



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

GGH 24  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO I**

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

#### **DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS PARA A ELIMINAÇÃO DA ORIGEM DE TRINCAS EM PRÉ-DISTRIBUIDORES: A OTIMIZAÇÃO DA UHE CAPIVARA**

**Fumio Kurihara (\*)**

**Hans Poll(\*\*)**

**Derli Dias(\*\*)**

**Humberto Gissoni (\*\*)**

**\*DUKE ENERGY GERAÇÃO PARANAPANEMA S.A. \*\* VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION**

## **RESUMO**

Durante o ano de 2006, a Duke Energy Geração Paranapanema e a Voith Siemens Hydro promoveram um diagnóstico definitivo do comportamento dinâmico das travessas do pré-distribuidor da UHE Capivara.

O desenvolvimento técnico no projeto de pré-distribuidores e a evolução tecnológica na instrumentação e aquisição de dados proporcionaram a oportunidade de conhecer em detalhes o comportamento das unidades geradoras dentro da faixa operativa. Isto permite definir eventuais áreas críticas e as evitar, resultando em uma operação mais suave e segura, ao mesmo tempo em que reduz o desgaste e o número de paradas para eventuais reparos. Foi possível também eliminar a histórica incidência de trincas nas travessas do pré-distribuidor através de uma nova campanha de medição e de ações executivas que otimizaram o as travessas do pré distribuidor.

Este trabalho mostra o desenvolvimento da técnica, o plano de ação para implementação e os resultados obtidos.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Trincas, Pré-Distribuidor, *Strain Gages*, Análise de Dados Dinâmicos, Perfil Hidráulico

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

As 04 unidades geradoras da UHE Capivara entraram em operação comercial entre os anos de 1976 e 1978. As unidades geradoras 01, 02 e 04 têm uma potência de 152 MW na saída do gerador, enquanto que a unidade geradora 03 possui 163 MW. Desde a 1ª inspeção contratual, após menos de 3.000 hs de operação, foram detectadas trincas nas travessas, que chegavam, em alguns casos, a 600 mm de comprimento. As trincas se concentravam, em geral, nas travessas 16 a 23, aparecendo em todas as unidades geradoras tanto na parte superior quanto na parte inferior da aresta de saída. Devido à incessante repetição de trincas, o fabricante original realizou, em 1987, ensaios dinâmicos nos pré-distribuidores e diagnosticou a ocorrência de ressonância em algumas travessas sob determinadas vazões. A aresta de saída foi então modificada com o intuito de eliminar este fenômeno.

As modificações implementadas, entretanto, só retardaram o aparecimento de novas trincas. Em 2003, por exemplo, foram detectadas trincas significativas tanto em tamanho como quantidade. Mesmo com condições de soldagem controladas, as trincas reapareceram. Isto levou à conclusão que seria necessária uma investigação da causa raiz das trincas, com a execução de um novo perfil hidráulico nas travessas e a realização de ensaios com extensômetros em diversos pontos da faixa operativa.

## 2.0 - INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES

A inspeção de 2003 mostrou trincas superficiais de tamanho e localização bastante similares às ocorrências iniciais. A extensão real das trincas, no entanto, só apareceu após o ensaio por partículas magnéticas, já que os ensaios por ultra som e líquido penetrante não apresentaram um resultado tão efetivo.

### 2.1 Matéria Prima

As investigações indicaram que as travessas, fabricadas em aço fundido, possuem vazios em seu interior decorrentes, possivelmente, de falhas durante o processo de fundição. Os constantes reparos na região de união aos anéis superior e inferior acarretaram também tensões residuais nestas regiões.

### 2.2 Projeto Hidráulico

A posição da casa de força, inclinada em relação ao leito do rio, implicou em diferentes comprimentos para cada conduto forçado e em ângulos diferentes para cada caixa espiral. Esta configuração de projeto, também não assegura um escoamento uniforme em todas as unidades.

No projeto original das travessas, a espessura da borda de saída variava de 38 a 44 mm. O fabricante original tentou algumas alterações e em 1987, as travessas 16 a 23 tiveram sua aresta de saída reduzida para 8 mm. A fig. 01 mostra, esquematicamente, as diferenças na borda de saída.

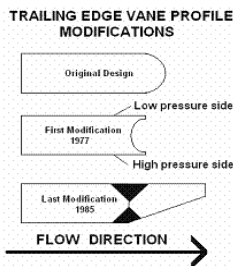


FIGURA 1 - PERFIL DAS BORDAS DE SAÍDA.

- superior: original para todas travessas.
- intermediário: 1ª modificação e atual para algumas travessas de 01 a 15.
- inferior: 2ª modificação (1987) para as travessas 16 a 23.

### 2.3 Projeto Construtivo

O projeto construtivo do pré-distribuidor mostra que a raiz de solda do lado de sucção não tem penetração total e a solda no lado de pressão é só uma solda de canto. Somados a estes fatos, não houve uma preocupação adequada com a execução das soldas, resultando em uma série de defeitos como falta de fusão, mordeduras, inclusões, má limpeza entre passes, etc. A Figura 02 mostra a configuração dos chanfros de solda.

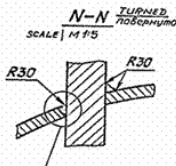


FIGURA - 2 - DETALHE DA SOLDA ORIGINAL

- chapas curvas são os anéis, superior ou inferior, chapa perpendicular é a travessa.
- a solda marcada com círculo é o lado de sucção.
- a outra solda, de canto, é o lado de pressão.

A execução dos reparos com as melhores técnicas de soldagem deveria conferir uma maior resistência e extensão de vida. No entanto, a inspeção de 2005, detectou novamente trincas nas travessas muito semelhantes às historicamente encontradas, conforme mostram as fig. 03 e 04.

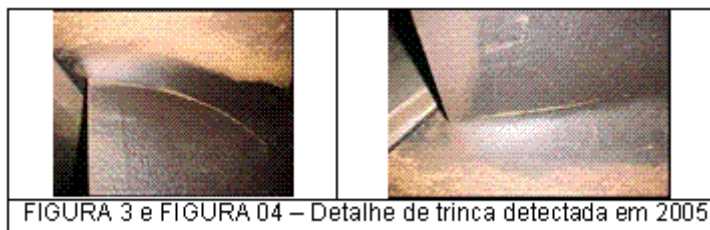


FIGURA 3 e FIGURA 04 – Detalhe de trinca detectada em 2005

## 3.0 - NOVO PROJETO HIDRÁULICO DAS TRAVESSAS

A reincidência das trincas após um ano de operação indicou que as mesmas não tinham origem devida somente à qualidade da soldagem, geometria da solda ou qualidade da matéria prima, uma vez que todas essas variáveis

havam sido focadas e controladas. A análise das causas, então, deveria ser mais abrangente e considerar as demais influências, hidráulicas e/ou dinâmicas que pudessem estar influenciando na ocorrência.

Para isto foi feito um elaborado plano investigativo que contemplava 2 fases de medição com extensômetros nas travessas do pré distribuidor. Após a execução deste plano a Voith Siemens Hydro apresentou uma proposta de modificação do perfil hidráulico das travessas a partir do seu centro até a sua borda de saída, reduzindo a espessura da travessa na aresta de saída com a intenção de reduzir a incidência de trincas. É de se notar que de acordo com este plano, foram realizadas medições de travessas modificadas e não modificadas em diversas situações possibilitando se detectar todas as diferenças de resposta e finalmente a comprovação da eficácia da solução implementada. As Figuras 05, 06 e 07 mostram o cuidado nestas modificações.

Os detalhes deste plano que visou a eliminação da incidência de trincas está descrito pela Duke Energy Geração Paranapanema e a Voith Siemens Hydro nos itens abaixo deste artigo.



### 3.1 Procedimento de Execução

As seguintes definições foram feitas:

- As intervenções ocorreriam nas travessas 16 a 23 do grupo 03, onde as trincas têm maior incidência histórica, e os demais grupos, 01 (travessas 01 a 07) e 02 (travessas 08 a 15) serviriam como referência;
- As travessas deveriam ser instrumentadas com extensômetros (*strain gages*), de maneira a determinar os níveis de esforços, a direção, a frequência e a amplitude, a que estão submetidas as travessas;
- Aquisição simultânea das informações sobre as condições operativas da máquina, como níveis de montante e jusante, potência, rotação, abertura do distribuidor, oscilação do eixo na região dos mancais, pressão na caixa espiral, tampa da turbina e tubo de sucção,
- No mínimo duas fases de ensaios, com dois diagnósticos, de modo a comprovar o acerto nas modificações;
- Os ensaios obedeceriam a rampas de carga pré-determinadas de modo a serem os mais abrangentes possíveis, no que diz respeito às condições operativas;
- A 1ª fase constituiria basicamente na modificação de 03 travessas e a instrumentação destas 03 travessas e outras 02 travessas adicionais. No caso de resultados positivos seria implementada a 2ª fase, em que seriam completadas as modificações no grupo de travessas e validado o processo.

## 4.0 - PROCEDIMENTO DE INVESTIGAÇÃO

O procedimento de investigação se dividiu em duas fases que serão descritas neste item:

### 4.1 Fase 1

Na primeira fase de investigação, as travessas 20, 21 e 22 tiveram seu perfil hidráulico e a borda de saída modificados, foram ainda ensaiadas 8 travessas, compreendendo travessas dos três grupos, a saber:

- Grupo 1: Travessas 4 e 6
- Grupo 2: Travessas 10 e 12
- Grupo 3: Travessas 16,17, 20 e 21

Para a realização do ensaio foram utilizados 03 condicionadores de sinais de 32 canais cada, da marca Lynx - modelo ADS2000, capazes de sincronizar todos os canais e assim adquirir os dados simultaneamente.

Na coleta dos dados foi utilizada uma taxa de aquisição de 1707 Hz com filtro "anti-alias" (passa-baixa) para garantir a fidedignidade dos dados adquiridos.

Na interface de medição foram conectados, basicamente, sensores de deformação (Extensômetros elétricos - *Strain Gages*). Os sinais destes sensores foram então complementados com sinais advindos do regulador de velocidade (RV), a saber, potência, abertura, rotação e vazão turbinada.

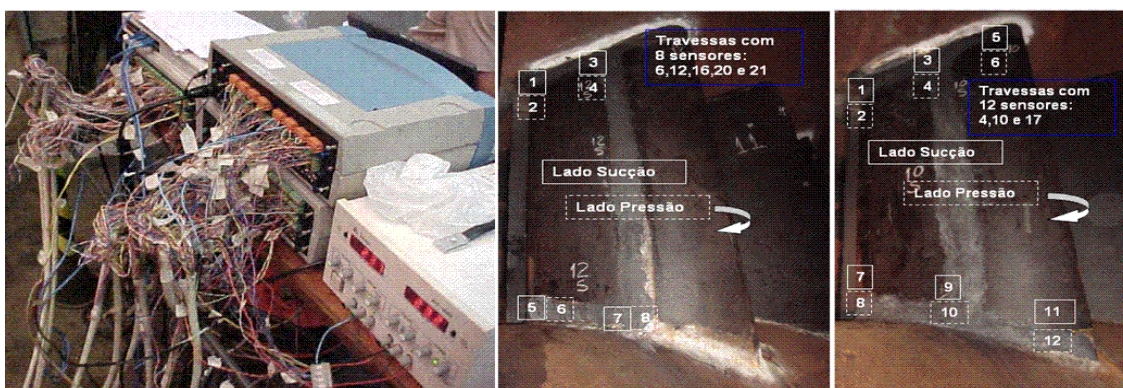


FIGURA 8. Sistema de Aquisição e pontos de medição nas travessas.

O alvo desta fase de investigação foram as travessas do grupo 03, as travessas 16 e 17 tinham perfil da aresta de saída com 8 mm de espessura, enquanto que as travessas 20 e 21 estavam com 3 mm. As travessas do grupos 1 e 2 estavam com perfil de saída em “U”. Este foi o foco principal pois foram as travessas deste grupo que apresentaram ocorrência de trincas.

Um dos objetivos principais era a comparação dos resultados das travessas 16 e 17 com os resultados das travessas 20 e 21. Para tal foi executado um programa de testes na unidade geradora que consistiu de medições em regime permanente para toda a faixa operativa da unidade geradora. Foram feitas medições em faixas de 5 em 5 MW além de quatro rampas de carga, de 0 a 150 MW, assim foi possível traçar o comportamento das tensões nas travessas tanto em regime permanente quanto em transientes de carga.

#### 4.2 Fase 2

Durante a fase 1 de medições foram detectadas ressonâncias consideráveis apenas nas travessas 16 e 17. Travessas 20 e 21 não apresentaram qualquer indício deste fenômeno. O que sinalizava que as modificações haviam sido bem sucedidas. Dessa forma antes da fase 2 de medições, as travessas 16, 17, 18, 19 e 23 tiveram o seu perfil hidráulico corrigido com a borda de saída com 3 mm de espessura. Foram ensaiadas, então, três travessas: 16, 17 e 19. Isto permitiu comparar os resultados das novas medições com os valores encontrados na fase 1 e comprovar a eficácia das modificações efetuadas. Para efeitos comparativos foi utilizado na fase 2 o mesmo programa de testes da fase 1.

### 5.0 - RESULTADOS

Este item mostra os resultados obtidos nas duas fases de investigação.

#### 5.1 Fase 1

Durante a primeira fase de medição não foi constatado nenhum fenômeno importante nas travessas dos grupos 1 e 2 e as tensões encontradas foram baixas. Isso pode ser comprovado na figura 9 que mostra as séries temporais e gráficos de espectro para sensores do grupo 1 e 2. Nos gráficos de espectro os valores no eixo y estão em [uS rms] em função da frequência e potência da unidade geradora. Pode-se observar que os valores para as travessas dos grupos 1 e 2 são baixos e inferiores a 1 MPa sem nenhuma frequência dominante importante.



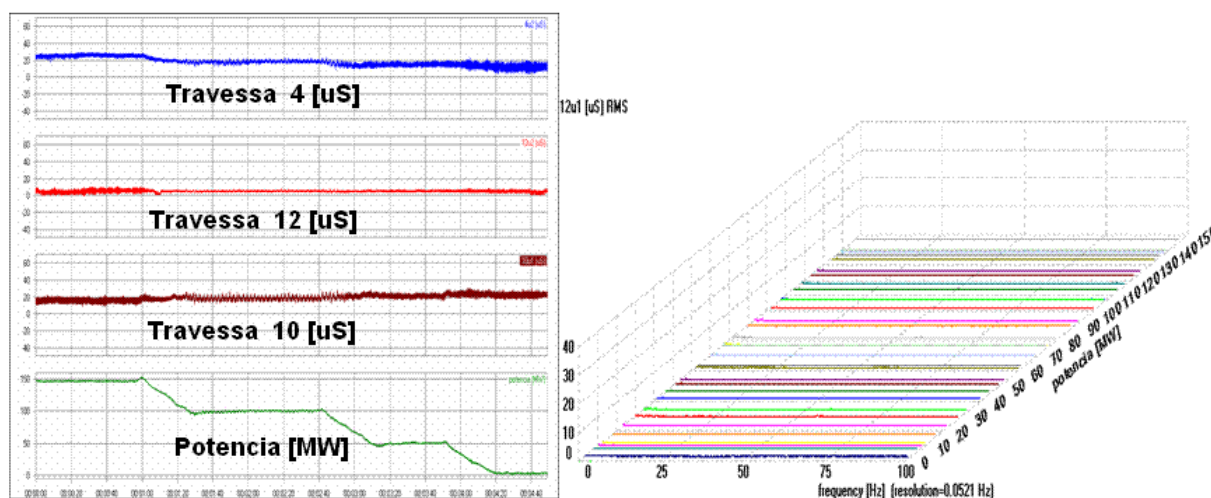


FIGURA 9. Serie Temporal e gráfico de espectro das travessas do grupo 1 e 2

Nas travessas do grupo 3 aparece ressonância do 1º modo torcional na frequência de 95 Hz na faixa de potências correspondentes às vazões de 240m<sup>3</sup>/s a 308m<sup>3</sup>/s ou potências de 75 a 130 MW para a queda bruta medida de H=45,8m. Percebe-se também uma modulação em 2 frequências próximas que se somam durante o fenômeno de ressonância. Notar que os gráficos das figuras 9 e 10 estão com as mesmas escalas para efeito de comparação.

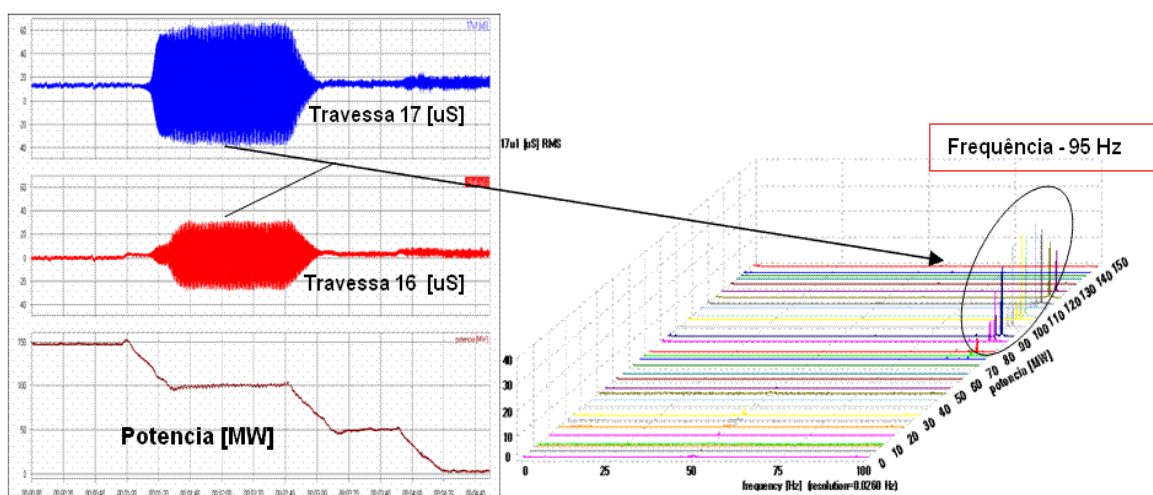


FIGURA 10. Serie Temporal das travessas do grupo 3

## 5.2 Fase 2

Na segunda fase do diagnóstico, como já mencionado, foram ensaiadas somente as travessas 16, 17 e 19, com o objetivo de avaliar se a mudança de perfil na aresta de saída destas travessas foi efetiva. A figura 11 mostra a comparação entre as duas fases com base nos espectros de frequência obtidos. Observa-se que a ressonância presente na fase 1 (95 Hz) desaparece na fase 2. Para efeito de comparação das amplitudes, os gráficos da figura 11 foram impressos na mesma escala.

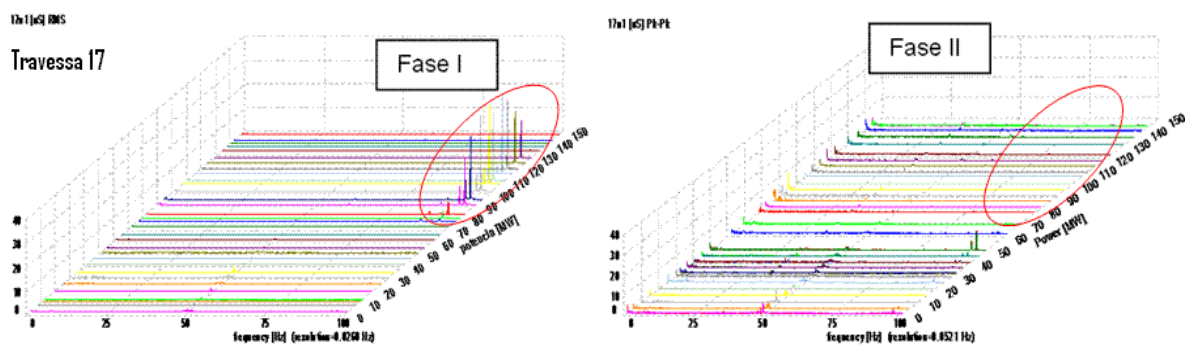


FIGURA 11. Comparações Fase 1 versus Fase 2 - FFT

## 6.0 - CONCLUSÕES

### 6.1 Fase I

Nas travessas do grupo 1 não foram identificadas ressonâncias significativas na faixa excursionada. Eventuais melhorias ou modificações não estão previstas para este grupo de travessas.

Nas travessas do grupo 2 há uma possível ressonância do 1º modo flexional nas frequências de 58 a 60 Hz em potências, ou aberturas, mais altas. Esses valores são de amplitude baixa. Também não estão previstas melhorias ou modificações para este grupo de travessas.

Há ressonância com o 1º modo torcional das travessas do grupo 3 na frequência de 95 Hz. O fenômeno se manifesta no intervalo de vazões entre 240m³/s e 308m³/s ou potências de 75 a 130 MW para a queda bruta medida de H=45,8m. Percebe-se também uma modulação em 2 frequências próximas que se somam durante o fenômeno de ressonância.

Vale destacar que a travessa 16, do grupo 3, apresentou tensões significativas não apenas no modo torcional, frequências da ordem de 95 Hz, como também no 1º modo flexional, ao redor de 60 Hz.

### 6.2 Fase II

As travessas do grupo 3 cujo perfil da aresta de saída foi modificado tiveram o problema de ressonância solucionado. As amplitudes medidas foram mínimo 10 vezes menores que as encontradas na fase 1 o que refletirá em uma extensão na vida útil das travessas. Os valores obtidos permitem concluir que a modificação foi efetiva.

Ficou claro que o programa de testes e modificações também conduzido pelo fabricante original no passado, apesar das melhorias alcançadas à época, não conseguiu eliminar o problema totalmente. O perfilamento proposto à época não foi suficiente para eliminação do problema. Hoje com técnicas mais modernas de medição foi possível rapidamente se verificar que existia uma considerável ressonância residual nas travessas que pode ser eliminada através de um mais fino aprofilamento da aresta de saída.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) POLL, H.G., ZANUTTO, J.C., PONGE-FERREIRA, “Diagnóstico Dinâmico de Máquinas Francis”, XVIII SNPTEE, Curitiba, Brazil, 2005
- (2) FREITAS, L.T.L., ZANUTTO, J.C., POLL, H.G., “Comportamento Dinâmico de Rotores Francis de Baixa Queda”, Proceedings of the 2nd Power Plant Seminar on Modernization and Rehabilitation, CD, São Paulo, Brazil, 2001.
- (3) GUIDI, L.O., OLIVEIRA, P.J.F., JUNQUEIRA, J.C., “Modificação dos Perfis do Pré-Distribuidor das Unidades Geradoras 1, 3 e 4 da Usina Capivara”, CESP, Brazil, 1987
- (4) LIESS, C. Flow induced stress fluctuations in Stay Vanes of large hydraulic turbines, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOW INDUCED VIBRATIONS, Bowness-on-Windermere, 1987. **Proceedings.** [s.n.].p157-170.
- (5) GISSONI, H.C., “Análise mecânica de vibrações em travessas do pré-distribuidor de turbinas hidráulicas”, Dissertação (Mestrado) - EPUSP, São Paulo, 2005.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Fumio Kurihara

Nascido em São Paulo, SP, em 06 de Fevereiro de 1956.

Graduação (1979) em Engenharia Metalúrgica: EEU Mackenzie – São Paulo

Empresa: Duke Energy Geração Paranapanema, desde 1999.

Engenheiro consultor Gerencia Geral de Produção Engenharia de Manutenção Eletromecânica.

Hans Günther Poll

Nascido em São Paulo em 17 de setembro de 1968

Doutorado (1999): EPUSP: Mestrado (1993): EPUSP Graduação (1990) em Engenharia Mecânica: EPUSP

Graduação em Ciências da Computação: Fatec-UNESP.

Empresa: Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda desde 1989.

Gerente Geral de Engenharia de Produto.

Humberto de Camargo Gissoni

Nascido em São Paulo em 09 de Maio de 1974.

Mestrado (2005) : EPUSP Graduação (1997) em Engenharia Mecânica: EPUSP.

Empresa: Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda desde 1997.

Lead Engineer para Usinas Hidrelétricas

Derli Dias do Amaral Junior

Nascido em São Paulo em 25 de Janeiro de 1978.

Graduação (2002) em Engenharia Mecânica: UNESP-Guaratinguetá.

Empresa: Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda desde 2002.

Engenheiro de Produto.