



Restauración (Rehabilitación) de Plantas Hidroeléctricas Metodología de Alstom y Casos de Estudio

**Jean-Pierre Sungauer
Jefe de Ingeniería de
Productos de Alstom India S.A. Vadodara, India**

**Alejandro Ferretti,
Gerente Técnico de
Alstom Proyectos India S.A.
Vadodara, India**

**Fábio Sá,
Especialista Técnico en Diseño de Generadores,
Alstom Hydro,
Taubaté, Brasil**

**Glenn Ardley,
Gerente de Ingeniería de Generadores
Alstom Proyectos India S.A.,
Vadodara, India**



Introducción

Alstom Power Hydro y sus antepasados, tales como Neyrpic, Brown Boveri Company y ASEA, han sido productores de equipos para Plantas Hidroeléctricas durante más de 100 años. Actualmente Alstom tiene oficinas de ingeniería y fábricas en Norte y Sudamérica, Europa y Asia. En Asia, Alstom cuenta con fabricación de turbinas y generadores de planta Hydros en Tianjin, China y Vadodara, India.

Debido a la edad de las plantas Hidroeléctricas y disponibilidad de materiales, la restauración de turbinas y generadores pueden ser económicamente justificables con base en el incremento de potencia, confiabilidad y disponibilidad, así como la reducción de costos de mantenimiento. Este documento describirá la necesidad por la que las plantas deben ser restauradas y proporcionará un panorama de la metodología de Alstom dirigida a ésta necesidad. Esta metodología será demostrada mediante varios casos de estudio, orientados a la restauración de turbinas y generadores.

Justificación para restaurar una planta de generación

Reparar, Modernizar y Mejorar

El Reparar es la razón más contundente para efectuar una restauración. En muchos casos, la falla o deterioro de un componente provocará que una unidad salga de operación comercial. Ejemplos de esto podrían ser la falla a tierra de una barra del devanado del estator del generador, asociado con daño al laminado del núcleo del estator, un barrido de cojinetes o una erosión profunda de los componentes de la turbina debido a las características del agua. En otros casos el deterioro no es resultado de remover la unidad de servicio, sino de un decremento del rendimiento o a la pérdida de eficiencia. Los ejemplos de esto podrían ser el goteo de orificios, sellos o devanado del estator que está cercano al final de su vida útil. En algunos casos, el equipo requiere de paros para mantenimientos frecuentes, resultando en una reducción sustancial de la disponibilidad de la unidad.

La modernización de un equipo normalmente ocurre debido a los adelantos en tecnología o a la introducción de nuevos materiales y técnicas de cálculos. A menudo, la modernización no puede justificarse comercialmente por sus propios méritos, debido a la necesidad de tener que sacar la unidad generadora de servicio y a menudo, tener que dismantelar la unidad para su restauración. Sin embargo, la modernización puede llevarse a cabo cuando se hace en paralelo con otro trabajo de restauración. Ejemplos de esto podrían ser el cambio de aislamiento a Clase F del devanado de campo del generador durante un paro para rebobinado de estator, reemplazo de la toberas-guía lubricados por grasa por bujes auto lubricados durante al reemplazo el o instalación de nueva instrumentación.



Las mejoras en la unidad de generación son usualmente la razón principal de aprovechar comercialmente la restauración del equipo de la planta, debido al aumento en generación o capacidad más alta de absorber los picos de demanda máxima. Dependiendo hasta dónde los límites de salida existan, si es la temperatura de devanado de campo o diseño, la restauración puede ser implementada con un incremento en la salida hasta de un quince a cuarenta por ciento, sin considerar que se tengan que efectuar trabajos civiles.

Ventajas de una Buena Especificación Técnica

Una buena descripción de la especificación técnica es el primer paso para un proyecto de restauración exitoso. Esta es la manera primaria en que el propietario de la planta comunica cuál es el desempeño de las unidades. Muchas veces hemos visto especificaciones para Restauraciones que no han estado claras; que han provocado que el propietario no consiga los resultados que realmente requiere o han resultado en una costosa post-asignación de cambios de diseño. Algunas veces, la especificación indica una solución del diseño en lugar del criterio de desempeño esperado. De vez en cuando, los requisitos especificados serán mutuamente exclusivos. Una buena descripción de las especificaciones asegura que las necesidades del propietario y expectativas de la planta sean comprendidas por el proyecto. En una especificación, es importante considerar lo siguiente:

- Cuando esté disponible, usar normas internacionales o prácticas de la industria normales. Cuando las normas no estén disponibles, asegurarse que los requerimientos especificados estén basados en la experiencia.
- Especifique el desempeño requerido o cuantifique un incentivo / multa en lugar de requerir una solución de ingeniería específica. Por ejemplo, no especifique grano de acero orientado para el laminado del stator, más bien fije una multa apropiada por altas pérdidas.
- Las herramientas de cálculo hoy son más poderosas que anteriormente y más con respecto al diseño de espacio disponible puede ser analizado. No limitar el diseño de espacio innecesariamente o use el desempeño existente como un parámetro para la Restauración.
- Ensamble y detalles, los dibujos de componentes deben ser proporcionados junto con las especificaciones.
- Los requisitos de la restauración tienen que ser claramente establecidos por lo que se refiere al desempeño operacional requerido y la aceptación de resultados de la puesta en servicio.
- Las leyes físicas no pueden ser cambiados por a la especificación.



Metodología de Alstom para la Restauración de Equipo

Filosofía General

Las diferencias primarias entre el diseño de una nueva unidad generadora y el diseño de la Restauración son las interfaces que tienen que ser consideradas. Es obvio que los nuevos componentes restaurados deben coincidir y deben embonar con los componentes existentes que están siendo reemplazados. Debido a esto, el obtener buenas soluciones para diseños de Restauración, es más difícil que para unidades nuevas.

El espacio disponible para el diseño de una Restauración está determinado por las interfaces. El primer paso es entender los requisitos de Restauración y las interfaces. Normalmente, la especificación no contendrá toda la información detallada sobre las interfaces, por lo que será necesario visitar el sitio. El propósito de la visita es recoger la información para caracterizar la unidad generadora existente y establecer claramente las interfaces. Las actividades específicas durante la visita dependen del alcance de la Restauración, pero en general se requiere lo siguiente.

- Fechas históricas, operacionales y archivos de mantenimiento,
- Resultados de pruebas de desempeño de la puesta en servicio de la unidad o anterior Restauración.
- Acceso a los dibujos del OEM,
- Acceso suficiente a la unidad para efectuar mediciones e inspección visual.

Dependiendo del alcance de la Restauración, la inspección al sitio/inspección puede tomar algunas horas o hasta varios días. Una segunda visita posterior a la asignación del contrato, será obligatoriamente necesaria.

El proceso de diseño tiene dos pasos importantes, la preparación de la oferta antes de la asignación y posterior a la asignación o diseño básico y de detalle. El tiempo disponible para la preparación de la oferta es usualmente corto y no permite estudios profundos de ingeniería. En esta etapa nos enfocamos a obtener información suficiente para establecer los parámetros de garantía y costos estimados del proyecto. Alstom ha desarrollado herramientas de cálculo que pueden hacer esos análisis en el tiempo disponible. Después de la asignación del contrato, nos enfocamos en el diseño básico y estudios detallados de los componentes y sus interfases con el equipo existente. En ese momento una inspección más exhaustiva del sitio se hará necesaria. Cuando sean posible las normas de soluciones de Alstom serán utilizadas para implementar el diseño del proyecto. Sin embargo debido a la naturaleza de la Restauración esto no será siempre posible.



Metodología específica para el Generador

Elaboración de Oferta

El proceso empieza con a la revisión completa de la especificación, la información disponible y para efectuar una visita al sitio. La visita al sitio es crítica para entender la naturaleza única de la máquina y el entorno en el que opera. Para un diseño exitoso es vital contar con las dimensiones exactas y datos históricos del sistema de excitación, temperaturas operacionales y pérdidas segregadas. Las dimensiones críticas serán tomadas de los dibujos del originales y deberán ser verificadas contra mediciones físicas, debido a que no pueden considerarse como datos de “como construidos”. La visita del sitio también propicia la oportunidad para los propietarios de la planta y proveedores de discutir y clarificar los requisitos de la Restauración.

Las herramientas de Alstom para dimensionado y Restauración del generador, son cálculos numéricos y analíticos que han sido incorporados en varios paquetes de software. El alcance de la restauración determina cuál de los paquetes es aplicable a los estudios de diseño, pero el primer paso siempre es efectuado con los cálculos del generador y las herramientas de optimización.

Con la herramienta del cálculo, el generador existente es modelado. Los parámetros para el cálculo incluyen el rango del generador, condiciones de operación, datos geométricos, características de los materiales y experiencia-basada en factores de la correlación. Los requerimientos de los cálculos de la excitación son comparados con los valores medidos, incluyendo las características de apertura bajo condiciones de corto circuito, así el modelo es afinado. De manera similar, las pérdidas segregadas moderadas y la medición de temperaturas son utilizadas para refinar aún más el modelo. Éste es un proceso reiterativo. Cálculos mecánicos básicos son también realizados. Sin embargo, las herramientas del cálculo no reemplazan la experiencia y creatividad del ingeniero de diseño.

Cuando un buen modelo de la máquina existente ha sido alcanzado, algoritmos manuales y automáticos optimizan los componentes a Restaurar. El espacio disponible para el diseño es limitado por los requisitos de las interfaces, pero el análisis puede ser optimizado para el espacio disponible. Un análisis electromagnético de elemento finito se utiliza para verificar los requisitos de cálculo de la excitación. Si el alcance exige, otros paquetes de software son aplicados para hacer cálculos más detallados, mecánicos, chumaceras y ventilación.

Ingeniería Básica y de Detalle

El diseño básico después de asignado el contrato. Los estudios actuales realizados dependen del alcance de la Restauración y la naturaleza de los requerimientos de las interfaces. El alcance más usual para la Restauración es el reemplazo del núcleo y devanado del estator. Frecuentemente esto se da junto con un mejoramiento del generador. En este caso, recomendamos cambiar el aislamiento del bobinado de campo a Clase F. Las interferencias en este caso estarán en la estructura del estator,



el sistema de ventilación, y posible interferencia entre el devanado y el soporte superior y las placas. Un nuevo sistema de fijación y atornillado del estator será necesario. Siempre que sea posible, las normas comunes de diseño de Alstom serán utilizadas para realizar el diseño, pero frecuentemente se requieren diseños específicos para adecuar el diseño a la estructura existente. En el caso de una mejora (incremento de potencia) se realizará un análisis detallado del sistema de ventilación. Si el generador existente ha tenido problemas con el laminado, tal vez se requieran algunas modificaciones para permitir un movimiento radial. En este caso, se podría también requerir reemplazar la estructura.

Problemas en la estabilidad en las toberas de ventilación pueden ser otra causa para realizar una Restauración. Esto se origina cuando la rigidez del estator y del rotor no es adecuada para resistir las fuerzas de un desbalanceo tangencial magnético en el entrehierro. Estas fuerzas se deben usualmente a la excentricidad entre el estator y el rotor, comportamiento elíptico entre ambos componentes. Los estudios de diseño básico se enfocarán en la causa raíz, y entonces, en las soluciones apropiadas. Esto podría ser un rimado para el ajuste del rotor, calzado de los polos, rediseño del núcleo del estator y devanado o reemplazo total del estator.

Cualquiera que sea el alcance de la Restauración, los expertos de tecnología del centro de generadores de Alstom en Suiza, Ingeniería, fabricación e instalación revisan las soluciones de diseño y las fases críticas del proceso. Respetando los estudios básicos de diseño, La ingeniería de detalle proporciona dibujos con soluciones para fabricación e instalación. La implementación de este paso es seguida por el mismo proceso como para generadores nuevos.

Metodología Específica de la Turbina

Alstom ha desarrollado una metodología para la Restauración de turbinas como resultado de experiencia en proyectos similares, la Investigación y Desarrollo, la utilización de herramientas precisas y "modelo" de pruebas. Esta metodología puede ser aplicada a todos los objetivos a ser Restaurados, pero en casos específicos, se pueden usar diferentes aproximaciones. El proceso es dividido en tres etapas principales, como sigue:

Preparación de Licitaciones

El objetivo principal de esta etapa es entender claramente cual es el objetivo del proyecto. Los objetivos más comunes son clasificados como un incremento en los parámetros, incremento en la eficiencia, mejora en la estabilidad, solución de problemas de cavitación o abrasión y cualquier combinación de lo anterior.

Con base en los objetivos, es importante el contar con información suficiente sobre la turbina para conducir los estudios para evaluar las posibles modificaciones. Debido al tiempo corto durante la licitación, no es posible realizar cálculos profundos y avanzados. El reto en esta fase es el definir, con análisis simples y cálculos básicos, el



comportamiento de la unidad generadora, antes de la Restauración. Las condiciones limitantes (dimensiones e interfaces) y las restricciones (sobre-presiones y sobre-velocidad) también necesitan ser verificadas en ese momento. El análisis en la etapa de licitación puede dividirse como sigue:

Entrada (caja espiral & toberas/vanos fijos)

No es común el modificar la carcasa de espiral en un proyecto de Restauración. La relación de costo / beneficio no es favorable y técnicamente es imposible para las turbinas verticales, pero es necesario comparar la sección de carcasa de espiral con los diseños modernos del mismo tipo. Específicamente las turbinas que usan una carcasa semi-espiral, se pueden hacer modificaciones menores a un costo aceptable, lo cuál no es una práctica común. La modificación de la carcasa de espiral está restringida a adicionar vanos guía en el anillo fijo para mejorar el comportamiento de flujo.

El perfil de los vanos fijos necesita ser analizado y comparado con perfiles modernos. Otro aspecto importante es el ángulo que los vanos imponen en el flujo. Las modificaciones en los vanos se hará posible y el efecto normalmente es importante. También los aspectos mecánicos de los vanos necesitan ser verificados, tales como historial de grietas y vibraciones.

Distribuidor

El reemplazo de vanos guía existentes por unos nuevos, con perfiles mejores adaptados generalmente nos lleva a una mejora significativa del desempeño. En la fase de oferta el perfil existente es comparado con los perfiles modernos de Alstom, para verificar los niveles de mejoramiento que se pueden alcanzar. Los nuevos vanos guía tienen la ventaja con relación a los instalados una mejor calidad y superficie y consecuentemente se reducen las pérdidas.

En la parte mecánica, es importante verificar los mecanismos de operación, servomotores de pistón y bujes. Las modificaciones en estos componentes son importantes para asegurar una correcta apertura de los nuevos vanos guía, para soportar los nuevos esfuerzos y para reducir el tiempo de mantenimiento.

Rodete

El rodete es el componente más importante en el proyecto de Restauración. Generalmente, se desarrolla un nuevo diseño de rodete para condiciones específicas de la turbina. Durante la etapa de la licitación, los análisis son restringidos a aspectos dimensionales y de interferencias con otros componentes.

Hasta ese momento, las condiciones de la cavitación son evaluadas. Con base en las nuevas descargas, características del rodete nuevo, normas y necesidades del cliente, se definen los materiales para el nuevo rodete. Los rodetes antiguos generalmente fueron hechos de acero al carbón, y los nuevos rodetes son de acero inoxidable, lo cuál tiene un mejor desempeño bajo condiciones de cavitación. Para la estabilidad de la turbina, es necesario verificar las condiciones de aereación. Beneficios adicionales se pueden obtener mediante el análisis de las tolerancias del laberinto y su geometría.



Conducto de Succión

Después del rodete, el “conducto” es el componente que mayormente influye en el comportamiento de la turbina. La importancia de este se incrementa proporcionalmente inverso al cabezal. En la fase de licitación los análisis de la sección transversal y la velocidad del agua se hacen imperativos. En casos donde la descarga se incrementa sustancialmente, es importante el tener cuidado con las inestabilidades. Existen algunas situaciones donde es posible modificar el conducto, pero normalmente esto tiene algunas consecuencias de trabajos civiles. Bajo este supuesto, es necesario contar con el apoyo de especialistas civiles.

Componentes Mecánicos

Los componentes mecánicos necesitan ser verificados considerando las nuevas características de la unidad. Las chumaceras guía y de empuje deberán ser analizadas considerando las cargas de la nueva máquina, tales como una carga diferencial diferente velocidad de operación y sobre velocidad. Generalmente los parámetros como la sobre-presión se requiere sean sostenidas en la unidad rehabilitada, aún si existe un incremento en la descarga. Debido a esta razón se hace necesario realizar un cálculo de transitorios hidráulicos, para definir los nuevos valores de cierre y apertura del distribuidor.

Algunos otros requerimientos de clientes, como la abrasión y fatiga de los componentes principales necesitan ser analizados. Para todos esos componentes existen diversas propuestas de solución. Para la abrasión, se pueden utilizar diversos materiales y/o recubrimientos en el rodete, vanos guía y partes de la tapa superior y anillo inferior. Los problemas de fatiga pueden deberse a problemas Hidráulicos o Mecánicos, y las soluciones podrían requerir de una investigación profunda que generalmente se realiza en la primera etapa del diseño.

Etapas de Diseño

En la etapa de diseño, todos los componentes analizados en la fase de licitación necesitan ser estudiados más a profundidad, así como se deberá coleccionar más información del sitio. En caso que resultados pruebas de desempeño no se tengan disponibles, la primera acción será conducir una prueba prototipo de desempeño, de acuerdo a las normas IEC. Esta prueba es esencial para definir el desempeño real del equipo, y pueda tenerse una base para comparaciones futuras. Al mismo tiempo las condiciones operacionales deberán ser investigadas.

Una inspección detallada del equipo también es necesaria así como los perfiles reales de la compuerta (del postigo) y las toberas se requiere confirmar. Alstom puede realizar esta inspección mediante diferentes métodos, con base en patrones o brazos de medición tridimensional 3D. Otras mediciones serán verificadas tales como los diámetros principales del distribuidor y dimensiones del laberinto.

El análisis de la turbina existente es hecho cuando las actividades del sitio se han completado. En este momento, el desglose de las pérdidas de los componentes estacionarios se define. El primer paso de este análisis es uni-dimensional de los componentes como la carcasa espiral y el Conducto. Para los vanos fijos y guías de

tobera, constituye una cascada única de análisis. Estos estudios permiten determinar las partes, las cuáles requerirán de un más exhaustivo análisis.

El siguiente paso es dirigir los principales componentes a un cálculo CFD. El objetivo es determinar el comportamiento del flujo bajo las condiciones existentes con cargas diferentes. Con los resultados de los cálculos CFD para las condiciones existentes y el análisis de los expertos hidráulicos, son identificados los aspectos que pueden ser mejorados. Los cálculos CFD para las modificaciones que se propongan serán pensados para comparar con las condiciones actuales. Estos cálculos y análisis son cruciales para alcanzar los objetivos del proyecto de Restauración. Cada sitio es único en su diseño y operación, y cada proyecto es diferente en sus requerimientos técnicos. Es necesario adaptar cuidadosamente el nuevo diseño a los componentes existentes y a los requerimientos de desempeño {2}.

Ejemplos del análisis CFD de los componentes estáticos, se pueden observar en las Figuras 1 y 2.

La figura 1 muestra las zonas de velocidad en los vanos guía fijos bajo las condiciones existentes y con el perfil nuevo. Una transición del flujo más suave se obtiene debido a un mejor perfil de los vanos fijos.

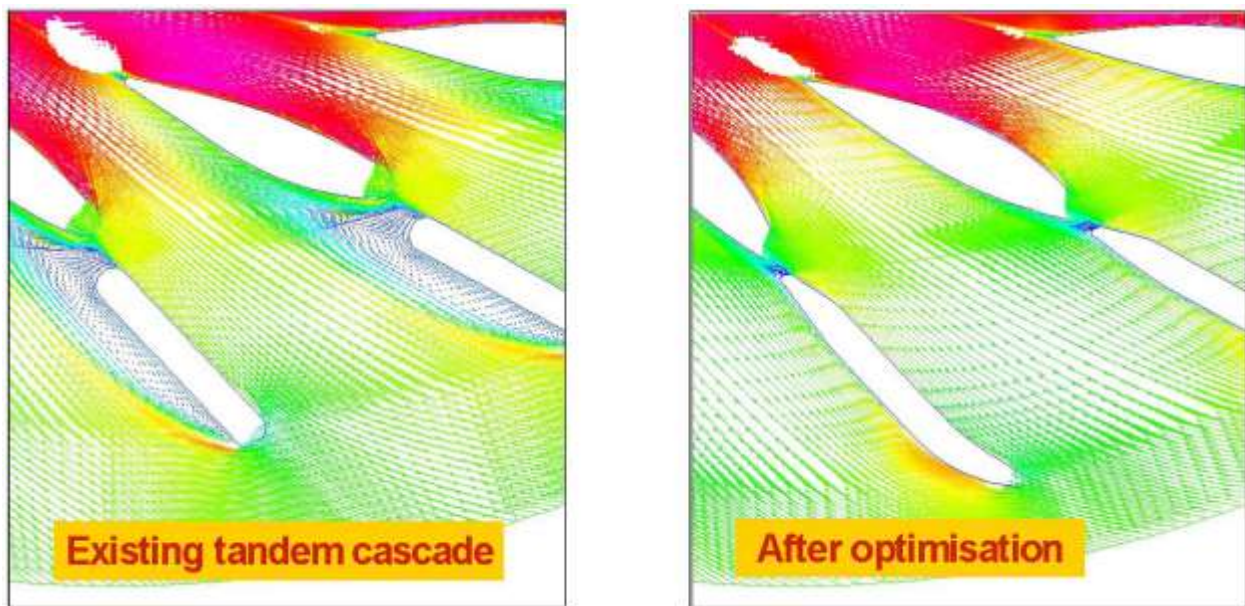


Figure 1. Velocity field an stay vane and guide vane [2]

Para el distribuidor, Los cálculos mediante el CFD se hacen para verificar el comportamiento del flujo y las pérdidas en los vanos guía. Se ha alcanzado un mejoramiento significativo en los más recientes proyectos de Restauración de Alstom. Los perfiles no simétricos y la longitud de los vanos guía para reducir las cavidades longitudinales han mostrado un efecto favorable en el desempeño y la cavitación. La

figura 2 presenta una comparación entre hacer más eficiente el Conducto. Esto es posible al ver el comportamiento diferente entre cada una de las condiciones. Para este caso la modificación fue dirigida a reducir la altura del codo de desfogue en la parte inferior del Conducto.

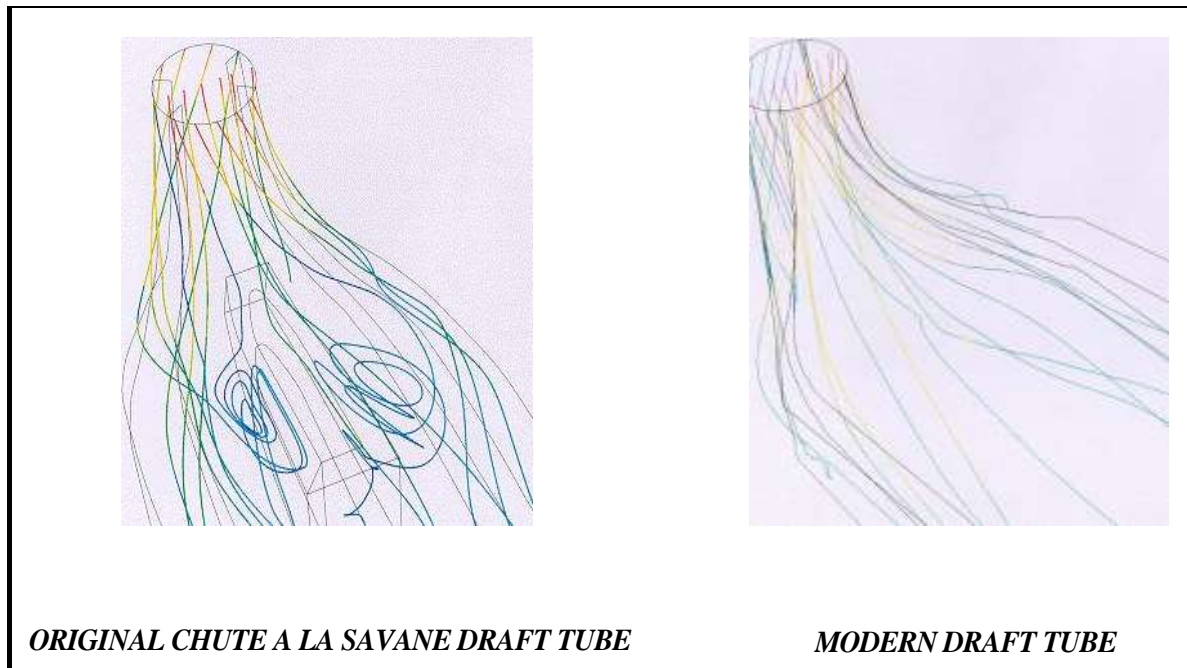


Figure 2. Original and modified draft tube behavior [2]

Después de concluir el análisis de la caja espiral, el distribuidor y el conducto y determinado por otras modificaciones que serán hechas bajo las condiciones existentes, se requiere desarrollar un nuevo rodete. Para desarrollar este rodete existen varios límites de condiciones impuestas por las dimensiones actuales y las condiciones hidráulicas existentes. En esta fase, se utilizan metodologías sofisticadas para obtener las mejores condiciones posibles de diseño para la rehabilitación. En proyectos recientes Alstom ha empleado una herramienta de optimización genérica y un cálculo de la viscosidad para definir los perfiles y analizar el flujo. Los expertos en hidráulica pueden elegir los parámetros y los grados de libertad que la herramienta modificará. El seleccionador elige entonces los valores de los parámetros geométricos. El resultado de este proceso ha producido rodetes de un alto-rendimiento en los diseños de rehabilitación.

La figura 3 muestra un ejemplo donde la herramienta de optimización presenta un sorpresivo perfil de entrada para la Restauración de la planta de Shasta.

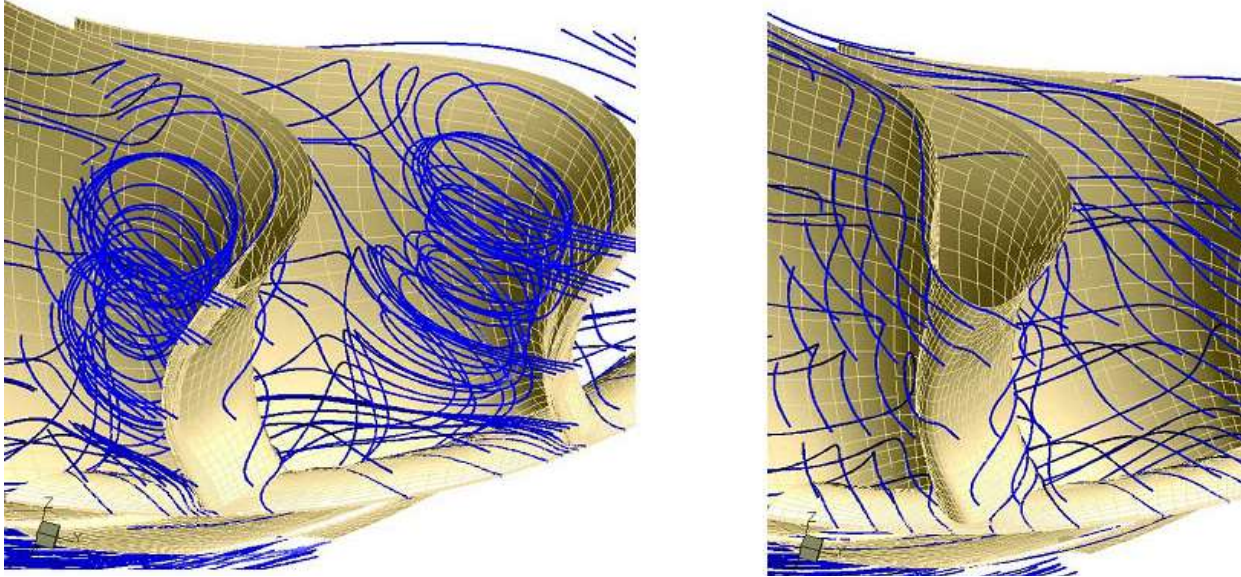


Figure 3 – Comparison between first profile and final profile defined by the optimizer

Después de completar todos los pasos de la simulación con CFD, el paso final es realizar un modelo de prueba para comparar las condiciones actuales contra las nuevas. El modelo de prueba es necesario para confirmar que el diseño antes de las modificaciones actuales sean hechas. Este modelo de prueba también verifica el comportamiento de la cavitación y fluctuaciones de presión del nuevo diseño. También esto es muy útil porque es posible que estén ambos diseños bajo condiciones controladas. En proyectos de Restauración de plantas pequeñas, el costo de un Modelo de prueba es prohibitivo, pero para turbinas grandes este recurso es muy necesario para eliminar riesgos.

Los otros aspectos analizados en la fase de licitación tales como aeración, tolerancia de los laberintos, velocidad de operación y carga de las chumaceras son confirmados en esta etapa. Con base en los resultados del modelo de prueba y las simulaciones, se podrán detallar las modificaciones de otros componentes.

Fase de Implementación

La fabricación de componentes nuevos y las modificaciones de las partes existentes son factores claves en cada tipo de proyecto, especialmente en los de Restauración. Las modificaciones a los componentes originales deben ser ejecutadas con extrema competencia, porque el comportamiento final del prototipo depende de este trabajo. Las modificaciones que involucran trabajos civiles son también un reto en las Centrales eléctricas.



La fabricación de componentes nuevos normalmente sigue los procesos normales de Alstom para asegurar la mejor calidad del producto. Los ajustes en sitio durante el montaje son una práctica normal en los proyectos de Restauración, porque las condiciones normales del pre-ensamble para turbinas nuevas no son aplicables en estos casos.

Después de la puesta en servicio, se realiza una prueba de aceptación con base en las normas IEC para comparar el desempeño entre la turbina original y después de restaurada, bajo las mismas condiciones. Este es el camino definido para probar que el proyecto alcanzó sus objetivos.

Aspectos de Ejecución

En los proyectos de Restauración, el objetivo del cliente es maximizar el retorno de la inversión. Algunos aspectos como el desempeño, costos del proyecto y la generación final afectan el resultado. Un aspecto importante que afecta sustancialmente el retorno de la inversión es el programa y tiempo total del paro de las unidades.

La capacidad de una compañía para concluir un proyecto en el menor tiempo posible, con el mínimo de tiempo de paro, generalmente es un factor importante de decisión para el cliente. Algunos meses de pérdida de generación pueden representar una reducción sustancial del retorno del proyecto. Para eliminar retrasos y sorpresas desagradables durante la ejecución del proyecto, cada una de las actividades debe ser exhaustivamente planeada, y el equipo encargado de la implementación requiere tener una enorme experiencia en proyectos similares.

Generador Caso de Estudio

Rocky Reach, unidades 1 a 7

Cliente: Condado de Chelan PUD, Wenatchee, Washington, E.E.U.U.,

OEM: Westinghouse

Potencia Nominal: 120 MVA, 15 kv, 90 rpm, 0.95 pf,

Razones para la Restauración:

- Inestabilidad en las tolerancias del rotor / stator por rozamiento en una de las unidades.
- Distorsión del núcleo y la forma del estator poniéndose cuadrada (laminado del estator construido en cuatro secciones originalmente)
- Aumento de eficiencia del generador.
- Algunas unidades muy ruidosas, > 95 dB fuera de alojar.
- Extensión de vida / incremento de la disponibilidad / reducción de costos de mantenimiento y de paradas.

**Alcance de la Restauración:**

- Estructura del Estator, núcleo y devanado (estator nuevo, salvo las partes empotradas y placas únicas)
- Cubo del rotor, araña/soporte, (rotor nuevo, salvo las flechas)
- Casi una unidad completa nueva salvo las flechas, soporte y chumaceras.

Incremento de Potencia: No incremento en la potencia nominal de placa.

Requerimientos Especiales de Diseño:

- Alta Eficiencia – Alta evaluación de bajas pérdidas, muy alta penalización por incumplimiento de garantías.
- Requerimientos de forma de Tolerancias – Tolerancias según Normas IEC/CEA.
- Requerimiento de ruido audible muy bajo.
- Evaluación mayor para un paro corto de la instalación

Requerimientos de Interfases / Restricciones de Diseño de Espacio:

- Apoyos superiores en la estructura del estator.
- Tamaño del ranura y tolerancias en las placas superiores fijadas a la estructura OD y longitud axial.

Solución del diseño:

Debido al alcance importante, que incluye un rotor y estator completo, los requisitos de interfases no son muy restrictivos. Actualmente, en este caso, el tamaño de la ranura permite incrementar ambas estructuras y profundidad radial del núcleo. La evaluación de la eficiencia fue aproximadamente diez veces el valor usual, haciendo que el costo del material sea casi despreciable para hacer comparación. Por consiguiente, para dirigir los altos requerimientos de eficiencia agregamos material activo y reducimos la longitud de claros hasta que alcanzamos el límite RCC (Relación de corto-circuito). La eficiencia se incrementó mas del .05 % con respecto a la del generador acerca del 99.0 %.

Para conducir el problema de estabilidad de las tolerancias, la rueda fue fijada por interferencia para su máxima velocidad. El soporte del rotor y la estructura del estator fueron diseñados con elementos oblicuos patentados por Alstom para permitir una expansión térmica y centrífuga-tangencial uniforme. Los elementos oblicuos que soportan el estator fueron redundantes, tanto como las pérdidas muy bajas, el incremento de las temperaturas fueron también muy bajas. Las frecuencias de resonancia del núcleo del estator fueron cuidadosamente verificadas para asegurar una distancia suficientemente lejos de todas las frecuencias de fuerzas influyentes.

Para reducir el tiempo de paro a un mínimo de tiempo, el rotor y el estator ensamblados en el mismo sitio de la central. Cuando ambos están terminados, hasta entonces se ponen fuera de servicio las unidades existentes. Una vez terminada la unidad, cuatro de siete, el tiempo de servicio comercial entre las unidades existentes y las nuevas fue solo de 45 días.

Las pruebas de aceptación de generador confirman el cumplimiento de todos los requisitos técnicos. El monitoreo en línea ha demostrado la existencia de unos claros



fuera de tolerancia. La condición fuera de tolerancia existe sólo durante una parte del año, con la variación cíclica anual proporcional a la temperatura del agua. La causa identificada es que se debió a la expansión y contracción del concreto. La solución está siendo actualmente implementada.

Central Hidroeléctrica Cristal, Unidad 1

Cliente: United States Bureau of Reclamation, Montrose, Colorado

OEM: General Electric

Potencia Nominal: 35 MVA, 11.0 kv, 257 rpm, 0.9 pf,

Razones para la Restauración:

- Para obtener un incremento de Potencia.

Alcance de restauración:

- Reemplazo de estructura del estator, núcleo y devanados

Incremento de Potencia: 25% arriba de la original de 28 MVA, @ 1.0 FP. (12.5% aumento en MW)

Requisitos Especiales de Diseño:

- La potencia nominal existente era inalcanzable debido al límite temperatura en el rotor.
- Reutilizar el rotor existente, si era posible.

Necesidades de Interferencias / Restricciones de Espacio de Diseño:

- La longitud axial original, el diámetro de alojamiento, y el diámetro del rotor.
- Placas de nivelación originales.
- Las placas de apoyo del marco superior.

Solución del Diseño:

- El reto del diseño de esta Restauración fue el alcanzar el 25 % de incremento en MVA utilizando el mismo rotor. desafío con este plan de restauración era comprender el 25% aumento en MVA con el rotor existente. Así también, cambiar el FP de 1.0 a 0.9 con sobre-excitación para satisfacer los nuevos requerimientos de potencia. El aislamiento original del devanado de campo era NEMA Clase B, y la capacidad original fue un poco menor a la mencionada en la placa, con un rango de incremento de temperatura en el campo de 60° Kelvin. Lo que parecía obvio que ninguna modificación podría cumplir con los requisitos.
- Lo primero que se tuvo que hacer fue mejorar el aislamiento del devanado de campo a Clase F, lo cuál nos permitiría hasta una temperatura de 80° K. Hay que notar que los usuarios en EU piden aislamiento Clase F, pero sin exceder el límite de temperatura del aislamiento Clase B. La siguiente modificación fue incrementar las bobinas serie, en aproximadamente un 20 %. Con esto también se reducirá la sección transversal radial del núcleo, pero el efecto neto fue el reducir los requerimientos de la excitación. La tercera modificación fue incrementar la profundidad del yugo (de la parte posterior del núcleo, reduciendo la densidad del flujo y las fuerzas de magnetización correspondientes. La modificación final fue



acortar la distancia de los claros justo lo suficiente para llevar la excitación e incremento de temperatura del campo dentro de los lineamientos de la capacidad de placa. Durante las pruebas de desempeño en Otoño del 2004, la temperatura medida del campo bajo las nuevas condiciones de carga y factor de potencia fue de 78° K.

Turbina de Caso Estudio

Saint Lawrence, 8 BLH Units

Cliente: Nueva York Power Authority (NYPA)

OEM: Baldwin, Lima & Hamilton

Potencia Nominal: 8 Turbinas de hélice, 85 kHp (62.5 MW), de 81 pies (24.7 m) nominal head, 94.74 rpm,

Alcance de restauración:

- Rodete de la turbina

Uprate:

Requisitos Especiales de Diseño:

- Incremento de eficiencia total
- Translación del pico de eficiencia a mayor carga
- Reducción de la erosión por cavitación
- Aumento en la estabilidad de la turbina

Problemas hidráulicos:

- La meta de la Restauración está enfocada en sobretodo en el mejoramiento de la eficiencia, la translación del pico de eficiencia a mayor carga y la reducción de la erosión debido a la cavitación. El cliente especificó altos niveles de eficiencia derivado de un nuevo rodete así como un mejor comportamiento de la cavitación.
-
- Las unidades originales sufren desgaste por cavitación y se han reparado con soldadura frecuentemente. Es la intención que los nuevos rodets reduzcan la cavitación, para eliminar la frecuencia de reparaciones. Las unidades existentes muestran fluctuación en la presión, que afecta la estabilidad de las turbinas.

Diseño la solución:

- La metodología aplicada y las modificaciones principales de esta Restauración fueron en el rodete. Para alcanzar los objetivos fijados por el cliente referente a la cavitación, la entrega de potencia y la eficiencia, se llevaron a cabo cálculos completos CFD en todos los componentes de la turbina. Para la cavitación, se hicieron diferentes investigaciones numéricas sobre los componentes hidráulicos originales. Con una buena exactitud, los resultados predeterminaron los ángulos de los flujos, y consecuentemente, un diseño de los alabes nos podría llevar a un buen rango operacional definido por el cliente. Con base en esos resultados, un fue desarrollado rodete nuevo. Los alabes tienen una forma predefinida (torcida), como

se indica en la figura 4. El comportamiento de la cavitación se muestra en la figura 5.

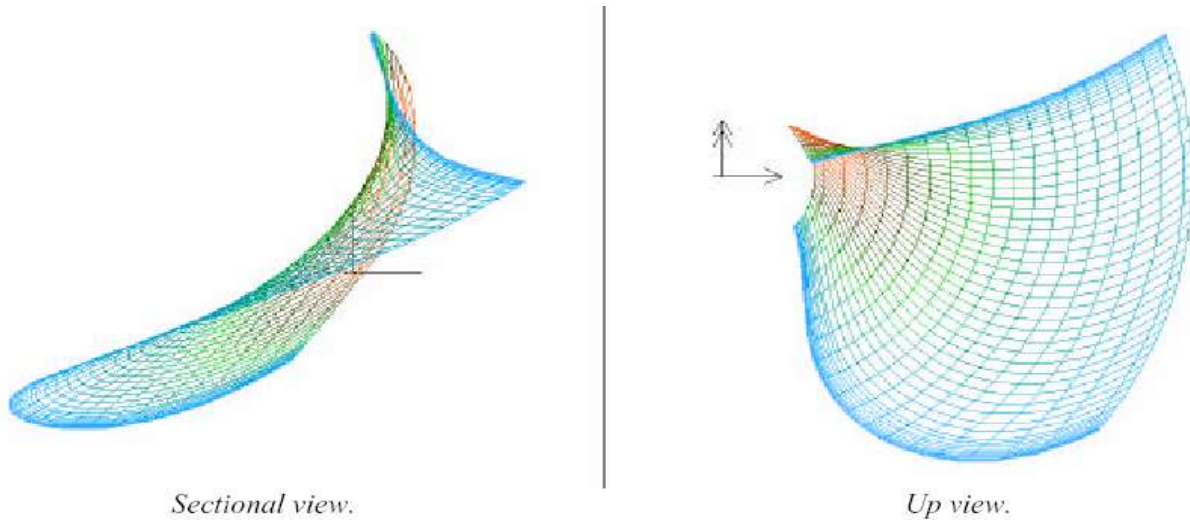


Figure 4. Modern profile of a propeller blade

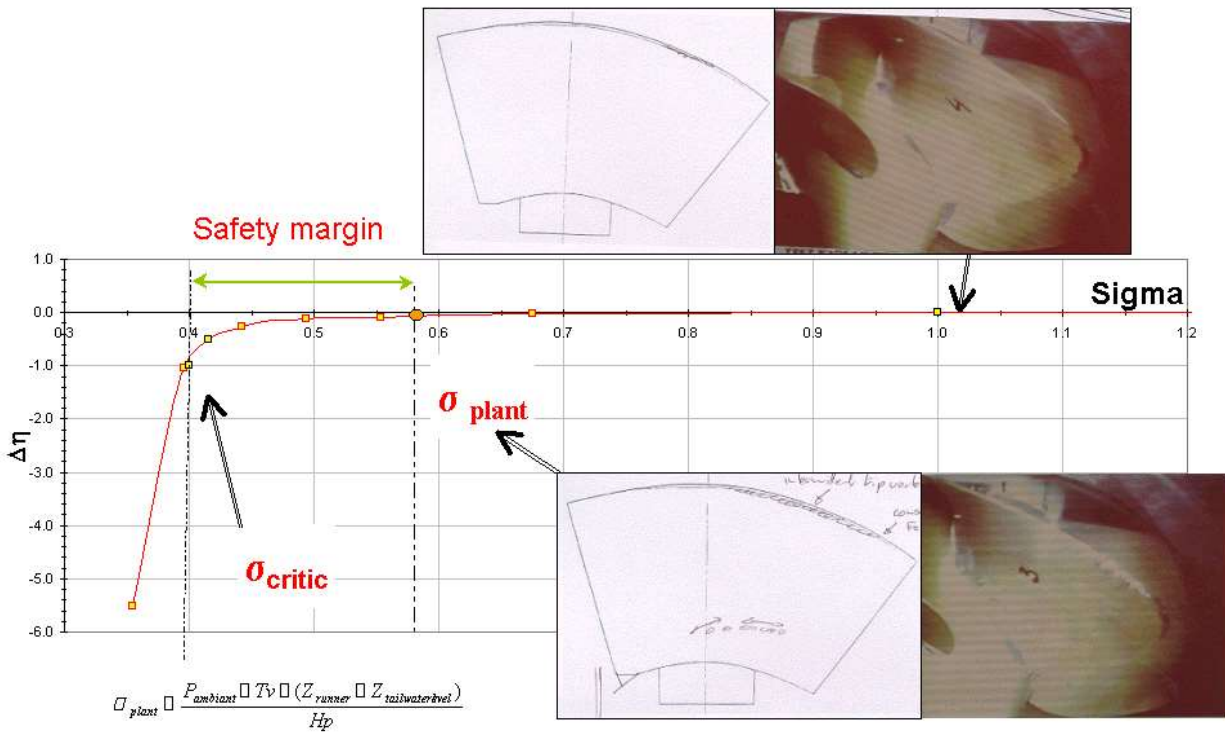


Figure 5. Sigma break curve at full load up to maximal flow near the nominal net head

El modelo de pruebas de Alstom y los laboratorios EPFL confirman la simulación CFD. Durante la fabricación, el perfil del rodete se hizo en una máquina de 5 ejes, para asegurar que la geometría calculada es reproducida con exactitud. El rodete se muestra en la figura 6.



Figure 6. Finished runner

La prueba del prototipo confirmó los resultados experimentales del modelo y fue posible mostrar la eficiencia y potencia de salida alcanzados. La figura 7 presenta la comparación.

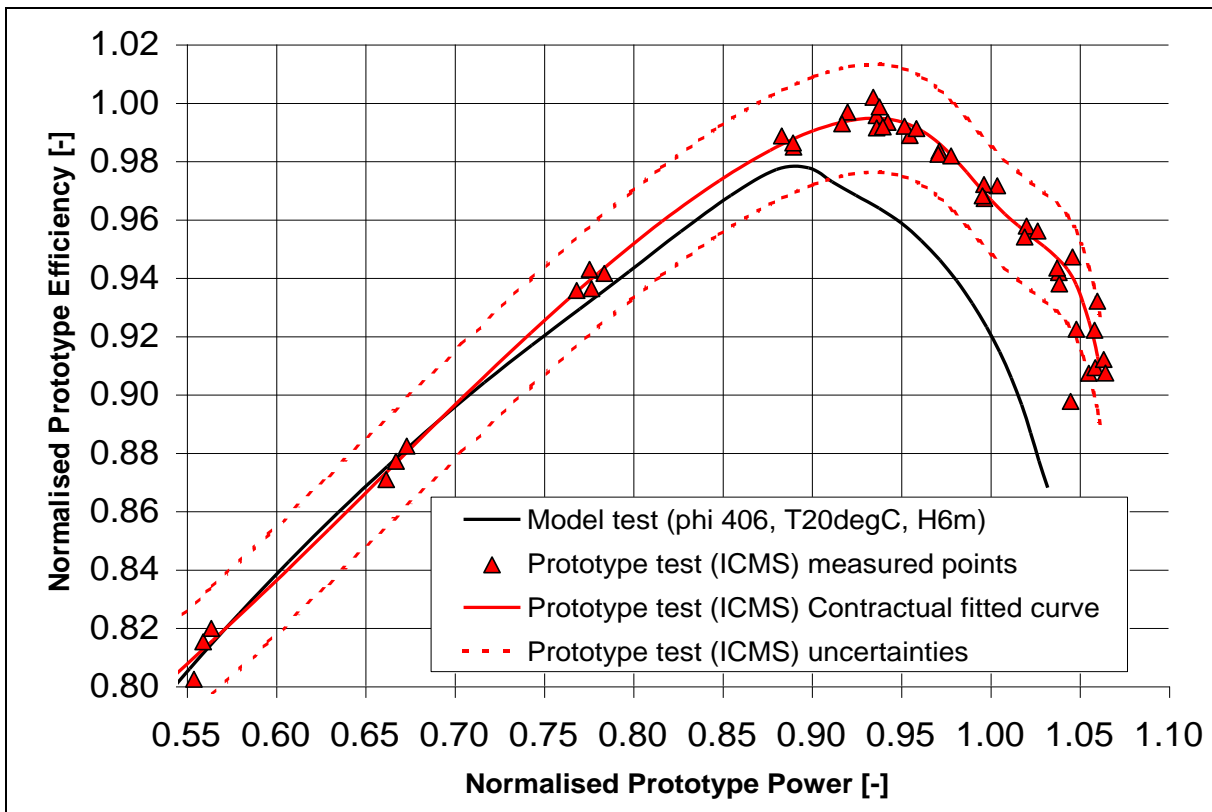


Figure 7. Comparison of model and prototype efficiency

Conclusión

La Restauración del equipo de la Central normalmente es manejada por la necesidad de mejorar la confiabilidad, disponibilidad o un aumento de potencia o incremento de eficiencia. Generalmente, el diseño de una Restauración representa un reto mayor que el diseño de una planta nueva debido a las necesidades de interfases con los componentes originales.

Desde la perspectiva del proveedor del equipo, existen tres etapas principales para un proyecto de restauración. La etapa de licitación, la cuál es usualmente de corta duración, se caracteriza por la obtención de datos y relativamente análisis rápido de la situación actual y soluciones técnicas. Buena experiencia y diseñadores experimentados son básicos para el éxito de esta etapa. La segunda etapa es un diseño básico. Aquí es cuando se efectúa un análisis y cálculos profundos. Soluciones muy específicas se desarrollan en esta etapa y los cálculos efectuados son más exactos que los de la etapa anterior. La etapa de implementaciones se caracteriza por el diseño de detalle, la producción de dibujos y la instalación de equipos rehabilitados.

La integración entre la turbina y el generador es esencial para todo tipo de proyecto, pero en los casos de Restauración, es mucho más importante debido a las fronteras de responsabilidad, que son mucho más restrictivas.



La metodología de Alstom aquí presentada ha resultado eficiente en cada esquina del mundo. Los casos presentados muestran ejemplos típicos de las dificultades y las soluciones que Alstom desarrolla para proyectos de Restauración.

Referencias

- [1] Refurbishment of low head Francis turbines; AIRH 2002 – Laussane, Switzerland; P. Eberle, M. Coustou, M. Sabourin
- [2] Hydro Turbines Rehabilitation; Hydro 2004 – Porto, Portugal; B. Michel, M. Coustou, M. Sabourin, M. Francois
- [3] Performance of the St-Lawrence Rehabilitated Turbines : Step-up from Model to Prototype; Hydrovision 2004 – Montreal, Canada; A. St-Hilare, P. Ludewig, F. Loiseau, J. Tadel, L. Bornard, M. Sabourin