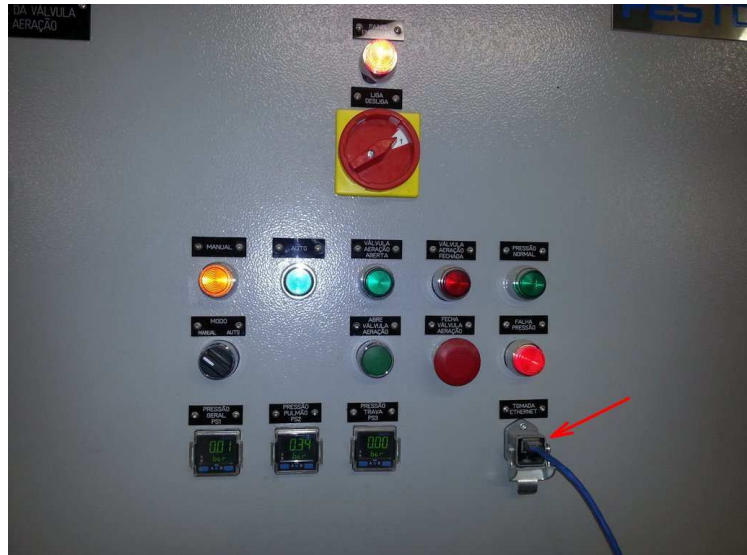


Figura 8 – Painel de controle e conexão ethernet

Uma das maiores vantagens deste sistema é que não há possibilidade da válvula ficar batendo, ou seja, ela atua aberta ou fechada, apenas quando realmente necessário, nunca numa posição intermediária ou instável. Desta forma o problema com as intervenções necessárias devido desgaste ou até mesmo quebra de componentes foi totalmente resolvido.

Adicionalmente às estas vantagens, a programação do sistema para abertura da válvula impede que a mesma seja aberta em alta carga. Isto não é possível com a válvula tradicional com mola e amortecedor, pois não há como impedir a abertura desta quando a pressão no eixo do rotor é baixa. Na Figura 9 podemos observar que tanto em alta carga quanto em baixa carga existem os vórtices que causam baixa pressão, conforme também verificado nas pressões de ar durante operação demonstrado por Alexandre Ferretti [5]. A aeração em alta carga ou vazão é prejudicial tanto para o rendimento (veja Figura 10) quanto para a estabilidade do tubo de sucção se considerado o aumento da vazão a partir do ponto de melhor rendimento do mesmo.

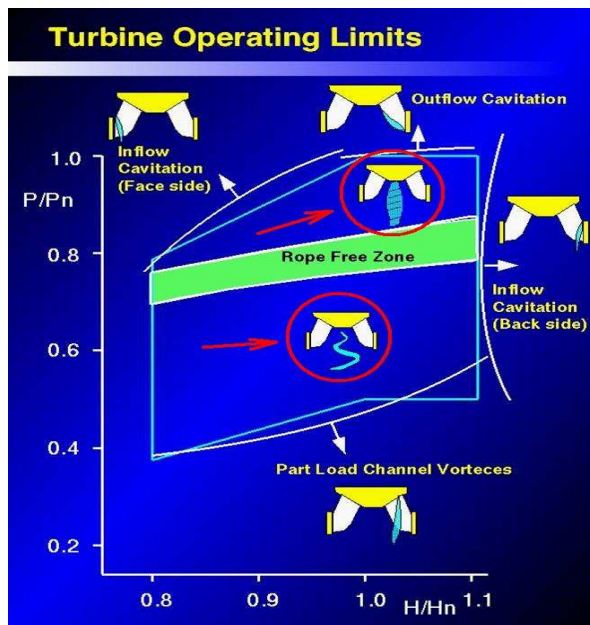


Figura 9 – Vórtices de baixa pressão em alta e baixa carga

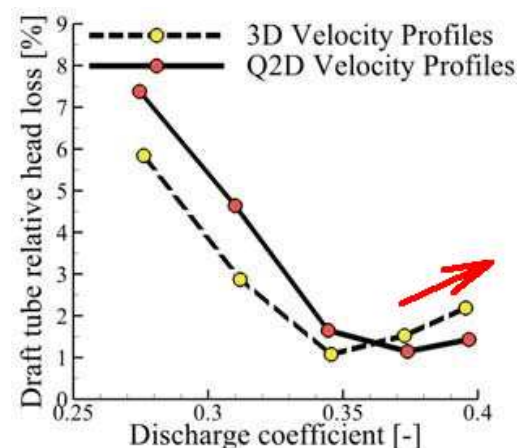


Figura 10 – Perdas no tubo de sucção em função da vazão segundo R Susan-Resiga [4]

3.0 - APLICAÇÃO

A implementação deste sistema ativo de admissão natural de ar em turbinas Francis tem ocorrido tanto em unidades novas quanto em operação. Listamos abaixo algumas referências:

Unidades com o sistema em operação:

- UHE Garibaldi (Figuras 7, 8, 11 e 12):
 - 3 unidades Francis vertical de 64MW com 41m de queda
 - Fornecido juntamente com a unidade geradora
 - Sistema operando desde:
 - Primeira unidade instalada (UG1): Set/2013
 - Segunda unidade instalada (UG2): Out/2013
 - Terceira unidade instalada (UG2): Dez/2013
- UHE Salto do Rio Verdinho:
 - 2 Unidades Francis vertical de 48MW com 40m de queda
 - Substituição do sistema tradicional
 - Sistema operando desde:
 - Primeira unidade instalada (UG2): Set/2013
 - Segunda unidade instalada (UG1): Dez/2013
- UHE Salto:
 - 2 Unidades Francis vertical de 59MW com 40m de queda
 - Substituição do sistema tradicional
 - Sistema operando desde:
 - Primeira unidade instalada (UG1): Set/2014
 - Segunda unidade instalada (UG2): Set/2013



Figura 11 – Sistema de aeração
vista geral da válvula



Figura 12 – Detalhe da válvula
pneumática instalada

O projeto mecânico da válvula, conforme demonstrado por Alexandre Ferretti *et al.* [5], não necessitou muitas mudanças. Sucintamente foi implementado um acoplamento rotativo entre a válvula propriamente dita e o atuador pneumático.

Todas as implementações realizadas, listadas acima, são bem sucedidas e confirmam as vantagens e os benefícios esperados.

4.0 - IMPLEMENTAÇÃO PRÓXIMA

Este sistema ativo de aeração em turbinas Francis não é restrito a modernização ou repotenciação, pois novas unidades geradoras já podem ter incorporado no projeto este recurso que, por sua vez, já pode ter efeito no limite de carga parcial da faixa operativa. Atualmente podemos mencionar dois projetos em fase de implantação:

- Substituição do sistema tradicional:
 - 3 unidades Francis de 60MW com 240m de queda
 - Previsão de entrada em operação da primeira instalação: primeiro semestre de 2015
- Fornecimento* em nova UHE (exportação):
 - 2 unidades Francis de 40MW com 53m de queda
 - Previsão de entrada em operação da primeira unidade: primeiro semestre de 2016

* Nesta UHE está sendo implementado também sistema de aeração e injeção de ar em vários pontos estratégicos, controlados automaticamente, com a finalidade de atenuar as perturbações e excitações hidráulicas de forma otimizada.

O segundo projeto mencionado acima aplica diversas formas de aeração com efeito para diminuir não apenas instabilidades, mas também diferentes fenômenos hidráulicos nocivos à unidade geradora. Podemos destacar benefícios sobre cavitação, fadiga com potencial efeito positivo em diversos aspectos de operação como vida útil dos componentes sujeitos à solicitações mecânicas dinâmicas, índice de disponibilidade para geração, custos de manutenção, ruído com possível efeito no índice de insalubridade do ambiente próximo ao rotor da turbina, dentre outros.

Este projeto vislumbra aumentar os efeitos positivos da injeção de ar e reduzir os efeitos negativos. O novo sistema faz uso de sensores e atuadores, que tem sido continuamente melhorados, e de lógicas de controle para se buscar o equilíbrio adequado entre todos os efeitos que a injeção de ar poderia acarretar. Resumidamente, para diversos propósitos mencionados anteriormente, o novo projeto prevê que o ar poderá ser admitido naturalmente ou injetado (aeração forçada) ao escoamento em diferentes regiões conforme apresentado por Daniel Accattini *et al.* [1].

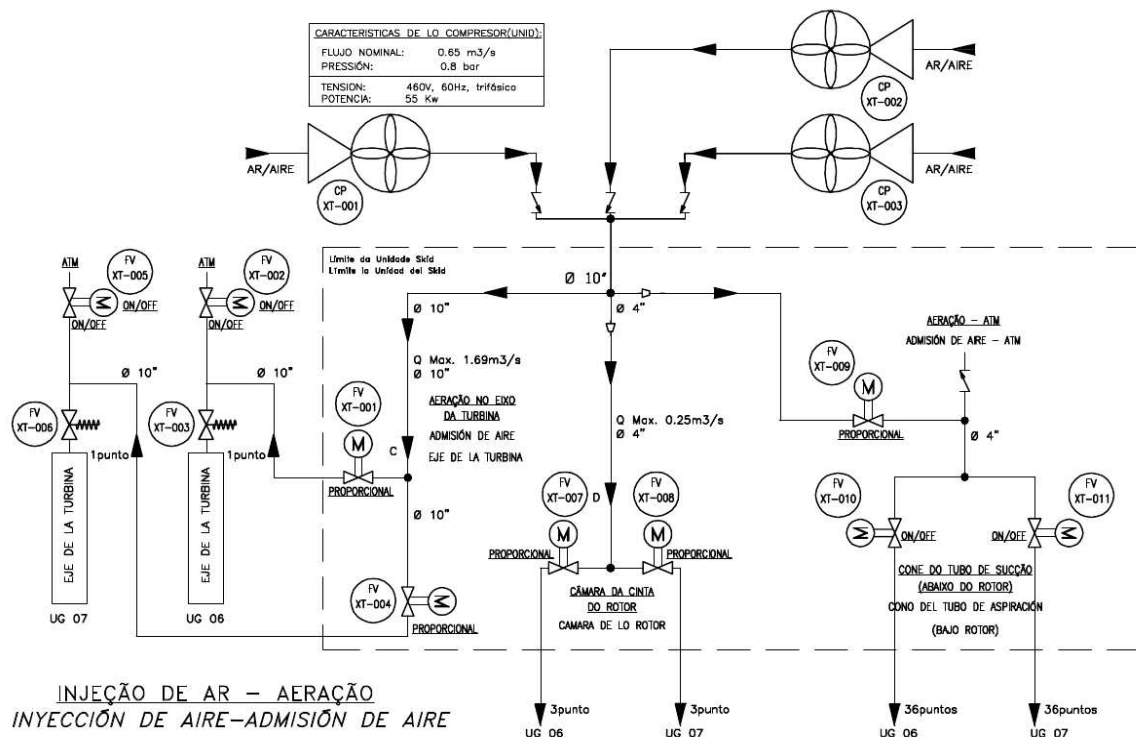


Figura 13 – Diagrama de controle para múltiplos pontos com admissão e injeção de ar em duas unidades

O sistema de controle será programado para escolher o melhor local de aeração, bem como a quantidade adequada de maneira autônoma. Este sistema está integrado ao fornecimento de nova UHE (exportação) mencionado anteriormente, contando com vários pontos de aeração natural e forçada. Na Figura 13 apresentamos o diagrama de controle previsto para atuar nas duas unidades geradoras novas.

5.0 - CONCLUSÃO

As melhorias em vários aspectos relacionados à aeração em turbinas Francis são evidentes. Os casos de sucesso apresentados, a redução de manutenção, a flexibilidade de configuração, a redução das perdas, e os trabalhos em parceria com fornecedores e clientes, falam por si.

É notória a constante evolução dos componentes disponíveis no mercado, nacional e internacional, para automatização de processos. Esta evolução não é apenas referente à variedade ou capacidade dos componentes, mas também custo, qualidade, confiabilidade, flexibilidade, disponibilidade, e facilidade de aplicação. Isto tem colaborado sensivelmente para a melhoria de diversos processos em diversas áreas, até quebrando paradigmas, sem detrimento da segurança que por vezes chega a melhorar, sendo o caso da implementação deste sistema ativo de admissão natural de ar em turbinas Francis. O aumento da segurança não é resultado apenas do menor índice de manutenção, mas também devido à própria concepção do sistema com trava.

Confirmados, portanto, a eficiência e a eficácia dos sistemas básicos de admissão natural de ar automatizados, novos avanços estão acontecendo conforme os projetos em andamento descritos, os quais explorarão outras possibilidades e vantagens já mencionadas da aeração, seja natural ou forçada. Pode-se até antever uma aceleração destes avanços face à conjuntura hidrológica e consequente necessidade de operação em condições adversas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Daniel Accattini, Christian Naaktgeboren, Edney Loreatto, Richard Straatmann, Alexandre Ferretti – Sistema de Controle Ativo para Injeção de Ar em Turbinas – 22º SNPTTE, Brasília-DF, Outubro de 2013.
- [2] Peter STEIN, Mirjam SICK, Peter DOERFLER, Peter WHITE, André BRAUNE – Numerical simulation of the cavitating draft tube vortex in a Francis turbine – 23rd IAHR Symposium, Yokohama, October 2006.
- [3] Accattini, D., Loreatto, E., Ferretti, A., Guedes, F. - Effectiveness of Air Injection Control System Applied for Francis Turbines Model Test, HydroVision Brasil, Rio de Janeiro / RJ – Brasil, 2012.
- [4] R Susan-Resiga, S Muntean, T Ciocan, T de Colombel P Leroy – Surrogate runner model for draft tube losses computation within a wide range of operating points – 27th IAHR Symposium, 2014.
- [5] Alexandre Ferretti, Daniel Accattini, Edney Loreatto, Ricardo Moretto, Richard Straatmann – Sistema Inteligente de Controle de Aeração em Turbinas Francis – XV ERIAC, Foz do Iguaçu, Maio de 2013.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Alexandre Ferretti é gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da Andritz Hydro Inepar. Coordena as áreas de *design*, CFD e Laboratório.

Edney Loreatto é responsável pela coordenação da engenharia de instrumentação da Andritz Hydro Inepar, que inclui o desenvolvimento de novas soluções aplicadas às unidades geradoras.

Richard Straatmann é o gerente do Laboratório de Ensaio de Modelo Reduzido de Turbinas Hidráulicas da Andritz Hydro Inepar. Previamente era responsável pelo design de rotores de turbinas axiais na empresa.