



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

FI/GGH/11
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

**IMPORTÂNCIA DA ENGENHARIA REVERSA PARA REFORMAS E MODERNIZAÇÕES DE USINAS
HIDRELÉTRICAS E SEUS EQUIPAMENTOS**

**Cornelis J. V. D. Poel Filho (*)
ALSTOM ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA**

**Rubens Marras Filho
ALSTOM ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA**

**Everton Torquato da Silva
ALSTOM ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA**

**Bruno Furlaneto
ALSTOM ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA**

RESUMO

Este artigo fornece uma visão geral das principais características e aplicações relacionadas à engenharia reversa. É dado especial enfoque na utilização desta ferramenta para analisar e buscar oportunidades de melhorias nos equipamentos e passagens de água, com fins de trazer ganhos de eficiência para a turbina. Um estudo de caso real em uma usina hidrelétrica no Chile é apresentado. Nesse caso, a engenharia reversa foi usada para permitir a modelagem 3D desde a caixa espiral até à sucção, incluindo todas as partes intermediárias. Detalhes das medidas, pós-processamento e a aplicação para cálculos de CFD serão abordados.

PALAVRAS-CHAVE

Engenharia-Reversa, Medição-Campo, Modernização, Reabilitação, Ganho-Energético

1.0 - INTRODUÇÃO

Após muitos anos de operação há um envelhecimento natural das peças e sistemas, resultando em uma queda no desempenho das usinas. Desse modo, ao longo dos anos de funcionamento, é necessário investir em manutenções, reparos, revisões, reformas, modernizações se em uma operação adequada, objetivando assegurar que a produção de energia seja mantida igual ou tão próxima quanto possível dos níveis originais. Caso se faça a opção por uma modernização dos ativos, obter-se-á um desempenho acima do original. Em certo momento, realizar uma reforma maior ou modernização pode não ser mais uma opção, e sim uma necessidade para se manter o desempenho da usina hidrelétrica em níveis lucrativos. Ver Figura 1.

Para a modernização de uma única ou várias peças e equipamentos ou da planta como um todo, precisa-se de informação detalhada de todas as partes do escopo em questão. Isso significa conjuntos completos de desenhos incluindo os originais e "as-built" que indicam todas as modificações ocorridas desde a instalação original dos equipamentos e o início da operação da usina. No entanto, é comum que essa documentação não exista ou, se existir, não seja confiável o bastante para ser usada sem verificação contra a condição vigente (atual) dos equipamentos. Para partes até certo limite de tamanho e/ou quando a precisão requerida das dimensões não é crítica, simples medições com instrumentos como paquímetros e micrômetros, entre outros, podem ser suficientes para obtenção dos dados que permitirão a análise e reprojeto necessários à execução das reformas e modernizações pretendidas.

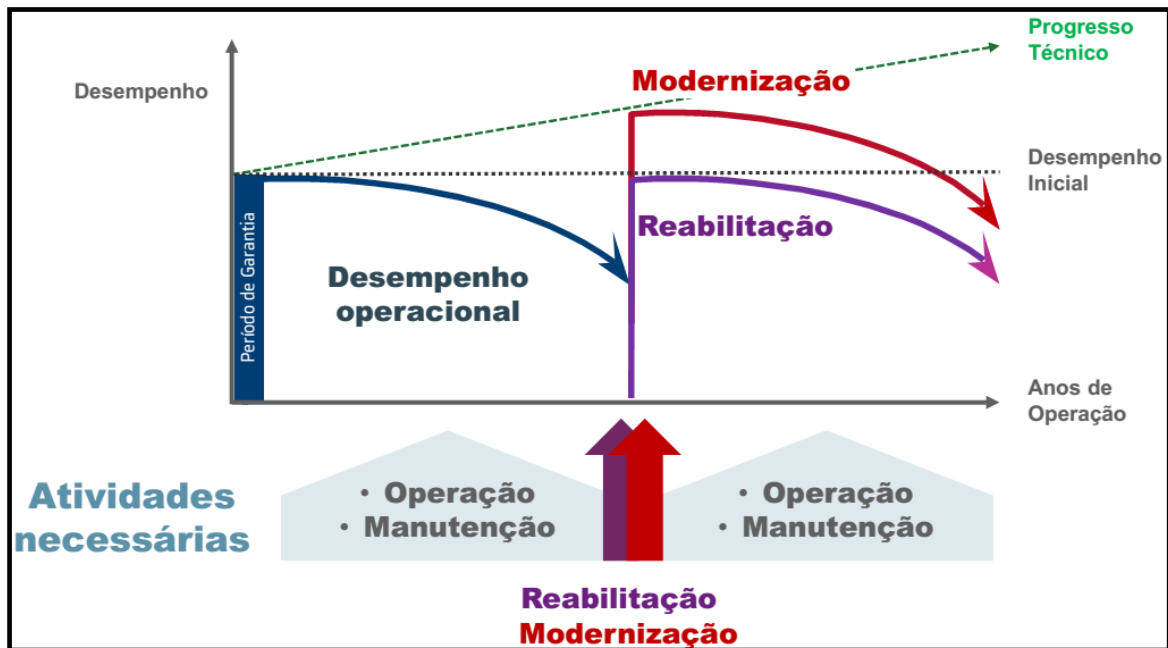


FIGURA 1 – Linha de vida de usinas hidrelétricas.

Quando no escopo dos trabalhos há grandes geometrias ou equipamentos e sistemas mais complexos, e os métodos de medição tradicionais não são mais apropriados, apenas uma engenharia reversa minuciosa tornará possível a aquisição de dados com a acurácia necessária.

Este artigo apresentará as principais características e aplicações relacionadas à engenharia reversa incluindo exemplos reais. Na seção 2 será dada uma visão geral sobre o tema, com informações acerca de suas diversas aplicações em usinas hidrelétricas. Os principais instrumentos utilizados na prática para obtenção de medidas geométricas *in loco* serão abordados na Seção 3. Um estudo de caso de um trabalho de engenharia reversa realizado na Usina de Colbún no Chile será abordado na Seção 4. Trata-se de um serviço para fazer a modelagem 3D desde a caixa espiral até à sucção, para realização de estudos de simulação numérica da dinâmica dos fluidos (CFD – *Computer Fluid Dynamics*) e busca de oportunidades de melhorias nos equipamentos e passagens que possam trazer ganhos de eficiência para a turbina. Por fim, na Seção 5 haverá a conclusão deste artigo.

2.0 - ENGENHARIA REVERSA E SUAS APLICAÇÕES

A engenharia reversa pode ser aplicada a um grande escopo de geometrias. Exemplos incluem turbinas completas, pás, palhetas fixas e móveis, caixa espiral, hidromecânicos e até mesmo equipamentos e arranjos de auxiliares mecânicos e elétricos na usina (*BOP – Balance Of Plant*). A seguir são fornecidos mais detalhes sobre essas diversas aplicações.

- Projetos de reabilitação: levantamento dimensional de componentes reproduzindo-os conforme projeto original, respeitando-se suas tolerâncias de fabricação, de modo a garantir um desempenho ao menos igual ao componente original;
- Verificação dimensional de arestas de rotores, pás fixas e móveis em campo, fontes estas de emissão de vórtices, confrontando os resultados com dimensional original ou com o recomendado para uma hidráulica mais desenvolvida para o projeto existente;
- Projetos de modernização: levantamento dimensional aplicado principalmente às passagens de água, isto é, caixa espiral, pás fixas, pás móveis, rotores de turbina, tubo de sucção, canal de fuga, objetivando uma avaliação do potencial de melhoria dos perfis hidráulicos com aumento de rendimento e potência. Ver Figura 2;
- Arranjo geral de equipamentos na usina: possibilita de forma ágil e acurada avaliar o espaço disponível nas áreas internas da planta, incluindo dimensões e posições dos equipamentos, com o fim de auxiliar no dimensionamento e posicionamento de novos sistemas;

- e. Medição e posicionamento de componentes em fábrica: sejam estes novos ou existentes na planta, auxilia na preparação para o processo de fabricação, minimizando o tempo de máquina parada na própria fábrica e também o tempo total de intervenção em campo. Ver Figura 3 e Figura 4;
- f. Montagem de equipamentos em campo: auxilia no posicionamento de grandes peças, reduzindo-se o tempo de preparação em intervenções civis, e também no controle dimensional e de posição dos componentes principais da Unidade Geradora, durante sua desmontagem e remontagem.

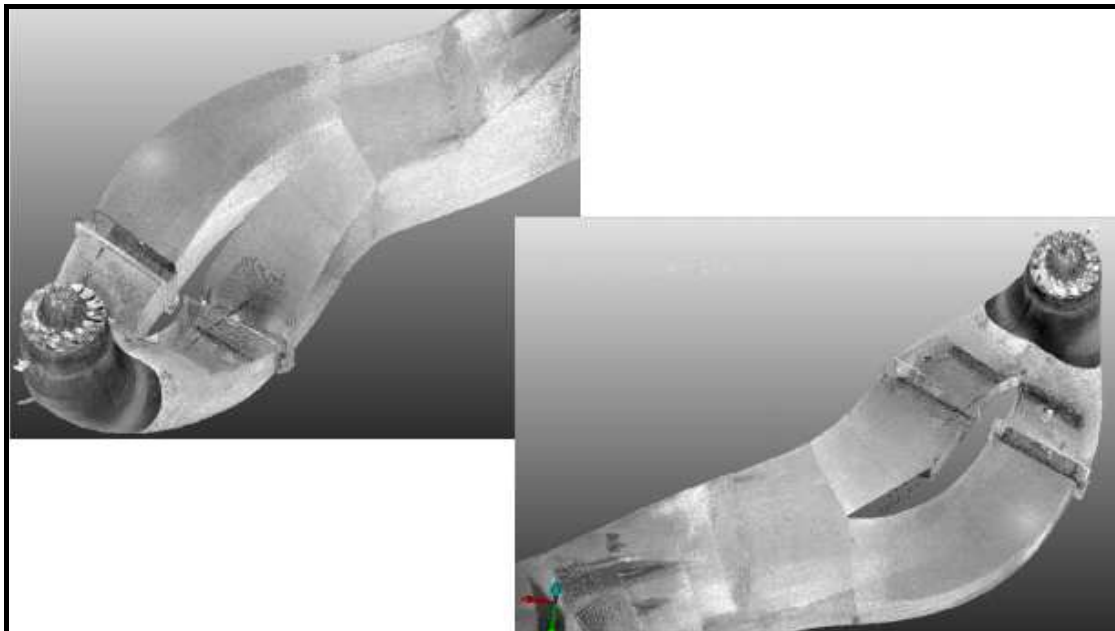


FIGURA 2 – Exemplos de aplicação em passagens hidráulicas (Paulo Afonso), reconstituindo-se a geometria original.

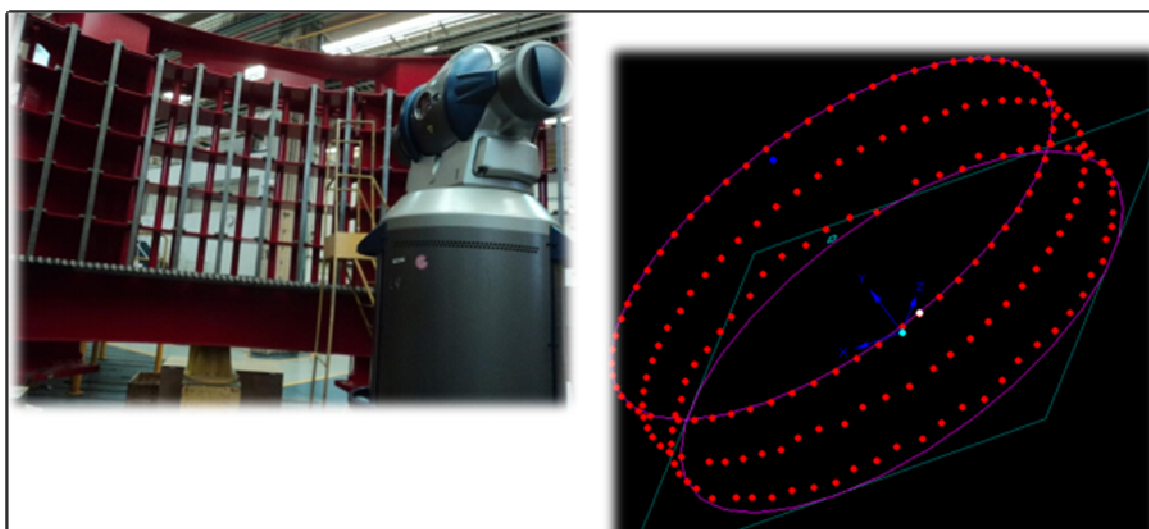


FIGURA 3 – Exemplo de controle antes e durante montagem de Núcleo Estatórico, com a verificação de circularidade da carcaça e empilhamento.

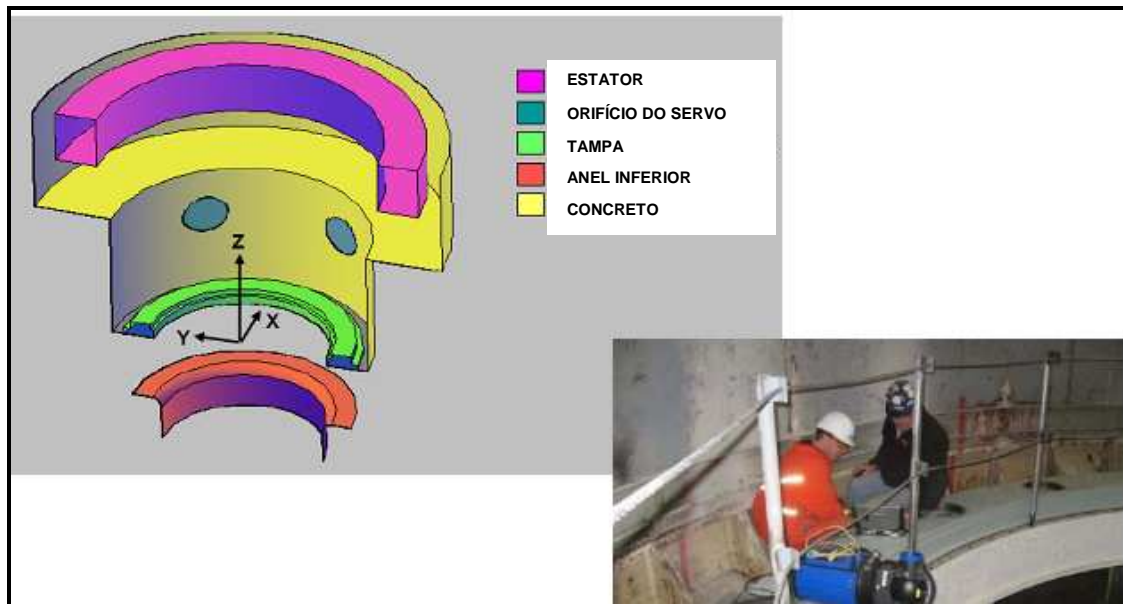


FIGURA 4 – Exemplo de controle da verificação de alinhamento da Unidade Geradora

3.0 - INSTRUMENTAÇÃO TÍPICA

Atualmente se encontram no mercado diferentes tipos de instrumentos para engenharia reversa. A escolha do tipo de instrumento a ser empregado em determinados trabalhos depende diretamente de uma análise envolvendo fatores como: precisão dimensional requerida, acesso ao equipamento a ser medido em campo ou em fábrica, nível de detalhamento superficial requerido, tempo necessário para processamento das informações após a medição, necessidade ou não do desenvolvimento e modelagem da superfície 3D em programas CAD, qualidade requerida para a superfície 3D. Dentre os fatores destacados, o nível de precisão da medição pode ser considerado como o mais importante, e deve ser definido pelo fabricante da peça a ser medida. Com a definição correta do equipamento a ser utilizado, evita-se o desperdício de tempo na fase de medição e no processamento dos dados. Em sua maioria, não se torna necessária a medição completa do equipamento, porém esta decisão deve ser tomada também pelo fabricante da peça. A seguir são apresentados exemplos de alguns dos principais instrumentos utilizados e suas características.

3.1 Rastreador a laser

O rastreador a laser consiste de um tripé onde é montado um cabeçote com canhão laser. O laser é programado para seguir uma esfera, a qual possui instalado em seu centro um prisma que reflete o laser à sua origem. Desta forma o canhão laser busca a todo instante a posição da esfera, registrando a distância entre o ponto da peça tocado pela esfera e o centro de coordenadas definido pelo cabeçote. O tripé ainda pode ser deslocado durante a medição possibilitando alcançar outros pontos da peça. Este deslocamento é corrigido e controlado através da mudança do centro de coordenadas. O resultado final da medição é uma nuvem de pontos, exportada para um software CAD para visualização e processamento dos resultados.

A Tabela 1 mostra as principais características desse equipamento e a Figura 5 traz uma representação esquemática de seu funcionamento.

Tabela 1 – Características principais do rastreador a laser

Precisão	0,02 mm
Intervalo de trabalho	40 m
Massa do cabeçote aproximada	9 kg
Ponto fraco	Não mede o que não pode ser visualizado a partir do canhão laser

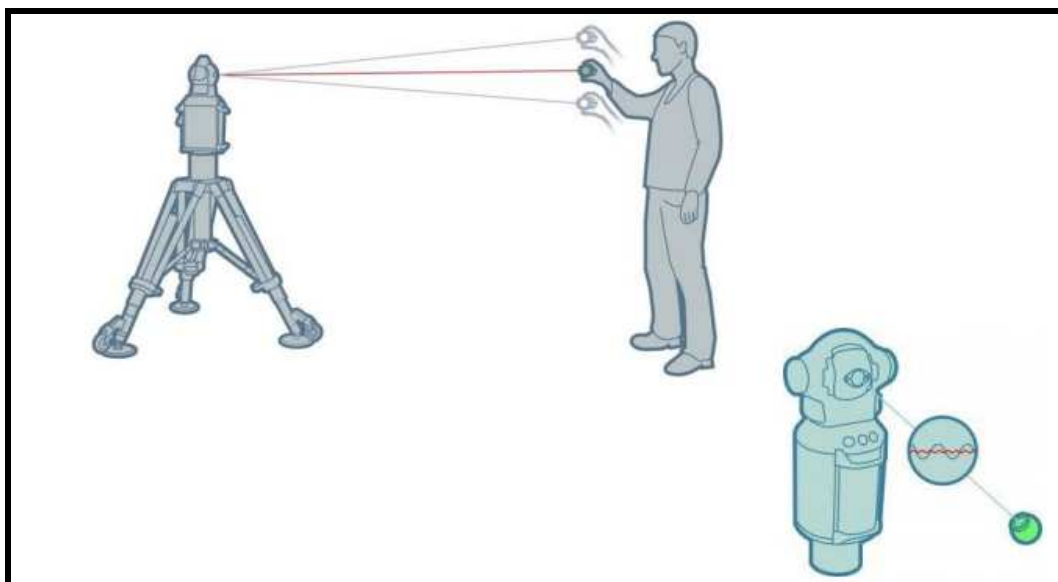


FIGURA 5 – Exemplo de rastreador a laser

3.2 Braço de medição tridimensional

O braço de medição tridimensional é um instrumento portátil, com um braço tri-articulado de base rotativa e um apalpador em sua extremidade. A cada toque do apalpador na peça que está sendo medida, um ponto é gerado no sistema de coordenadas do instrumento. Esta nuvem de pontos posteriormente é exportada para um software 3D para visualização e processamento dos resultados. Na Figura 6 há um exemplo de equipamento em operação e a Tabela 2 traz suas características principais.



FIGURA 6 – Exemplo de braço de medição tridimensional

Tabela 2 – Características principais do braço de medição

Precisão	0,06 mm
Intervalo de trabalho	Dentro do alcance do braço – aproximadamente 1,8 m radial
Massa do braço aproximada	9 kg
Ponto fraco	Intervalo de trabalho limitado

3.3 Scanner

O scanner tridimensional tem como princípio de funcionamento o pulso de laser sobre a peça a ser medida. A reflexão do laser retorna a sensores capazes de captar a forma geométrica da peça. O equipamento pode ser posicionado sobre um tripé ou manipulado manualmente. Torna-se vantajoso para varrer extensas superfícies de maneira muito rápida se comparado aos outros instrumentos mostrados anteriormente. A Figura 7 apresenta um exemplo de equipamento juntamente com o resultado obtido. Ver a Tabela 3 para principais características do scanner.

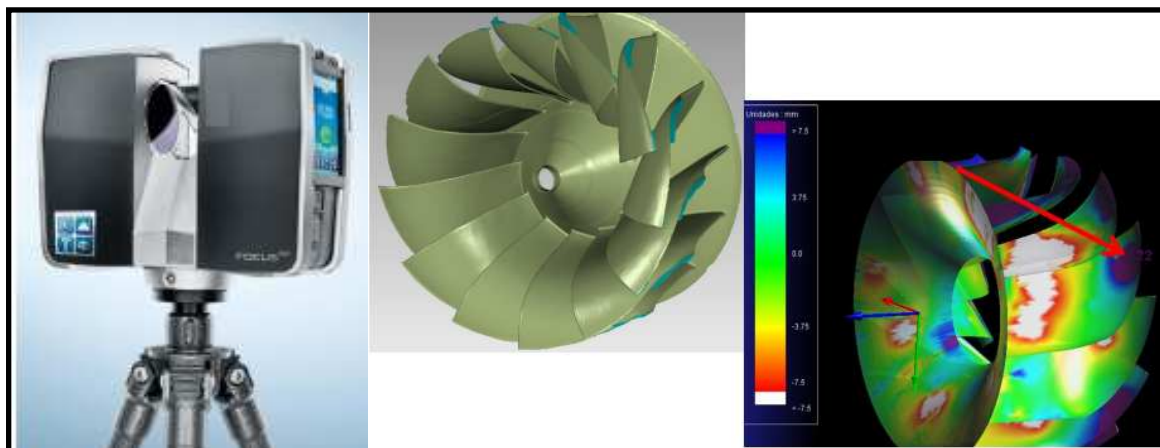


FIGURA 7 – Exemplo de aplicação de scanner 3D

Tabela 3 – Características principais do Scanner 3D

Precisão	0,5 a 2 mm
Range de trabalho	120 m
Massa do cabeçote aproximada	5 kg
Ponto fraco	Não mede o que não pode ser visualizado a partir do canhão laser

4.0 - ESTUDO DE CASO – COLBÚN

O trabalho desenvolvido na Planta de Colbún foi o de realizar medições nos equipamentos relacionados à turbina, visando um levantamento geométrico que permitisse construir modelos 3D representativos da geometria real dos equipamentos e passagens d'água, desde a caixa espiral até à sucção. A necessidade da engenharia reversa ocorreu pelo fato de haver pouca documentação disponível e mesmo os escassos desenhos existentes não continham informações claras com grau de confiabilidade que permitissem seu uso para uma modelagem 3D. O propósito dos modelos 3D era possibilitar a realização de estudos computacionais para verificação do potencial de ganho energético para o projeto original.

4.1 Processo

Todo o processo desenvolvido pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Avaliação preliminar dos dimensionais básicos e de operação da Unidade Geradora;
- Avaliação das informações geométricas de passagem de água disponíveis na planta;
- Cálculo preliminar do potencial de ganho energético sobre o projeto hidráulico original, já considerando uma atualização das condições de operação da planta;
- Determinação das superfícies que deverão ser digitalizadas em campo, com base na avaliação da documentação original disponível para consulta;
- Especificação das tolerâncias admissíveis para cada região a ser digitalizada;
- Escolha dos instrumentos a serem utilizados para as medições;

- g. Elaboração do cronograma dos trabalhos e programação da visita ao campo;
- h. Medições em campo e avaliação em tempo real das geometrias geradas;
- i. Retorno ao escritório e desenvolvimento das superfícies hidráulicas em ambiente CAD;
- j. Simulação numérica CFD do fluxo com a geometria existente;
- k. Avaliação dos resultados e implementação de melhorias nas geometrias existentes;
- l. Simulação numérica com a geometria revisada;
- m. Cálculo do ganho energético, em função da forma de operação da planta.

A Figura 8 abaixo indica de forma geral o tempo aproximado dos trabalhos de avaliação da documentação existente, digitalização das superfícies, tratamento dos sinais e construção das geometrias 3D em formato e qualidade adequada para aplicação em análise CFD.



FIGURA 8 – Distribuição do tempo para geração das superfícies 3D finais

4.2 Medições de campo

O levantamento em campo foi feito aplicando-se scanner 3D. Ver na Figura 9 abaixo, o resultado da digitalização da caixa espiral.



FIGURA 9 – Digitalização da Caixa Espiral

4.2 Resultados

Para a etapa de reconstituição geométrica das superfícies a partir das nuvens de pontos é importante que se desenvolva o trabalho com equipes qualificadas e programas de última geração. Da mesma forma, para as etapas de geração de malha e avaliações em CFD, o conhecimento no âmbito do desenvolvimento em hidráulica permite a obtenção de resultados de simulações numéricas com boa representatividade do funcionamento real da máquina. Ver Figuras 10 e 11.

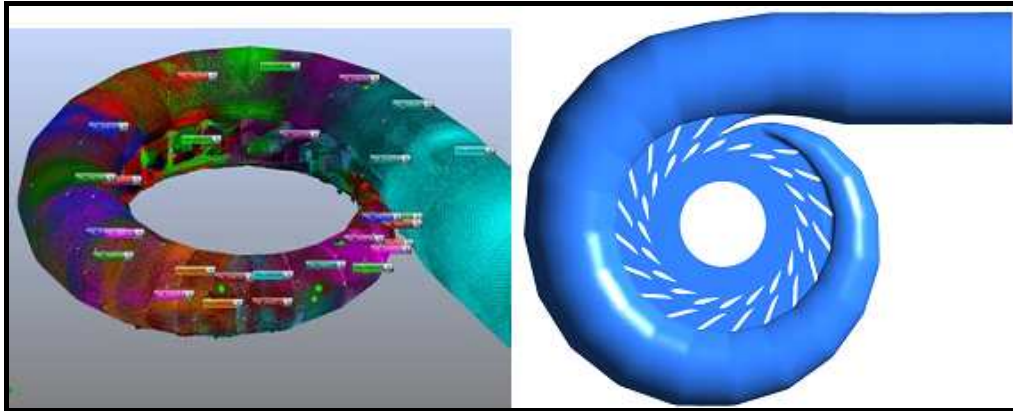


FIGURA 10 – Digitalização da Caixa Espiral e modelo 3D

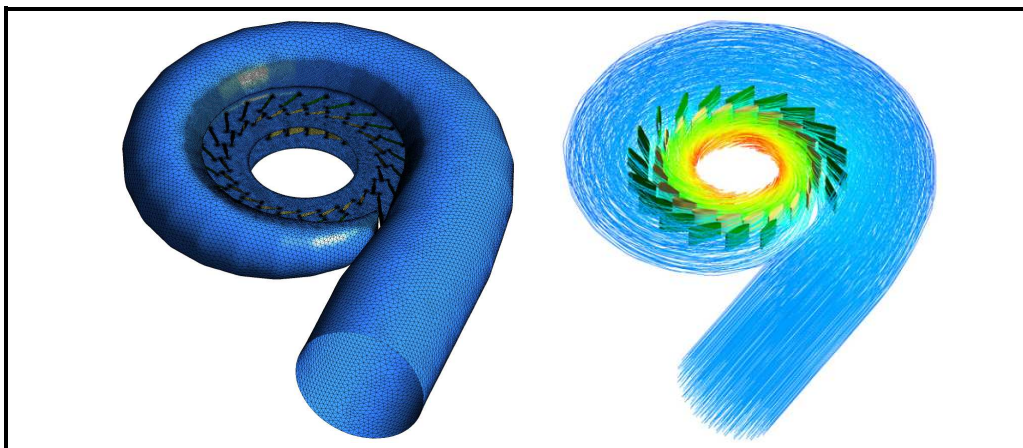


FIGURA 11 – Geração de malha e simulação *CFD*

Este é um caso típico onde sem a engenharia reversa não seria possível reconstruir as geometrias em questão e por consequência, não se poderia os realizar estudos hidráulicos posteriores de forma eficiente e acurada.

5.0 - CONCLUSÃO

A engenharia reversa é muito importante para obtenção de dados dimensionais de usinas hidrelétricas e seus equipamentos. Graças à evolução tecnológica, existem instrumentos e programas computacionais que permitem a reconstrução da geometria alvo de maneira rápida e precisa. As geometrias e posições resultantes de sua aplicação podem ser utilizadas em projetos de reabilitações de peças e equipamentos, modernizações e estudos hidráulicos, entre outros. Tão importante quanto a recuperação de informações, são os critérios técnicos que definem os tipos de ferramentas a serem usadas e os procedimentos corretos durante as medições. Não é suficiente apenas medir e recuperar, mas entender desde o início do processo, todos os detalhes dos trabalhos que seguirão após os levantamentos de campo. Apenas assim poder-se-á conseguir resultados com a qualidade necessária a cada tipo de aplicação.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Numerical Computation of Internal and External Flows – Second Edition – *Charles Hirsch*

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Cornelis J. v. d. Poel Filho nasceu em Campina Grande/PB em 1975. Graduiu-se e realizou Mestrado em Engenharia Mecânica pela UFPB em 1998 e 2000, respectivamente. Em 2005, obteve o título de Doutor pela UNICAMP/Politécnico di Torino (Itália). Possui MBA em Gestão Empresarial pela FGV (2013). Ingressou na indústria em 2005, na divisão de motores e geradores elétricos de média e alta tensão da GE (General Electric). Na GE, passou por várias posições, desde Engenheiro Mecânico calculista até Gerente da Engenharia de Desenvolvimento de Novos Produtos. Desde 2012 está na Alstom Renewable Power. Atualmente, trabalha na divisão de serviços para usinas hidrelétricas, onde acumula as funções de Gerente de Engenharia e Desenvolvimento de Portfolio.</p>
	<p>Rubens Marras Filho nasceu em Pirassununga/SP em 1971. Graduiu-se em Engenharia Mecânica pela USP São Carlos em 1994. Ingressou na indústria em 1995 atuando na área de projeto de máquinas rotativas, com passagem pela indústria automobilística nas áreas cálculo e durabilidade de estruturas. Em 2002 iniciou na Voith Hydro trabalho nas áreas de cálculo e projeto de turbinas, e coordenação de projetos de modernização de hidrogeradores. Desde 2012 está na Alstom Renewable Power, atuando como Gerente de Engenharia de Produto na área de Service e Modernização de Usinas Hidrelétricas.</p>
	<p>Everton Torquato da Silva nasceu em Porto Alegre/RS em 1981. Graduiu-se em Engenharia Mecânica pela UFSC em 2004. Ingressou na Alstom em 2005. Em 2007 obteve Mestrado de Pesquisa em Mecânica dos Fluidos e Transferências, e realizou o Ano de Especialização em Mecânica dos Fluidos Industrial, ambos pelo Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, na França. Na Alstom Brasil desempenhou funções de cálculo mecânico, anteprojeto de turbinas hidráulicas, e estudos de viabilidade de soluções hidráulicas em reabilitações. Na Alstom França desempenhou funções de Pesquisa e Desenvolvimento de Turbinas Reversíveis e Turbinas Kaplan. Desde 2013 integra a equipe do Centro Global de Tecnologia da Alstom no Brasil, onde desempenha funções de Pesquisa e Desenvolvimento em Turbinas Hidráulica.</p>
	<p>Bruno Furlaneto nasceu em São Paulo/SP em 1987. Graduiu-se em Engenharia Produção Mecânica pela Faculdade Anhanguera em 2012. Atualmente especializando-se no setor de Engenharia da Qualidade Green Belt pela UNITAU. Na Alstom desde 2003 desempenhou funções de controle de qualidade nas áreas de usinagem, montagem e inspeção 3D (engenharia reversa, modelagem e criação de malha para cálculos específicos), engenharia de qualidade (utilização das ferramentas FMEA, MSA, 8D). Desde 2014 desempenha função de Encarregado da Qualidade nos setores da Usinagem, linha de produção de palhetas diretrizes e linha de produção de Metrô/Trem..</p>