

CARACTERIZACIÓN DE UNA TURBINA DEL TIPO FRANCIS UTILIZADA
POR UNA EMPRESA LOCAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

JUAN ESTEBAN GALLEGO BETANCUR

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE MANTENIMIENTO
MEDELLÍN
2006

CARACTERIZACIÓN DE UNA TURBINA DEL TIPO FRANCIS UTILIZADA
POR UNA EMPRESA LOCAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

JUAN ESTEBAN GALLEGO BETANCUR

Trabajo de grado para optar por el
título de Ingeniero Mecánico

Asesor

FRANCISCO JAVIER BOTERO HERRERA
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE MANTENIMIENTO
MEDELLÍN
2006

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Francisco Javier Botero Herrera, profesor de la universidad EAFIT, asesor del proyecto por todo su apoyo y guía durante la elaboración de este trabajo.

A los Ingenieros Emilio Ocampo Y Carlos Berrio de las Empresas Publicas de Medellín por la información suministrada a lo largo de la elaboración del proyecto.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron con la elaboración de este proyecto.

Finalmente a mi familia especialmente a mi madre por su apoyo incondicional durante toda la carrera.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. CONCEPTOS GENERALES DE TURBINAS	16
2.1 HISTORIA DE LAS TURBINAS FRANCIS	17
2.2 CLASIFICACIÓN DE TURBINAS	17
2.3 COMPONENTES PRINCIPALES DE TURBINAS FRANCIS	19
2.4 DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO	20
2.4.1 Funcionamiento De Los Principales Componentes	21
2.4.2 Formas Constructivas de la Turbina Francis	23
2.4.3 Número Específico De Revoluciones	24
2.4.4 Margen de Funcionamiento	24
3. CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA FRANCIS UTILIZADA POR UNA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA LOCAL.	26
3.1 INFORMACIÓN DEL FABRICANTE	26
3.2 DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN	26
3.2.1 Parámetros Límite Para Una Operación Sin Cavitación	27
3.2.2 Eficiencia Efectiva Ponderada (Eef)	27
3.2.3 Parámetros Del Punto De Máxima Eficiencia	28
3.2.4 Oscilaciones Máximas De Potencia	28
3.2.5 Velocidad Máxima De Embalamiento	28
3.2.6 Empuje Hidráulico Máximo (EHM)	28
3.2.7 Fugas Máximas A Través Del Distribuidor	28
3.3 ESTADO COMPLETO DEL EQUIPO	29
3.3.1 Partes Básicas Estacionarias	29
3.3.2 Equipo Principal.	30
3.3.3 Equipo auxiliar	33

3.4	MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES	33
3.5	DOCUMENTACIÓN TÉCNICA ENTREGADA POR EL FABRICANTE DE LA TURBINA	36
4.	TÉCNICAS DE MONITOREO	37
4.1	VIGILANCIA DE LAS TEMPERATURAS	37
4.1.1	Termografía Infrarroja	38
4.2	INSPECCIÓN VISUAL, ACÚSTICA Y AL TACTO DE COMPONENTES.	39
4.3	ANÁLISIS DE LUBRICANTES	40
4.4	ANÁLISIS DE VIBRACIONES.	43
4.5	ULTRASONIDO.	46
4.5.1	Ultrasonido Como Método Para Detección De Irregularidades En Materiales.	46
4.5.2	Ultrasonido Como Método Para Monitorear Vibraciones	46
4.6	MONITOREO DE LA CORROSIÓN	46
4.7	RESISTENCIA ELÉCTRICA	47
4.8	MONITOREO DE CAUSAS Y EFECTOS ELÉCTRICOS	47
4.9	LÍQUIDOS PENETRANTES	47
4.10	ENSAYO DE PULVERIZADO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	48
4.11	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.	48
4.12	MONITOREO DE RUIDO	48
4.13	FILTROS MAGNÉTICOS.	48
4.14	CORRIENTES INDUCIDAS	49
4.15	CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL Y MONITOREO	50
4.16	CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL Y MONITOREO	52
5.	PRINCIPALES CAUSAS DE AVERÍA Y REDUCCIÓN DE EFICIENCIA EN TURBINAS FRANCIS	54
5.1	LA CAVITACIÓN COMO FACTOR CRÍTICO EN LA REDUCCIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA VIDA ÚTIL DE TURBINAS FRANCIS	55

5.2	CAVITACIÓN EN MAQUINAS HIDRÁULICAS	56
5.2.1	Definición del Fenómeno.	57
5.2.2	Formación de la Cavitación	58
5.2.3	Fases Del Fenómeno De La Cavitación	60
5.2.4	Clasificación De La Cavitación En Turbinas Francis	61
5.2.5	Características De La Cavitación En Turbinas Hidráulicas.	62
5.2.6	Efectos de la cavitación en maquinas hidráulicas	69
5.3	DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN TURBINAS FRANCIS	70
5.3.1	Estudios realizados en la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)	71
5.3.2	Estudios realizados en CARTIF, Valladolid España	77
5.3.3	Estudios Realizados En La Facultad De Ingeniería De La Universidad UNESP/FEIS, Brasil.	77
5.3.4	Estudios Realizados En El Laboratorio De Máquinas Hidráulicas (LMF) De La Escuela Politécnica Federal De Lausanne (EPFL), Suiza.	79
5.3.5	Estudios Realizados por LMH-IMHEF y UPC	85
5.3.6	Estudios Realizados Por La Central Hidroeléctrica Canadiense Hydro Quebec.	87
5.3.7	Criterios Generales Concluyentes	89
6.	INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA DE MEDICIÓN PROPUESTO PARA LA DETECCIÓN DE LA CAVITACIÓN	91
6.1	INFORMACIÓN DE LAS NORMAS EN CUANTO A CONDICIONES DE INSTALACIÓN.	91
6.2	EQUIPO DE CAPTURA DE DATOS.	93
6.2.1	Canales.	93
6.2.2	Captura de los Datos.	93
6.2.3	Frecuencia de Muestreo.	93
6.3	OTRAS VARIABLES A TENER EN CONSIDERACIÓN.	93
7.	CONCLUSIONES	96
7.1	POSIBLES VÍAS DE DESARROLLO EN LA DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN MAQUINAS HIDRÁULICAS	99

8.	ANEXOS	101
8.1	CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA TURBINA FRANCIS	101
9.	BIBLIOGRAFÍA	112
9.1	CLÁSICA	112
9.2	INTERNET	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 0. Esquema de una central hidroeléctrica	14
Figura 1. Ubicación y principales componentes de las turbinas Francis	16
Figura 2. Rueda Pelton	18
Figura 3. Rodete Francis, izquierda, y Kaplan, derecha	19
Figura 4. Corte transversal turbina Francis vertical	19
Figura 5. Corte transversal turbina Francis horizontal	20
Figura 6. Rango de operación de turbinas (rpm Vs h del salto)	25
Figura 7. Superficie característica de una sustancia que se contrae al fundirse (Ej: el agua) y proyecciones de la superficie característica sobre los planos (T, p) y (p, V).	58
Figura 8. Diagrama presión-temperatura.	59
Figura 9. Posibles formas de colapso de las burbujas	61
Figura 10. Esquema de una instalación hidroeléctrica	62
Figura 11. Posible definición del coeficiente de Thoma, con respecto a la caída del rendimiento.	63
Figura 12. Localización de los principales tipos de cavitación presentes en una turbina Francis.	64
Figura 13. Cavitación de burbuja (a) y localización de sus daños en el rodete.	65
Figura 14. Daños por erosión en un rodete Francis por efectos de cavitación	65
Figura 15. Forma de la cavitación de antorcha	66
Figura 16. Von Karman vortex-shedding cavitation.	67
Figura 17. Principales tipos de cavitación en turbinas Francis	68
Figura 18. Esquema de una turbina Francis	69
Figura 19. Rodete erosionado por efectos de cavitación	70
Figura 20. Ubicación de sensores para el monitoreo de vibraciones	79
Figura 21. Descripción de la ubicación y dirección de las mediciones de vibraciones	80

Figura 22.	Ubicación de sensores	82
Figura 23.	Martillo para calibración dinámica	88
Figura 24.	03201.2205.51.01.000A-CG (Guide Vane)	103
Figura 25.	03201.2205.31.01.000A CG – (Runner with shaft)	104
Figura 26.	03201.2205.51.03.000 CG – (Cubierta Anterior)	105
Figura 27.	03201.2205.51.02.000 CG – (Cubierta Posterior)	106
Figura 28.	03201.2205.51.00.003A (Link)	107
Figura 29.	03201_2205_51_00_006A (Lever)	108
Figura 30.	03201_2205_51_00_011A (Lever Plate)	109
Figura 31.	03201_2205_51_00_012A (Lever Plate)	110
Figura 32.	03201_2205_51_00_013A (Lever)	111

LISTA DE TABLAS

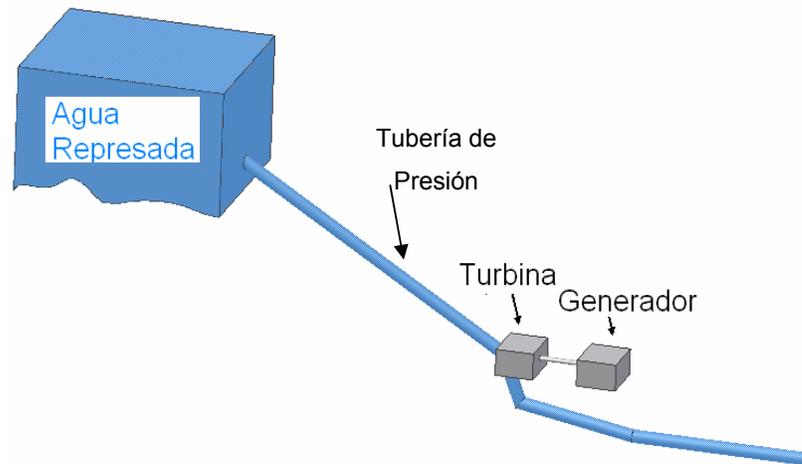
	Pág.
Tabla 1. Características Técnicas	27
Tabla 2. Propiedades de los materiales usados en la fabricación de los principales componentes de la turbina hidráulica de la herradura según estándares Rusos GOST and TU y ASTM/ SAE	34
Tabla 3. Características de las técnicas de monitoreo y diagnóstico descritas	51
Tabla 4. Comparación de las áreas térmica, tribológica y de vibraciones.	53
Tabla 5. Características de la turbina empleada y condiciones de flujo	82
Tabla 6. Descripción de instrumental propuesto	93

INTRODUCCIÓN

La energía constituye un elemento importante para el mundo moderno, este basa gran parte de sus desarrollos en elementos que la transforman de tal forma que se convierte en beneficios que suplen determinadas necesidades como lo es el funcionamiento de diversos artefactos que la utilizan como fuente de poder. Los artefactos funcionan gracias a los flujos de energía que circulan por sus componentes, estos flujos pueden ser de energía térmica, hidráulica, mecánica (lineal o rotacional), neumática, entre otros. Gran parte de artefactos utilizan como fuente de alimentación la energía eléctrica, esta puede ser producida a partir de varias fuentes, entre ellas las centrales de generación, que a través de grandes cantidades de agua represada en embalses, producen energía eléctrica utilizando artefactos que permiten su generación.

La generación de energía en una represa o central hidroeléctrica consta de tres elementos principales: una cantidad de agua represada, una turbina y un generador, como se ve en la Figura 0. El agua represada se conduce hacia la turbina que es accionada gracias a la presión y caudal del agua; la turbina esta conectada al generador. La turbina y el generador se deben situar en un nivel por debajo del nivel del agua represada, para así garantizar que el agua represada llegue a la turbina con las condiciones necesarias para el accionamiento. Las turbinas utilizadas por las centrales de generación tienen como función principal transformar energía hidráulica en mecánica rotacional, esto es, a partir del agua proveniente del embalse, que entra a la turbina con determinada velocidad y presión, que acciona la turbina. Las turbinas son maquinas, que como todas, sufren deterioros, desgastes y averías, por tanto requieren de mantenimiento y monitoreo, se consideran maquinas bastante criticas ya que de ellas depende la disponibilidad de energía eléctrica para todo un país, estas se ven afectadas por diversos fenómenos que ocurren durante su funcionamiento y que constituyen la causa de diferentes modos de falla.

Figura 0. Esquema de una central hidroeléctrica



En el actual proyecto se caracteriza una turbina hidráulica Francis, inicialmente se hace un recorrido por el estado del arte, luego se trata la información pertinente a los parámetros propios de funcionamiento de una turbina utilizada por una empresa local de generación de energía; en el capítulo siguiente se identifica y describe aplicaciones de algunas técnicas de monitoreo que pueden ser aplicadas a turbinas Francis. En el capítulo 5 se identifica un modo de falla crítico de las turbinas Francis, esto es, la cavitación, en este capítulo se describe la aparición del fenómeno, sus propiedades, tipos, consecuencias, los estudios realizados por diferentes institutos internacionales, entre otros. La información de los estudios realizados por institutos internacionales, las técnicas de monitoreo investigadas en el capítulo cuatro, las condiciones en cuanto al monitoreo del fenómeno de la cavitación, entre otros, son analizados dando pie al capítulo seis, donde se propone una instrumentación y un sistema de medición para la detección de la cavitación en turbinas Francis. Finalmente se extrae la principal información de cada capítulo y se concluye al respecto. En la sección de anexos, se muestran los planos de algunas de las partes de una turbina Francis utilizada por una empresa local de generación de energía (partes que fueron acordadas con tal empresa).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar una turbina del tipo Francis utilizada en una central de generación de energía.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

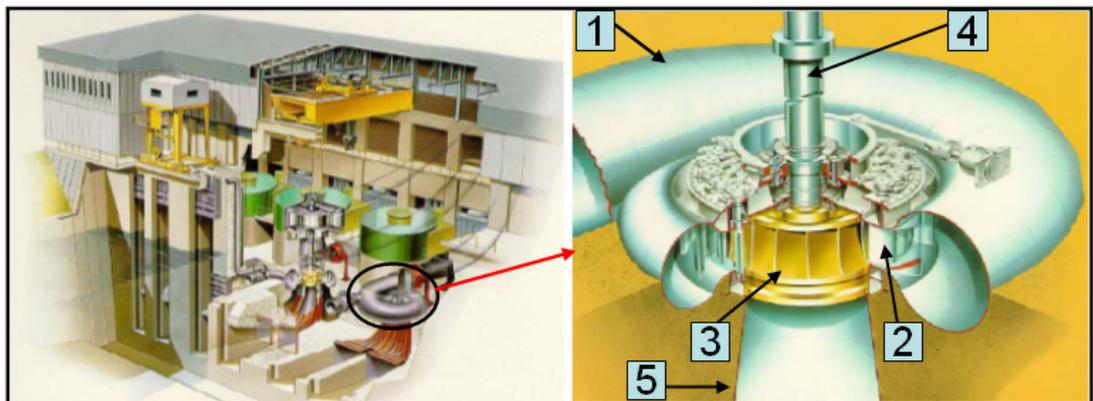
- Construir el estado del arte en cuanto a parámetros que caracterizan las turbinas Francis.
- Describir las características de funcionamiento de una turbina Francis utilizada en una central local de generación de energía.
- Indagar en las técnicas de monitoreo mas utilizadas actualmente por institutos internacionales.
- Investigar aplicaciones de las técnicas mas utilizadas actualmente para el monitoreo de turbomáquinas hidráulicas.
- Identificar un modo de falla crítico en cuanto a la reducción de la eficiencia y la vida útil de una turbomáquina hidráulica.
- Caracterizar el modo de falla crítico identificado en el objetivo específico anterior.
- Caracterizar geoméricamente elementos pertinentes de la turbina solicitados por la empresa local de generación de energía.
- Proponer una instrumentación y un sistema de medición para la caracterización experimental de la turbina.
- Concluir los principales resultados obtenidos

2. CONCEPTOS GENERALES DE TURBINAS

Las turbinas se pueden dividir en: hidráulicas, a vapor y a gas dependiendo el fluido que provoque el movimiento. Las turbinas hidráulicas, caso de las turbinas Francis, convierten la energía del fluido hidráulico, en energía mecánica, gracias al trancito del fluido a través de la misma y aprovechando la energía del salto (Wikipedia @ 2006) (CIPRESS @ 2006).

Las turbinas hidráulicas se encuentra situadas en el cuarto de maquinas de las centrales hidroeléctricas, parte izquierda de la Figura 1, su funcionamiento consiste en la entrada del agua a través de la tubería forzada hacia la voluta o caracol 1, en la Figura 1, posteriormente se dirige hacia el rodete 3, en la Figura 1, cuando el agua entra en contacto con el rodete, este entra en contacto con el agua, gira gracias a las condiciones de caudal y presión del fluido, una vez el agua pasa por el rodete, sale de la turbina a través del tubo de salida o aspiración 5, en la Figura 1, cuando el rodete gira, comunica su movimiento rotacional al eje de la turbina 4, en la Figura 1, que esta conectado al generador, la regulación de la turbina, es decir la velocidad a la que gira el rodete, es controlada por los álabes directores 2, en la Figura 1, estos pueden girar permitiendo el ingreso de mas o menos caudal al rodete.

Figura 1. Ubicación y principales componentes de las turbinas Francis



SCOPUS – TURBINA @1999

2.1 HISTORIA DE LAS TURBINAS FRANCIS

La turbina Francis fue desarrollada por James B. Francis en 1948, en dichas máquinas, la rueda de alabes o rodete, presentaba un flujo predominantemente radial, con los mismos radios de entrada y salida para todas las líneas de corriente, este diseño presentaba el problema de requerir mayores diámetros del rodete ante mayores caudales. La solución a este problema fue hacer que el agua siguiera una dirección radial-axial, esto es, a medida que el agua se mueve a través del rodete, su radio de giro disminuye aumentando la velocidad del agua; el resultado de ello fue el tipo de turbina de flujo mixto que actualmente es el modelo más habitual, esta, aun que guardan poca semejanza con la máquina Francis original, cuenta con un principio de funcionamiento similar y conserva el mismo nombre (UPC– CAVITACIÓN@).

2.2 CLASIFICACIÓN DE TURBINAS

Las turbinas se dividen en dos grupos principales: turbinas de acción o impulso, caso de las Pelton Figura. 2, y de reacción, caso de las Francis y las Kaplan Fig. 2, ello de acuerdo a la forma en que el agua actúa sobre ellas, en las primeras, la energía del agua a la salida del distribuidor es toda cinética y en las segundas esto ocurre solo en parte. Asimismo también se pueden dividir las turbinas en axiales o radiales, según que la columna de líquido se desplace en el rodete con respecto al eje de rotación, o bien normalmente al mismo, es decir, de forma radial; en este caso, las turbinas Francis se clasifican en ambos grupos, es decir flujo mixto pues a medida que el agua se mueve a través del rodete, su radio de giro disminuye (CIPRESS @ 2006).

Figura 2. Rueda Pelton

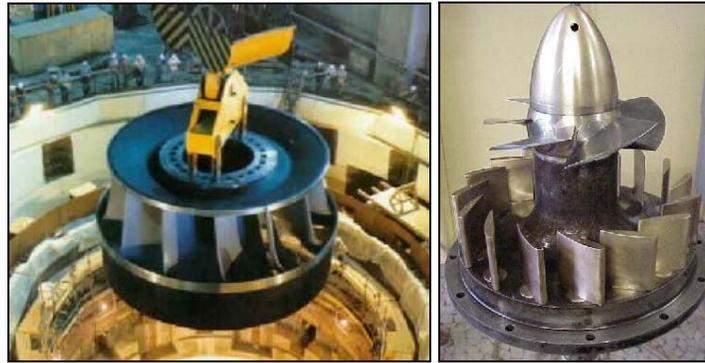


RUEDA PELTON @ 2006

En las turbias de reacción, existen dos causas de la transferencia de energía desde el flujo de agua hacia el eje de la turbina, es decir, de energía hidráulica a energía mecánica. Primero se tiene la presión de un chorro que se dirige desde la entrada hacia la salida del rodete, esta es llamada la parte de reacción, en el proceso de conversión de energía. Segundo, se tiene el cambio de dirección de los vectores del flujo de velocidad, a través de canales de transferencia de fuerzas de impulso entre las aspas del rodete; esta es denominada la parte del impulso dentro de la conversión de energía. El chorro a presión, dirigido desde la entrada, hacia la salida del rodete, es obtenido por que este se encuentra lleno de agua, razon por la cual este grupo de turbinas es también denominado como turbinas llenas. Las turbinas Francis, que se instalan en saltos medianos, entre aproximadamente 30 y 600 metros, y caudales bastante grandes, y las Kaplan, óptimas para saltos muy pequeños y caudales grandes, se clasifican en este grupo (TEV.CAP.2@ 2001), (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

Las turbinas de reacción extraen la potencia de la acción combinada de la energía de presión y la energía cinética del agua (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

Figura 3. Rodete Francis, izquierda, y Kaplan, derecha

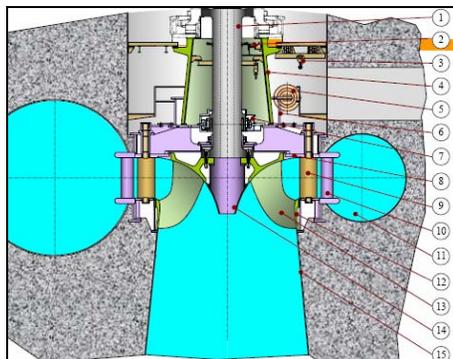


RODETE FRANCIS @ 2006

2.3 COMPONENTES PRINCIPALES DE TURBINAS FRANCIS

La turbina Francis es una turbina de reacción de flujo interno, transforma energía hidráulica en energía mecánica, combina conceptos tanto de flujo radial como de flujo axial. Los componentes principales tanto del tipo vertical como horizontal, son ilustrados en las Figuras 4 y 5, posteriormente, se describe la función de algunos de estos componentes.

Figura 4. Corte transversal turbina Francis vertical



- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1 Eje | 8 Tapa superior |
| 2 Dispositivo Sobrelvelc | 9 Distribuidor |
| 3 Monorriel de Pozo | 10 Predistribuidor |
| 4 Soporte Coj.de Empu | 11 Cámara Espiral |
| 5 Servomotor | 12 Anillo Espiral |
| 6 Anillo de Regulacion | 13 Rodete Francis |
| 7 Cojinete Guia | 14 Cono Rodete Francis |
| | 15 Cono Tubo de Aspiración |

UNCOMA – EQUIPOS@

2.4.1 Funcionamiento De Los Principales Componentes

Tubería forzada: conducto de entrada del agua a la máquina a alta presión.

Voluta o cámara espiral: conducto al que le llega el agua de la tubería forzada y que la distribuye uniformemente por todo el perímetro de entrada del rodete en dirección radial.

Distribuidor: conjunto de paletas directrices dispuestas de forma circular. Se utilizan para regular el caudal y el ángulo de entrada de agua que llega de la cámara espiral (26 en la Figura 5 ó 11 en la 4), y que ha de entrar en el rodete; este evita el embalamiento² de la turbina. Las directrices llegan a tocarse en la posición de cerrado (en cuyo caso no entra agua en el rodete), y se van abriendo a medida que giran un cierto ángulo sobre sus ejes, hasta llegar a la posición de máxima apertura, en cuyo caso el caudal de agua recibido por el rodete es máximo. El conjunto de directrices del distribuidor se acciona por medio de un anillo móvil, al que están unidas todas las paletas directrices. Para las turbinas axiales existen tres tipos de distribuidores: el cilíndrico, el cónico y el axial. De estos, el último es el que presenta más facilidades para su diseño y para su construcción en vista de sus dimensiones y de su peso más pequeño que en otros casos. La disposición de los alabes es radial y su perfil laminar aporta sus ventajas: facilidad de diseño y construcción y factibilidad de cierre hermético. El agua es acelerada al pasar por esta sección (EFICIENCIA @ 2006).

Rodete: constituido por un cierto número de paletas o alabes. El agua pasa a través de este y lo hace girar. Es el encargado de realizar la conversión de energía hidráulica, contenida por el agua, a energía mecánica rotacional.

² Referente a la velocidad de embalamiento, esta velocidad es la alcanzada por el rodete de la turbina cuando se corta el consumo de la carga generada por el sistema, en estas condiciones el rodete gira libremente incrementado su velocidad peligrosamente para el sistema.

Tubo de aspiración: tubería de salida del agua a baja presión. Este tiene dos funciones, una es facilitar que la turbina sea instalada debajo del nivel de descarga de modo que no se pierda altura produciéndose un vacío en la parte superior del tubo de aspiración, el cual es compensado por la altura a la cual el rodete de la turbina es instalado, la segunda es reducir la velocidad de descarga en la salida del rodete a la de la salida del tubo, reduciéndose así las pérdidas finales de energía cinética en la descarga (EFICIENCIA @ 2006).

El funcionamiento de la turbina Francis consiste en que el flujo de agua procedente de la tubería forzada, entra radialmente al rodete a través de la cámara espiral o voluta y sale del mismo axialmente, por el tubo de aspiración. La cámara espiral cuenta con unas aletas fijas que ayudan a direccionar el flujo de agua antes de pasar por el distribuidor, el cual direcciona el flujo antes del ingreso al rodete (TEV.CAP.7@ 2001), (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

La voluta tiene una forma espiral y convierte la energía potencial en energía cinética. Asimismo tiene la finalidad de establecer una distribución uniforme del agua alrededor del rodete. El agua que sale de la voluta pasa primero por el predistribuidor, con alabes fijos dispuestos circunferencialmente. Después del predistribuidor el agua pasa por el distribuidor, que tienen los alabes (directrices) móviles y regula el caudal que entra en el rodete. Estas directrices son orientables, de modo que pueden abrir o cerrar completamente el paso del agua hacia el rodete. Su misión, como ya se mencionó anteriormente, es doble: dirigir el flujo hacia el rodete con la orientación adecuada para que esté lo mejor conducido a través del alabe y regular el caudal (y, por tanto, la potencia suministrada).

En su recorrido a través del rodete, el agua experimenta otra caída de presión, hasta que finalmente sale por el centro a baja presión.

La variación de la cantidad de momento cinético que se obtiene procede de la desviación de la trayectoria del flujo y de la variación de las energías de presión

y cinética que proporciona la transferencia de energía que tiene lugar en el rodete.

Los problemas (por ejemplo, estanqueidad de las juntas) que plantean las altas presiones y velocidades, hacen que exista un límite superior para la altura con la que se puede utilizar este tipo de máquina. Estos problemas y muchos otros, hacen necesario que de acuerdo a las condiciones físicas de la instalación como por ejemplo de salto, caudal, entre otras, se seleccione un determinado tipo de turbina Francis, para más información ver capítulo 3, numeral 3.5 de *tev.cap.3@ 2001* (*TEV.CAP.7@ 2001*), (*UPC – CAVITACIÓN @ 2004*).

2.4.2 Formas Constructivas de la Turbina Francis

Las turbinas Francis, dependiendo de la forma del rodete, puede construirse de tipo lento, normal, rápido y extrarrápido (*CIPRESS @ 2006*).

El diámetro de entrada del rodete, en el tipo normal, es ligeramente superior al del tubo de aspiración. En el caso de las turbinas rápidas se obtiene mayores velocidades para la misma altura de salto. El diámetro del rodete resulta menor que el del tubo de aspiración y el cambio de dirección del agua se efectúa más bruscamente que en las turbinas normales.

En las turbinas extra rápidas, el agua entra como antes en dirección radial y recorre cierto espacio sin paletas antes de alcanzar la entrada del rodete. Como en todo ese espacio se anula el rozamiento con las paletas, se consigue una elevación del rendimiento.

Finalmente en los saltos grandes se emplean rodetes lentos. Con ellos se tiende a disminuir el crecido número de revoluciones que alcanzaría un rodete normal y para ello se aumenta el diámetro en relación con el del tubo de aspiración y se aumenta también el ángulo de entrada.

2.4.3 Número Específico De Revoluciones

El número de revoluciones llamado específico, es un parámetro imprescindible a la hora de diseñar instalaciones hidráulicas pues da indicaciones precisas que permiten determinar las turbinas más adecuadas para un salto de altura y caudal conocidos. A demás todos los tipos de turbinas se dividen según su número específico de revoluciones y ello constituye la base para establecer series de rodets y catálogos con todas las características que interesan en la construcción de las turbinas (CIPRESS @ 2006).

La relación de número específico de revoluciones se expresa a través de la siguiente formula:

$$n_s = \frac{n \times \sqrt{P}}{h \times \sqrt[4]{P}} = \frac{n \times \sqrt{P}}{h^{5/4}}$$

Donde:

n=velocidad de la turbina en r.p.m.

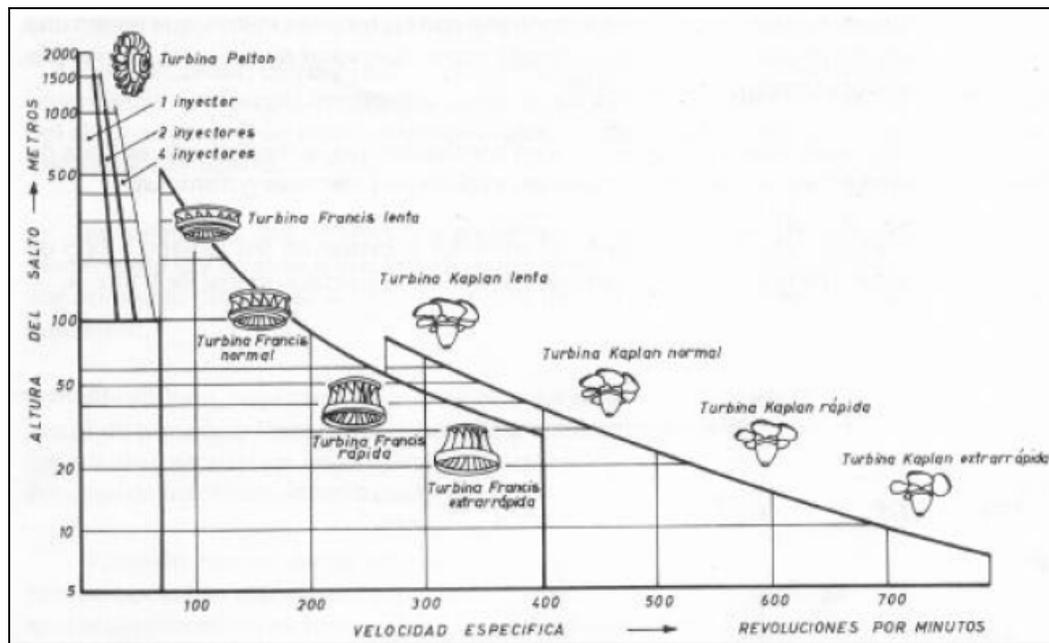
P=potencia de la turbina en CV

h=altura del salto en metros

2.4.4 Margen de Funcionamiento

El tipo de turbina más conveniente para ser utilizado en una central hidroeléctrica, ubicada en una zona con determinadas condiciones, viene dado por dos parámetros básicos de la instalación: H (la altura de salto) y n_s (la velocidad específica). Como se puede observar en la Figura 6, la turbina tipo Francis se usa en plantas de altura media. Los ejes pueden tener su orientación horizontal ó vertical.

Figura 6. Rango de operación de turbinas (rpm Vs h del salto)



UPC – CAVITACIÓN @ 2004

La utilización de turbinas Francis es recomendable cuando los valores de las instalaciones fluctúan entre los siguientes datos (UPC– CAVITACIÓN @ 2004):

- Un salto que puede oscilar entre los 18 - 520 metros.
- Caudales medios (de 1 a 700 m³ / s).
- Potencia: 0,1 - 700 MW.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA FRANCIS UTILIZADA POR UNA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA LOCAL.

La información que se presenta en este capítulo, ha sido recopilada utilizando documentos suministrados por la empresa de generación de energía en cuestión, tal información se basa en catálogos y manuales suministrados a la empresa por los fabricantes de la turbina Francis. Los datos suministrados son complementados con información proporcionada por personal de operación de la turbina (Manual De Operación SG-HE-T-MA-003), (Consortio ESGEM & Energomash).

3.1 INFORMACIÓN DEL FABRICANTE

La Turbina Hidráulica Francis de eje horizontal PO360-ГММ-100 utilizada por la empresa local de generación de energía, ha sido diseñada en la división de Turbinas Hidráulicas & Bombas / Departamento de Centro de Ingeniería de maquinaria para Turbina Hidráulica / Energomash (UK) Ltd. / Filial de la Compañía en San-Petersburgo / y manufacturada por la JSC “Uralhydromash”, Syser, región de Sverdlovsk (Rusia), el rodete de la turbina tiene 15 alabes, propios del rodete y 20 alabes distribuidores.

3.2 DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN

La empresa de generación de energía en cuestión, cuenta con dos HT iguales en la central de generación, en la Tabla 1 se proporcionan, entre otros, datos de cabeza, calculados con una o las dos HT funcionando.

Tabla 1. Características Técnicas

Tipo		Francis
Diseño		ГМН* – eje horizontal, en cámara espiral metálica, tubo de descarga curvo
Tipo de rodete		PO360
-Diámetro nominal del rodete D1, (mm)		1000
-Cabeza neta de diseño (m)	Cabeza máxima (con una sola máquina funcionando)	240,5
	Cabeza calculada (con dos máquinas funcionando)	230,6
-Potencia nominal de la HT con cabeza de diseño y descarga (MW)		10,54
-Gasto a través de la HT con potencia nominal y cabeza calculada, (descarga de agua) (m ³ /s)		5
-Velocidad de rotación nominal, (rpm)		900
-Velocidad de embalamiento, (rpm)		1500
-Dirección de rotación (mirando la HT desde el generador)		Izquierda (Contrario a las manecillas del reloj)
Altura permitida de la descarga con cabeza calculada y potencia nominal, (m)		-276
-Eficiencia máxima, (según salto y descarga de diseño) (%)		93,5
Eficiencia con potencia nominal y cabeza calculada, (%)		93.2
Cota del eje del rodete, (m)		937.24
Esfuerzo hidráulico máximo en (kN)		420
- Peso de las piezas giratorias de la HT, (kN)		11.77

Manual de Operación SG-HE-T-MA-003

3.2.1 Parámetros Límite Para Una Operación Sin Cavitación

Salto neto de operación: 230.6m

Nivel en la descarga: 940 m.s.n.m

Potencia máxima continua: 10540KW

3.2.2 Eficiencia Efectiva Ponderada (Eef)

La eficiencia efectiva ponderada corresponde a la sumatoria de los productos del factor de ponderación y la eficiencia mínima, para mayor detalle en su cálculo ver Oferta para suministro de los equipos electromecánicos y servicio de supervisión de montaje requeridos para las centrales hidroeléctricas “La Vuelta y La Herradura”. Tomo 2.

Eficiencia efectiva ponderada (Eef) = 91.3%

3.2.3 Parámetros Del Punto De Máxima Eficiencia

Salto neto = 225m

Descarga = $4.3\text{m}^3/\text{s}$

Eficiencia = 93.5%

Potencia = 8855KW

3.2.4 Oscilaciones Máximas De Potencia

Las oscilaciones máximas de potencia, con el equipo funcionando al 100% de su capacidad, es de $\pm 60\text{KW}$

3.2.5 Velocidad Máxima De Embalamiento

La velocidad máxima de embalamiento es de 1500rpm, la descarga máxima de la turbina durante tal condición es de $3.6\text{m}^3/\text{s}$.

El fabricante de la turbina garantiza un funcionamiento sin daño alguno, a la velocidad de embalamiento, de 30 minutos.

3.2.6 Empuje Hidráulico Máximo (EHM)

La información de empuje hidráulico máximo se proporciona bajo la condición de un salto neto máximo igual a 240.5m.

- EHM=220KN “con el valor nominal de diseño de la holgura de los sellos del rodete”
- EHM=420KN “con dos veces el valor nominal de diseño de la holgura de los sellos del rodete”

3.2.7 Fugas Máximas A Través Del Distribuidor

Las fugas máximas a través del distribuidor, bajo un salto de 240.5m, son de 40L / s, esto equivale a menos del 1% del caudal.

3.3 ESTADO COMPLETO DEL EQUIPO

A continuación se presenta una descripción completa de los elementos que conforman la HT, se da la información particular de cada componente incluyendo los elementos y materiales que lo conforman.

3.3.1 Partes Básicas Estacionarias

Las partes básicas estacionarias son compuestas por el tubo de entrada, la cámara espiral armada, el cono del tubo de descarga y su difusor, a continuación se hace una descripción de cada uno de estos elementos.

- Tubo de entrada.

El tubo de entrada es una estructura soldada elaborada en acero de carbón (lo más equivalente a ASTM – A 285/A 285M). Su configuración es una superficie cónica con un grueso de 20 mm y una longitud de 2000 mm con el conjunto de bridas – diámetro interno de 900 mm (entrada) y 770 mm (salida).

A un lado de la superficie de la tubería de presión está ubicado un niple (4) con rosca G1/2-B para posibilitar la conexión del sensor de presión mínima. Para el alce, el montaje y desmontaje de la tubería, se ubican argollas en la parte superior.

- Cámara espiral armada.

La cámara espiral armada está compuesta de la cámara espiral con el estator, la manhole “entrada de hombre”, empaques de caucho y pernos. La cámara espiral forma un ángulo de 351° y un diámetro a la entrada de 770 mm y es utilizada para garantizar el flujo constante de agua antes de los alabes de la HT. La cámara espiral y el estator son una construcción compleja a la cual se le hace tratamiento térmico y se controlan sus propiedades mecánicas en la fábrica. Los anillos de la cámara espiral están hechos de chapa de acero carbón de espesor de 12, 14, 16 y 18 mm. El estator está formado por dos anillos planos que entre sí están unidos por 20 alabes directrices uno de las cuales sirve como deflector final del caracol. La cámara espiral tiene una entrada de hombre

para revisión de diámetro 500 mm, tubería con bridas de diámetro 450 mm, para el montaje de la tubería de descarga, dos bases para fijarlas a la fundación, 2 mecanismos de alce, una base para el distribuidor, un dispositivo para fijar el servomotor, una brida de diámetro 50 mm para montar la válvula de chequeo, están previstos niples para la toma de presión de los sensores y equipos de medición. En la cámara espiral están ubicadas unas bases para fijar las cajas con borneras de los equipos automáticos y los cables.

- Cono del tubo de descarga.

La tubería es una construcción soldada, fabricada en chapa de 16 mm de acero carbono. En la entrada se tiene una brida para la unión del anillo inferior del distribuidor y el cono con un diámetro de entrada de 801 mm. Más adelante está compuesta por eslabones de forma elíptica para direccionar el flujo. En el cono están montados tres tubos de acero inoxidable para inyectar aire a la zona del rodete. Tres niples para tomar la presión con rosca G1/2B y una tubería con bridas para instalar el descargue. A la salida se tiene una brida para conectar el difusor.

- Difusor del tubo de descarga.

El difusor de la tubería es un caracol soldado de longitud de 2200 mm de forma elíptica a la entrada y un diámetro de 1800 mm a la salida. A la entrada se tiene una brida para la conexión de la tubería de descarga.

3.3.2 Equipo Principal.

El equipo principal se compone por el rodete, el distribuidor, el sello del eje y el servomotor, a continuación se hace una descripción de cada uno de estos elementos.

3.3.2.1 Rotor de la HT.

El rotor de la HT y el eje están soldados entre sí y se le ha realizado tratamiento térmico y balanceo como una sola unidad. El rodete con un diámetro nominal de 1 m está elaborado de acero inoxidable de alta dureza y resistente a la

cavitación 08X13H4DML (lo más equivalente a ASTM – A743 CA-6NM). En este diseño, el rodete es suministrado íntegramente en un molde y consiste en una corona, 15 hojas y una cinta. Hay 15 agujeros en la corona del rodete que alivian la fuerza de empuje que actúa en el rodete por acción de la corriente de agua. Hay sellos móviles de una dureza mayor montados en la corona y en la cinta. En una de las caras se tiene unos agujeros con rosca para instalar los dispositivos de montaje y desmontaje de los sellos. El eje es una forja conformada de acero inoxidable de alta dureza 06X15HDM, el rodete con el eje son acoplados al eje de la turbina por la brida con seis pernos M64, incluyendo dos pernos de ajuste. Para la protección del eje del desgaste en la zona del sello se coloca un anillo de acero inoxidable, el cual se centra con el eje y se fija a través de su brida al rodete. Para un posible cambio del deflector este está compuesto de dos partes removibles.

- Distribuidor.

El distribuidor cilíndrico consiste en la cubierta principal, el Anillo inferior, veinte alabes móviles, cojinetes y el mecanismo de operación de los alabes móviles. La tapa de la turbina es una estructura soldada en acero al carbono. Está acoplada vía la brida externa con la brida de soporte de la carcasa con pernos y espárragos. La cubierta principal tiene superficies maquinadas que cargan las cubiertas de los cojinetes de los alabes móviles y la cámara del sello del eje. La cubierta principal tiene cuatro aberturas M20x1.5 para la medición de las holguras entre la parte fija y móvil para medir las separaciones entre los sellos estáticos y móviles, hay un agujero roscado G1/2-B para conectar las tuberías de instrumentación. Los cojinetes del vástago del alabe móvil superior e inferior se montan en las cubiertas y se aseguran en la cubierta principal y el anillo inferior del distribuidor, respectivamente. Cuando la turbina esté operando, una fuerza de empuje actúa en el alabe móvil hacia la cubierta principal. La reacción esperada actúa en el anillo inferior del distribuidor, el cojinete de empuje y el anillo.

Los cojinetes del vástago del alabe móvil son bujes. Sus superficies de rozamiento están hechas de carbón plástico УГЭТ – que es un material que no requiere de lubricación. Para cambiar los cojinetes del vástago del alabe móvil,

un dispositivo especial es suministrado (Vea SG-HE-T-P-032 Pl. 03201.2205.96.00.000A CБ). El mecanismo de operación del alabe móvil incluye una viga transversal, pasadores, anillo de operación soldado, palancas, cubiertas de las palancas, pines, acoples y pines de cizallamiento. Las superficies de rozamiento del anillo de operación diario del distribuidor y los cojinetes de empuje y los bujes cinemáticos también se elaboran en carbón plástico УГЭТ. El eje de la corona se coloca en un soporte ubicado alrededor del estator en la cámara espiral. Para evitar que los alabes móviles giren sobre su eje y se descalibren cuando los pernos de cizallamiento se rompan, hay fusibles especiales “estos son los mismos pernos de cizallamiento” proporcionados en las palancas y en la cubierta principal. Los alabes móviles están sellados con empaques – en las superficies de contacto y en los vástagos – con retenedores de caucho.

- Sello del eje.

El sello del eje está destinado para restringir las fugas de agua bajo la cubierta principal para todos los modos de operación de la turbina. El sello del eje es del tipo prensaestopas en el cual se aloja los anillos de empaque. La cámara del sello esta instalada en la cubierta principal y asegurada con diez espárragos M16. El agua para la lubricación y el enfriamiento del relleno del sello y la línea del eje se realiza a través del agujero roscado G1/2-B en la cámara del sello. La manguera transparente permite controlar visualmente el grado de escape a través del sello del eje. Para evitar las fugas alrededor del eje y la brida del extremo de la caja del sello, hay unos anillos de relleno ubicados dentro de la caja.

- Servomotor

El servomotor conduce el mecanismo de funcionamiento de el alabe móvil de la turbina que está operando. El servomotor es asegurado con argollas soldadas a la cámara espiral. El pistón del cilindro tiene un diámetro de 150 mm. El recorrido completo es de 100 mm, incluyendo el recorrido de ajuste del alabe de 3 mm. Los servomotores tienen bujes de materia plástico en las partes de conexión

La presión nominal del aceite es de 6.3 MPa (64 kgf/cm²). Hay espárragos de carbón plástico УГЭТ ubicados en las argollas del servomotor. La fuerza del servomotor vía la viga transversal y los acoples, es transmitida a los anillos de operación. El diseño del servomotor provee un retraso en el extremo del cierre en el recorrido y una válvula de regulación para ajustar el tiempo de apertura. Hay un seguro instalado en el servomotor y permite que el distribuidor se fije en su posición de cerrado. El seguro esta diseñado para la fuerza impulsora total del servomotor.

3.3.3 Equipo auxiliar

El equipo auxiliar se compone de los elementos que apoyan el cumplimiento de la función principal de la turbina, estos son:

- Tubería de descarga.
- Instrumentación y tuberías.
- Panel de instrumentación.
- Tubería de aire.
- Tubería de alivio de presión.
- Entrada de agua al sello del eje.
- Tubo de descarga completo.
- Instalación del eje de seguridad.

3.4 MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES

Los materiales de los principales componentes se listan en las tablas 2 y 3, allí se presenta el material en estándares Rusos y su respectiva equivalencia AN-SI/SAE. Las designaciones de los elementos que aparecen en las tabla son: σ_0 punto de fluencia “yield point” , MPa - σ_B resistencia ultima “tensile ultimate strength”, MPa – HB dureza Brinell “Brinell hardness” - δ_5 elongación relativa “relative elongation”, % - KCU “impact strength on U-notch specimens”, J/cm² - KV⁻¹⁰ “impact energy on V-notch specimens a T=-10 °C”, J

Tabla 2. Propiedades de los materiales usados en la fabricación de los principales componentes de la turbina hidráulica de la herradura según estándares Rusos GOST and TU y ASTM/ SAE

No	Part/ Component Description	Material	National Standard	Equivalent Standard ASTM, AISI/SAE, UNS, EN	CHEMICAL COMPOSITION, %										Thickness, mm, diametr, mm	MECHANICAL PROPERTIES AT MECHANICAL PROPERTIES AT TEMPERATURE +200C				
					C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	S	P	s _B		s _B	d ₅	KCV ₁₀	HB	
1.	Runner: Crown, Blades, Band	Steel 08X13H4MII Casting	Special order	ASTM A 743 CA-6NM	<0.08	<0.40	1.00-1.50	12.0-14.0	3.50-3.90	1.00-1.40	0.30-0.45	0.025	0.025	590	740	17				
2.	Distributor: Guide Vanes	Steel 08X13H4MII Casting	Special order	ASTM A 743 CA-6NM	<0.08	<0.40	1.00-1.50	12.0-14.0	3.50-3.90	1.00-1.40	0.025	0.025	590	740	17					
3	Head Cover Bottom Ring Operating Ring	Steel Cr3 Rolled Stock	GOST 380-88 GOST 14637-89	ASTM A 285I A 285M Grade B	0.14-0.22	0.15-0.30	0.40-0.65	<0.30	<0.30	<0.30		0.050	0.040	245	370-480	26	69			
4	Stationary Seals	Steel 14X17H2 Rolled stock	GOST 5632-72 GOST 7330-77	AISI/SAE Grade 431/51431	0.11-0.17	<0.80	<0.8	16.0-18.0	1.50-2.50		0.025	0.030	885	1080	10		240-250HB			
4	Stationary Seals	Steel 20X17H2	GOST 5632-72	ASTM A 285I A 285M Grade B	0.17-0.25	<0.50	<0.80	16.0-18.0	1.50-2.50		0.025	0.035	666	813	12		270-293HB			

No	Part/Component Description	Material	National Standard	Equivalent Standard ASTM, AISI/SAE, UNS, EN	CHEMICAL COMPOSITION, %								Thickness, mm, diameter, mm	MECHANICAL PROPERTIES AT TEMPERATURE +200C				
					C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	S		P	S _{0.2}	s _B	d ₅	KCV KV ₁₀
					NOT MORE								MORE THEN					
5	Turbine-Generator Flange Connection Bolts	Steel 30X13A, Rolled stock	GOST 4543-71		0.28-0.34	0.90-1.20	0.80-1.10	0.80-1.10	<0.30	<0.30	<0.30		0.025	0.025	835	1080	10	49
6	Flange Connection Pins (Vuelta)	Steel 30X13 Rolled stock Steel 20X13 Rolled stock	GOST 5632-72, ГОСТ ГОСТ 18907-73	UNS S42020 (420F) UNS S42000 (420)	0.26-0.35	<0.80	<0.80	12.0-14.0				0.025	0.030					78
7	Shaft (Vuelta)	Steel 40 Forging	GOST 1030-88, GOST 8479-70		0.37-0.45	0.17-0.37	0.50-0.80	<0.25	<0.30	<0.30		0.040	0.035	315	530	14	34	
8	Machhole Shell, Stay Ring Vanes, Pressure Relief Connection (Herradura)	Steel 10XCHJ Rolled stock	GOST 19281-89, GOST 6713-91	UNS G10400 (1040) EN C 40 E	<0.12	0.80-1.10	0.50-0.80	0.60-0.90	0.50-0.80	0.40-0.60		0.040	0.035	390	510-670	19	29	

3.5 DOCUMENTACIÓN TÉCNICA ENTREGADA POR EL FABRICANTE DE LA TURBINA

La siguiente información de diseño de la turbina Francis: memorias de calculo, especificaciones propias de diseño, análisis de elementos finitos, curvas de eficiencia, entre otros, información que es propia de la turbina Francis utilizada por la central de generación de energía en cuestión, se tiene a disposición en el archivo interno de la empresa, esta se ubica en la sección de generación de energía, los documentos disponibles son:

- Fuerzas axiales de empuje de la turbina hidráulica
- Fuerzas y cargas que actúan en la estructura de la turbina
- Fuerzas y cargas que actúan en la base de la válvula de alivio de presión.
- Análisis de esfuerzos del rodete de la turbina
- Análisis de esfuerzo de los elementos del distribuidor
- Diseño y calculo de la brida de unión de la unidad de potencia del rotor y el eje de la turbina.
- Parámetros de rendimiento de la turbina hidráulica Francis (PO360-ГМИ-100).

4. TÉCNICAS DE MONITOREO

Las técnicas de monitoreo constituyen elementos específicos de orden técnico; la cantidad de alternativas que se pueden usar en este campo es amplia y diversa. A continuación se listan algunas de estas metodologías que tienen gran aplicación y gran difusión en el medio internacional, de estas se encuentra gran cantidad de información, folletos catálogos y aplicaciones comerciales e industriales; en el actual proyecto solo se presenta información general y resumida de las técnicas investigadas, si el lector desea ampliar la información suministrada puede utilizar la bibliografía entregada en el actual documento; la aplicación que se da a algunas de estas técnicas se enmarca en turbo maquinas hidráulicas o mas específicamente turbinas Francis.

Las técnicas de monitoreo pueden ser clasificadas en tres grandes áreas: térmica, tribológica y de vibraciones, el conocimiento atribuido a estas áreas constituye el principio de funcionamiento de muchas de las técnicas de monitoreo. A continuación se listan las técnicas con aplicación conocida a turbinas hidráulicas, ello según la investigación realizada, estas técnicas abarcan el conocimiento de las tres grandes área. Posteriormente se tratan las demás técnicas investigadas, de las cuales, no se encontró aplicación a maquinas hidráulicas, esto obedece a que su utilización se hace sobre problemas específicos de cada central hidroeléctrica y por tanto su publicación es limitada.

4.1 VIGILANCIA DE LAS TEMPERATURAS

Los daños en rodamientos, defectos en sistemas de refrigeración, sistemas de generación de calor o manejo energético, depósitos y sedimentos de materiales no deseados, daños en aislamientos, condiciones no estándares en sistemas eléctricos, etc., son algunas de las fallas que se pueden evidenciar con el monitoreo de temperatura. El monitoreo de la temperatura se puede generar utilizando aparatos térmicos como lo son: termómetros, termistores, pinturas, polvos térmicos, termóstatos, cámaras de rayos infrarrojos, sensores de tempera-

tura, sensores de contacto, sensores basados en dilatación o expansión de líquidos, sensores bimetálicos en expansión, termopares, termocuplas, termoresistencias, testigos de color, bolas (pellets), sensores sin contacto, pirómetros ópticos y de radiación, cámaras infrarrojas, entre otros. (Kelly y otro,1998,125) (137-141) (Dounce,1998,93-95) (Mora, 2005, 231).

En el caso de una turbina Francis, es posible evidenciar condiciones anormales a través de la vigilancia de las temperaturas, un ejemplo de ello es el estudio realizado por el Ingeniero Gülich JF perteneciente al laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza, en su reporte “Rotor dynamic and thermal deformation tests of high-speed boiler feedpumps”, en este se trabaja la deformación térmica en el rodete de una turbina Francis.

La aplicación de la vigilancia de las temperaturas a turbinas Francis se ve claramente en el análisis de falla realizado por el departamento de Ingeniería Mecánica de Zimbabwe en el trabajo “Failure analysis of hydro-generator thrust bearing”, allí, mediante el uso de termocuplas, se analiza el exceso de temperatura del rodamiento del eje, el cual registraba niveles mayores a los 70°C obligando a sacar de servicio la turbina, este análisis térmico se realizó como apoyo a un análisis del lubricante del rodamiento (SCOPUS– FAILUREANALYSIS @1999).

4.1.1 Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja puede medir la temperatura superficial mediante la evaluación de radiación infrarroja. Se utiliza en una amplia gama de máquinas y sistemas, como: instalaciones eléctricas, calderas, refractarios, turbinas, etc. Su funcionamiento se basa en la medición de las variaciones de gradientes de temperatura sobre las máquinas y elementos en estudio. La generación de calor puede tener su origen sistemas mecánicos, eléctricos, térmicos, hidráulicos o neumáticos (Sourís,1992,116) (Duffua y otros,1995,84) (Mora, 2005, 232).

4.2 INSPECCIÓN VISUAL, ACÚSTICA Y AL TACTO DE COMPONENTES.

El chequeo continuo durante la operación o el mantenimiento de máquinas, constituye una actividad relevante para los instrumentos avanzados de detección de fallas o condiciones fuera del estándar. La presencia visual de desgastes, situaciones anormales y ruidos indican que tiene un generador de falla en el sistema, que puede evitarse tomándose las acciones correspondientes. (Kelly y otro, 1998, 125) (Mora, 231).

La técnica de inspección visual puede ser utilizada para diversas situaciones referentes a máquinas hidráulicas, por ejemplo con base a observaciones directas el Ingeniero Pedro Ayuso, de la Universidad Politécnica de Cataluña, en su tesis de detección de cavitación en turbinas Francis, hacen cinco ensayos en el modelo que corresponden a diferentes regímenes de funcionamiento. En uno de los puntos de trabajo se observa una absoluta ausencia de cavitación, circunstancia que permite un contraste más efectivo respecto a los otros cuatro, que sí presentan alguno de los tipos más habituales de cavitación. Como se describió anteriormente, el estudio se basa en inspección visual de un modelo, dando fe de la aplicación de inspección visual en turbinas hidráulicas.

Una gran desventaja de este método de monitoreo es la subjetividad de las mediciones, esto es, la dependencia de la forma de percepción de quien adelanta la inspección.

4.3 ANÁLISIS DE LUBRICANTES

Algunas de las pruebas más solicitadas y utilizadas, son: conteo de partículas³, RBOT's⁴, ultracentrífuga, residuos depositados (filtros, colectores magnéticos), residuos en suspensión (análisis del aceite con espectrómetro y análisis ferrográfico) y estado general del aceite en uso (espuma, emulsión, color, demás variables físico-químicas del lubricante), estos proveen información adicional sobre la capacidad del aceite para continuar en servicio así como de condiciones operativas que puedan conducir a menor vida del aceite o aún desgaste acelerado de componentes (Sourís,1992,117) (Dounce,1998,89-95) (Kelly y otro,1998,135-136).

El continuo análisis de los aceites permite el uso de diferentes técnicas que se aplican para determinar su composición química, y deducir por ende los parámetros de funcionamiento, materiales extraños y sus anormalidades. Técnicas como la ferrografía y la detección de partículas ferrosas, permiten monitorear y diagnosticar el estado de desgaste de elementos con movimiento relativo a través de la cantidad de viruta y limaya encontrada en el aceite. El análisis espectrométrico mide la presencia y la cantidad de contaminantes en el aceite, el espectrómetro de emisión atómica o absorción sirven para estas pruebas, que detectan la presencia de metales ferrosos y no ferrosos, como de partículas no metálicas. La cromatografía evalúa los cambios en las propiedades de los lubricantes, como pH, presencia de agua, viscosidad, punto de inflamación, fracción insoluble de agua, etc. mediante la absorción y los análisis específicos (Mora, 2005, 231).

Entre los parámetros de funcionamiento a tener en cuenta en los lubricantes, están: temperaturas de trabajo, presiones a que son sometidos, velocidades de funcionamiento y condiciones ambientales del sitio de operación. Algunos de

³ También llamado nivel de código ISO de limpieza.

⁴ Ensayo de Oxidación por Bomba Rotativa (Rotary Bomb Oxidation Test -RBOT), entrega información referente a la vida útil en cuanto a la oxidación remanente de ese aceite.

los análisis o pruebas de aceite mas utilizadas son: residuos depositados (filtros, colectores magnéticos), residuos en suspensión (análisis del aceite con espectrómetro y análisis ferrográfico) y estado general del aceite en uso (espuma, emulsión, color, demás variables físico-químicas del lubricante). (Sou-rís,1992,117) (Dounce,1998,89-95) (Kelly y otro,1998,135-136)

En el caso de turbinas hidráulicas, el principal propósito de un programa de monitoreo es el de proteger al equipo y asegurar una utilización del aceite de turbina lo más extensa posible y libre de problemas (Martins, 2006, 1).

Algunos beneficios específicos de los análisis de aceite en turbinas Francis, según lo indicado por la ExxonMobil, son:

- Se hace posible identificar cambios en el aceite y en la operación o condición de la turbina al monitorear tendencias.
- Alerta temprana de problemas potenciales, así puede remediar la condición antes que se convierta en un problema serio resultando en ahorros en mantenimiento y lucro cesante.
- Validar problemas que fueron indicados por otras herramientas tales como análisis de vibraciones, termografía infrarroja e inspecciones visuales.
- Determinar la efectividad de los equipos de filtración, acondicionamiento de aceites y remoción de contaminantes.
- Determinar la efectividad de los procedimientos de flushing⁵.

⁵ Actividades de limpieza del deposito de aceite

Los análisis de aceite han probado ser muy efectivos en muchas aplicaciones, pero también posee algunas limitaciones (E Martins, 2006, 1):

- No detecta todos los problemas. Son diseñados para brindar información básica de manera rápida sobre la condición del aceite. Algunos problemas tales como depósitos en sistemas de circulación, no serán siempre evidentes en los resultados de análisis de aceites usados.
- Los ensayos analíticos por sí mismos tienen algunas limitaciones. Por ejemplo, los ensayos de oxidación y el número total ácido (TAN) pueden verse afectados por la interferencia de aditivos y contaminantes.
- El análisis de aceites usados no tiene todas las respuestas, pero complementa datos de otros analizadores de equipos. El monitoreo de vibraciones y las inspecciones rutinarias ayudarán a identificar condiciones que puedan acortar la vida del aceite o de la turbina (2).

Los aceites que la Exxonobil recomienda utilizar en turbinas hidráulicas son: el DTE Light, Medium, Heavy Medium y Heavy que tienen una larga vida de servicio y buena protección ante la corrosión, estos aceites tienen la característica de contar con altos grados de viscosidad que asegura una mínima variación del espesor de la película protectora con la temperatura y mínima pérdida de potencia en el periodo de calentamiento.

Una aplicación de lo mencionado anteriormente se realiza por el departamento de Ingeniería Mecánica de la universidad de Zimbabwe, en el estudio "Failure analysis of hydro-generator thrust bearing", en este se determinan problemas de calentamiento en el rodamiento del eje de la turbina (temperaturas mayores a los 70°C causal de paros de la turbina), tal calentamiento es atribuido a parámetros del lubricante por lo que se hacen análisis del mismo, el lubricante utilizado para este elemento es el Mobil DTE, heavy médium (con una viscosidad de 64 cSt a 40°C), las recomendaciones y conclusiones determinadas en

este análisis coinciden con lo indicado por la ExxonMobil, confirmándose así la información entregada inicialmente (SCOPUS– FAILUREANALYSIS @1999).

4.4 ANÁLISIS DE VIBRACIONES.

Las situaciones fuera del estándar pueden ser determinadas si se cuenta con patrones de funcionamiento en condiciones normales, esto se logra como una metodología bastante utilizada en el diagnóstico y monitoreo de equipos y elementos, a través de las vibraciones. Permite detectar defectos internos como: desalineaciones de rodamientos y poleas, desequilibrios dinámicos, desgastes de engranajes, sobrecargas, ejes defectuosos, etc. Las vibraciones se pueden definir como el movimiento de una masa desde un punto de reposo a lo largo de todas posiciones y de regreso al punto de reposo, en donde está lista la máquina para repetir el ciclo. Entre los parámetros relevantes de vibraciones están: severidad de la vibración, espectros, situaciones de movimiento, velocidades pico, banda octava, desviaciones en las frecuencias de vibraciones, aceleración pico, espectros de frecuencias, ángulos de fase, banda amplias y estrechas, etc. Su aplicación es amplia en el monitoreo y diagnóstico de equipos de rotación (Sourís,1992,114-116) (Duffua y otros,1995,82-83) (Kelly y otro,1998,125-126) (141-153) (Mora, 2005, 232).

Uno de los ensayos más comunes en máquinas de rotación es el Run-Down o Shut - Down, el cual revela mucha información, se realiza cuando se empieza a reducir la velocidad antes de una parada total y que tiene la particular de generar el efecto de amplificación de las vibraciones cuando el sistema entra en resonancia al pasar por su velocidad crítica (Kelly y otro,1998,128) (VIBRACIONES@,1998) (Mora, 2005, 233).

Las turbinas Francis durante su funcionamiento soportan esfuerzos dinámicos de origen hidráulico, mecánico y eléctrico que inducen vibraciones y establecen un estado de tensiones variables que provocan el envejecimiento y el desgaste de sus componentes. El nivel de deterioro de una máquina rotativa se refleja en

las amplitudes de las vibraciones. Los niveles de vibraciones excesivos son peligrosos para el funcionamiento de las máquinas y están limitados por algunas normas vigentes (UNESP/FEIS – CAVITACIÓN @ 2006).

El análisis de vibraciones constituye una de las técnicas de monitoreo más utilizadas en turbinas Francis, según lo investigado en institutos como el laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza, la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zimbabue, la central hidroeléctrica Canadiense Hidro Québec, entre otros⁶, los estudios realizados al respecto han girado entorno a el análisis de vibraciones enfocado a la detección de cavitación, se cuenta también con normas para ello como por ejemplo la ISO/TC/SC2-1994 que establece los límites de severidad en función de la rotación de la máquina. Un ejemplo de utilización de técnicas de vibraciones es el estudio realizado por el Ingeniero Pedro Ayuso, de la Universidad Politécnica de Cataluña, en su tesis de detección de cavitación en turbinas Francis (UPC – CAVITACIÓN @ 2004), en esta utiliza técnicas como el espectro de potencia para determinar la energía de la vibración resultante en función de la frecuencia, la técnica de demodulación en amplitud, fundamentada en el hecho de que las vibraciones de alta frecuencia que acompañan al fenómeno de la cavitación en máquinas hidráulicas suelen estar moduladas en amplitud debido al comportamiento hidrodinámico del flujo; en otras palabras: busca el “ritmo” con el que se produce u oscila la cavitación. En el trabajo realizado, detección de cavitación, se utiliza también la función de transferencia y la coherencia, donde la primera representa la relación existente entre salidas y entradas al sistema de estudio en el dominio frecuencial y la segunda evalúa el grado de correlación lineal existente entre dos señales, en función de la frecuencia correspondiente. La representación de las señales se hace en el dominio tiempo-frecuencia pues mejora los resultados de los métodos espectrales y temporales clásicos al ser capaz de reflejar cambios en frecuencia con respecto al tiempo

⁶ Si el lector está interesado en conocer dichas fuentes puede consultar la sección de referencias bibliográficas.

(transitorios espectrales), cosa que en un análisis espectral clásico no se puede detectar, por lo que se mejora la clasificación o detección de determinadas propiedades de la señal analizada (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

El laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza, ha utilizado la medición de las vibraciones en muchos de sus estudios sobre turbinas Francis, ejemplos de ello son las publicaciones realizadas por miembros del instituto como Xavier Escaler y Eduard Egusquiza, quienes han descrito la predicción de la cavitación erosiva en turbinas a través de las vibraciones en su libro “Cavitation erosion prediction in hydro turbines from onboard vibrations”. El análisis de las vibraciones ha sido utilizado por Mike Kaye y Mohamed Farhat para clasificar los tipos de cavitación en máquinas hidráulicas, esta clasificación se describe en el libro “Classification Of Cavitation In Hydraulic Machines Using Vibration analysis”. Diversos estudios referentes a las vibraciones han sido realizados en este instituto: monitoreo de la erosión por cavitación a partir de análisis de vibraciones, experiencias del aprovechamiento de las vibraciones para el monitoreo de la cavitación, entre otros, todo ello es evidencia de la importancia del análisis y utilización de las vibraciones para el estudio y monitoreo de máquinas hidráulicas.

El Laboratorio de Vibraciones y Instrumentación (LVI) del Departamento de Engenharia Mecânica de la Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP viene desarrollando trabajos de monitorización y análisis de vibraciones en grupos de centrales hidroeléctricas de Brasil, este describe algunos procedimientos experimentales adoptados para ello en cuanto a la instalación de captadores, su calibración y las pruebas a realizar.

A continuación se describen las técnicas de monitoreo sin desarrollos o adelantos en investigación actualmente conocidos en turbinas hidráulicas, vale aclarar que es posible su utilización en este tipo de máquinas, por ello se describe algunas posibles aplicaciones en diferentes elementos.

4.5 ULTRASONIDO.

4.5.1 Ultrasonido Como Método Para Detección De Irregularidades En Materiales.

El método consiste en lanzar pulsos u ondas de ultrasonido al interior de los materiales y con las respuestas obtenidas al regreso de la señal determina la ubicación física y la criticidad de la falla. Se las emplea para detectar fallas, grietas, soldaduras deficientes, huecos, corrosiones, desgastes, anormalidades, roturas en elementos tales como: estructuras, ejes, tuberías, etc.; En aceros actúan adecuadamente en espesores entre 0.5 y 300 milímetros (Sourís,1992,116) (Duffua y otros,1995,84) (Kelly y otro,1998,127) (Mora, 2005, 233).

4.5.2 Ultrasonido Como Método Para Monitorear Vibraciones

El monitoreo de maquinas hidráulicas utilizando instrumentos basados en la medición ultrasónica, presenta algunos beneficios ya que este tipo de instrumentos se caracterizan por la captación de altas frecuencias, desde 20000Hz, por ejemplo en el estudio de la cavitación, estos elementos son ideales, ya que tal fenomenito ocurre en unos instantes de tiempo muy cortos, así la señal capturada por el sensor de ultrasonido presenta menos ruido que la que se captaría con otro tipo de sensores.

4.6 MONITOREO DE LA CORROSIÓN

El estado y la velocidad de corrosión o desgaste en los elementos, sistemas o máquinas, puede ser evaluado a través de instrumentos eléctricos, mecánicos o productos químicos. Entre las diferentes pruebas se señalan algunas como: probetas, ultrasonido, láser de pulsos, etc. (Sourís,1992,116) (Kelly y otro,1998,125) (Mora, 2005, 231).

4.7 RESISTENCIA ELÉCTRICA

La presencia de fisuras en superficies de piezas o componentes de un elemento, aumenta eléctricamente la resistencia medida entre dos probetas en contacto con el material que se estudia (Kelly y otro,1998,127) (Mora, 2005, 231).

4.8 MONITOREO DE CAUSAS Y EFECTOS ELÉCTRICOS

Las metodologías de monitoreo eléctrico se fundamentan en un circuito eléctrico simple que mide el grado de corrosión de elementos o sistemas, utiliza diferentes métodos, entre ellos se menciona el método de polarización electroquímica de un recipiente con un líquido corrosivo; otra es la de los generadores de voltaje para evaluar motores o generadores, etc. (Duffua y otros,1995,84) (Mora, 2005, 232).

4.9 LÍQUIDOS PENETRANTES

Los líquidos penetrantes y de tintas líquidas son usados para detectar grietas, superficies escalonadas o fisuras en los elementos; estos problemas son provocados por desgaste, fatiga, mantenimientos y reparaciones inadecuadas, corrosión, agentes atmosféricos, entre otros. La detección de fugas o grietas en las máquinas, al utilizar como medio de contraste líquidos jabonosos, se puede considerar como una prueba sencilla de líquidos penetrantes. Es una técnica relativamente bien difundida, económica y efectiva (Duffua y otros,1995,84) (Sourís,1992,116) (Kelly y otro,1998,126). (Kelly y otro,1998,125-127). Fisuras hasta de $0.25\mu\text{m}$ se pueden observar a simple vista, otras más finas se detectan con instrumentos más especializados⁷ (Mora, 2005, 233).

Las desventajas de los análisis con líquidos penetrantes consisten en el tiempo requerido para ello y la necesidad de parar el equipo para la realización de la

⁷ Lo describe la norma británica BS 3889 Methods for Non-destructive Testing of Pipes and Tube - BSI - Londres - Inglaterra - 1968

prueba, en caso de que la pieza a analizar se encuentre montada en el equipo; si la pieza se ubica en un lugar de difícil acceso en la maquina, esta deberá ser desmontada obligando a mover otros componentes de la maquina, todo esto carga tiempos al análisis haciéndolo, en ocasiones, un poco engorroso.

4.10 ENSAYO DE PULVERIZADO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Esta técnica consiste en inducir un campo magnético en la superficie donde existe una fisura, mediante una inducción localizada de superficie con imanes tipo U; hace que el polvo magnético se focalice alrededor de la grieta (Kelly y otro,1998,125-127).

4.11 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Los ensayos y monitoreos no destructivos, no son en si una técnica de monitoreo, mas bien constituyen una rama donde se pueden clasificar varias técnicas como: rayos X y radiografías utilizadas para la detección de irregularidades en materiales y corrosión, las fibras ópticas para exámenes de profundidad, el ultrasonido, los procedimientos ópticos, los tratamientos de imagen, la termografía infrarroja, ensayos bajo monitoreo, pruebas de aceleración de vida útil, etc. (Duffua y otros,1995,84) (Kelly y otro,1998,126).

4.12 MONITOREO DE RUIDO

Una continua revisión y medición de ruidos, permite detectar en forma temprana fallas o percibir elementos con algún tipo de problema; el sistema se basa en medir las características de ruido bajo condiciones normales y poder usar esta referencia para detectar anomalías. Puede usarse como un método previo a un análisis más profundo de vibraciones (Sourís,1992,114-118) (Kelly y otro,1998,125-126) (141-126) (Mora, 2005, 234).

4.13 FILTROS MAGNÉTICOS.

Son utilizados en el monitoreo del estado de los lubricantes, se colocan a la salida de los sistemas y unidades automáticas de lubricación, mediante el chequeo del estado del aceite y de la presencia de partículas permite diagnosticar la presencia de fallas o de pérdidas de las condiciones estándar de los sistemas o máquinas (Kelly y otro,1998,125-126) (Duffua y otros,1995,83) (Mora, 2005, 234).

4.14 CORRIENTES INDUCIDAS

El flujo de corriente eléctrica a través de una bobina que se coloca cerca de la superficie evaluada (en cuanto a desgastes o presencia de grietas) induce corrientes de Foucoul en el elemento. Las corrientes son detectadas por cambios en la inductancia de la bobina generadora o de la otra bobina correspondiente al ensayo. (Kelly y otro,1998,127) (Mora, 2005, 234).

Las corrientes inducidas, corrientes eddy, pueden ser utilizadas para:

- Medir o identificar condiciones o propiedades tales como: conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, condición de tratamiento térmico, dureza y dimensiones físicas de los materiales.
- Detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales, como costuras, traslapes, grietas, porosidades e inclusiones.
- Detectar irregularidades en la estructura del material.
- Medir los espesores de un recubrimiento no conductor sobre un metal conductor, o el espesor de un recubrimiento metálico no magnético sobre un metal magnético.

Las corrientes inducidas presentan varias ventajas como lo son:

- Se aplica a todos los metales, electroconductores y aleaciones.
- Alta velocidad de prueba.
- Indicación inmediata.
- Detección de áreas de discontinuidades muy pequeñas.
- La mayoría de los equipos trabajan con baterías y son portátiles.
- La única unión entre el equipo y el artículo bajo inspección es un campo magnético, no existe posibilidad de dañar la pieza

Las desventajas de esta técnica de monitoreo son:

- La capacidad de penetración está restringida a menos de 6 mm.
- En algunos casos es difícil verificar los metales ferromagnéticos.
- Se aplica a todas las superficies formas uniformes y regulares.
- Los procedimientos son aplicables únicamente a materiales conductores.
- No se puede identificar claramente la naturaleza específica de las discontinuidades.
- Se requiere de personal calificado para realizar la prueba (CORRIENTES INDUCIDAS @ 2006).

4.15 CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL Y MONITOREO

La detección de parámetros anormales en turbinas hidráulicas puede ser adelantada utilizando varios métodos derivados de técnicas basadas en medición de la temperatura, vibraciones o parámetros tribológicos. En la tabla 4 se muestran algunas características de las técnicas de monitoreo y diagnóstico descritas anteriormente.

Tabla 3. Características de las técnicas de monitoreo y diagnóstico descritas

Método	Subdivisión del método	Estado de la máquina		Especificación de la avería de la falla	Habilidades del Personal	Condiciones complementarias
		Parada	Operación			
Por sentidos de visión, tacto o auditivo		X		Superficie	Alta Experiencia	Amplio rango de métodos
			X	Componentes internos o exterior del equipo	Baja experiencia	Revisiones periódicas y usada especialmente en motores de aviones
Térmicos			X	Superficial o interna	Variadas	Usa diferentes instrumentos: desde termómetros hasta escáner infrarrojos
Tribológicos - Revisión			X	Sistemas lubricados como medio de extracción magnética, filtro o muestra evaluativa de aceite	Entrenamiento para diferenciar entre partículas normales y de materiales por desgaste.	Análisis espectral y espectrográfico o de ferrogarfa para definir elementos extraños en la muestra
Fugas		X	X	Diversos elementos sometidos a presión interna	Entrenamiento previo en el medio usado	Ninguna
Detección de grietas	Líquidos penetrantes *	X	X	Superficies planas, rugosas, etc. pero limpias	Entrenamiento básico y baja experiencia	Muestra solo grietas que afloran en la superficie exterior
	Partículas magnéticas *	X	X	Cerca de superficies planas, lisas y limpias	Entrenamiento básico y baja experiencia, capaz de percibir fisuras	Solo sirve para materiales magnéticos, es muy preciso para orientar la dirección vectorial de las grietas
	Resistencia eléctrica	X	X	Superficies planas y limpias, sin rugosidades fuertes	Entrenamiento básico y baja experiencia	Sirve para orientar la dirección vectorial de las grietas. Muy utilizado para medir profundidad de las fisuras
	Corrientes inducidas *	X	X	Superficies exteriores o cerca de ella. La distancia de la sonda a la grieta afecta los resultados.	Alta experiencia y entrenamiento medio especializado.	Sirve para encontrar un amplio rango de discontinuidades de los materiales, elementos, grietas, fuerzas, esfuerzos, tensiones superficiales, durezas, temple, etc.
	Ultrasonidos	X	X	Requiere acceso a una superficie plana y limpia, sin rugosidades fuertes.	Para fisuras ocultas se requiere una alta experiencia y un entrenamiento medio especializado. En otras grietas visibles no requiere tanto.	Sirve como estudio complementario a otras técnicas.
	Radiografía	X	X	Debe ser posible acceder por ambos lados	Entrenamiento avanzado y alta experiencia en realización, lectura y análisis de radiografías, con alta capacidad de diagnóstico a partir de resultados	Se recomienda en superficies hasta de 50 milímetros en acero. Requiere de tener en cuenta la seguridad por exposición a la radiación. Sirve para grandes áreas de chequeo y estudio
Análisis de vibraciones	Espectro de frecuencia, o pico a pico	X	X	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales.	Entrenamiento acorde al caso y a la criticidad de la falla o de la evaluación, la experiencia y el conocimiento depende de los elementos y las circunstancias a analizar.	Permite tomar medidas en tiempos cortos durante la operación. Monitorea situaciones permanentemente. Va desde medidas sencillas hasta casos complejos y difíciles
Corrosión	Corrosímetro. Elementos		X	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales.	Entrenamiento medio y alguna experiencia básica	Mide 1µm de pérdida de corrosión
	Resistencia de polarización y potencial de corrosión		X	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales.	Entrenamiento medio y alguna experiencia básica	Únicamente manifiesta si ocurre la corrosión, su valoración es débil
	Probeta de hidrógeno		X	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales.	No requiere ninguna práctica	El hidrógeno penetra y se esparce en las paredes delgadas de la sonda, lo que provoca aumento de presión
	Perforaciones con taladros		X	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales.	Necesita saber la precisión de hasta donde se debe taladrar	Mide en qué momento se llega a la cantidad de corrosión previamente fijada
	Probetas de corrosión	X	X	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales.	Entrenamiento bajo y poca experiencia, sólo lo básico para el manejo de probetas	Se comprueba cuando la planta se detiene
	Ultrasonidos	X		Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales.	Para fisuras ocultas se requiere una alta experiencia y un entrenamiento medio especializado. En otras grietas visibles no requiere tanto.	Es capaz de percibir 0.5 milímetros de pérdida de espesor e incluso menos

4.16 CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL Y MONITOREO

Las técnicas de control y monitoreo pueden ser divididas entre las que requieren hacer una toma de datos con el equipo parado y las que pueden hacerlo con este en movimiento; es posible hacer también una clasificación entre los que pueden hacer mediciones a distancia y los que requieren de contacto para la adquisición de datos o que poseen ambas características, caso del monitoreo de las temperaturas (sensores de contacto o cámaras infrarrojas para la adquisición de datos sin contacto alguno con el elemento), o el ultrasonido (sensores fijos o pistolas que captan la información a distancia). Es posible armar tres grupos de aplicación general de las técnicas de monitoreo descritas anteriormente: térmico, tribológico y de vibraciones, en la tabla 5 se muestra un modelo aplicativo donde se comparan estos tres grupos generales.

Tabla 4. Comparación de las áreas térmica, tribologica y de vibraciones.

Implementación sistémica, metódica y constante bajo la forma de tareas proactivas permanentes o alguna táctica avanzada.			
Elementos de control	Estudios y vigilancia Térmicos	Monitoreo tribológico	Vigilancia con Vibraciones
Medio para la transmisión de información a través de la máquina	Objetos o elementos sólidos o fluido, que posea conductividad térmica	Aceites lubricantes o de refrigeración, grasas u otro fluido con características medibles.	Elementos sólidos. Están en función de las características elásticas y másicas de los sólidos.
Elementos vigilados y monitoreados	Elementos o sistemas que desprendan calor por movimiento físico o transmisión de energía. Sistemas térmicos con fluido para transferir calor. Intercambiadores.	Cualquier componente que esté lubricado: cojinetes, componentes de transmisión (engranajes, acoples, levas, ejes), bomba de lubricación, etc.	Elementos, componente o máquinas con movimiento independiente o relativo entre las partes.
Averías encontradas	Averías en sistemas, daños en mecanismos, bloqueo de contactos, fugas de calor, contaminación de líquidos refrigerantes, Excesos de carga en equipos estándares y convencionales	Daños, averías, fugas, grietas, etc. o cualquier otro tipo de deterioro puntual o progresivo del sistema. Características de materiales, de desgaste, de aceites o fugas en los sistemas lubricados	Elementos de reposición de elementos o materiales en movimiento, formas de desgaste en materiales por fricción. Elementos de rotación, ejes o flechas.
Máquinas de y vigilancia monitoreo	Termocuplas, termómetros de fluidos o bimetálicos, termopares, termorresistencias, termistores, instrumentos asociados, registros de temperaturas, infrarrojos, aparatos ópticos, cámara de infrarrojos, etc.	Elementos o filtros cambiables en carga, clavijas magnéticas para el examen visual de restos utilizando microscopio, espectrómetro para análisis de material en suspensión, ferrógrafo para separación de residuos, medida de presión.	Acelerómetro más equipos electrónicos de proceso para visualizar valores promedios en el tiempo. Filtros de frecuencias y registradores para análisis de vibraciones.
Frecuencia	Permanente y cíclica.	Inicial mente cíclica.	Permanente y cíclica.

Mora, 2005, 236

5. PRINCIPALES CAUSAS DE AVERÍA Y REDUCCIÓN DE EFICIENCIA EN TURBINAS FRANCIS

Las principales causas de avería en turbinas hidráulicas son debidas a la cavitación, la erosión por arena, por defectos de materiales en los componentes y fatiga de los mismos. En saltos mayores de 250m, las turbinas empiezan a presentar problemas, estos son consecuencias esencialmente de las altas presiones, las variaciones de presión y las altas velocidades del agua. Para hacer frente a estos problemas, se realizan actualmente estudios e investigaciones de los fenómenos y los materiales de los componentes de las turbinas (TEV.CAP.14@2001).

El objetivo de cualquier maquina es realizar eficientemente su función principal, en el caso de la turbina hidráulica consiste en transformar eficientemente la energía cinética del agua, en energía mecánica. Los factores que influyen en tal tarea están relacionados con la instalación y funcionamiento específico de la turbina y el diseño hidráulico de elementos que la componen.

Los principales parámetros que influyen en la eficiencia de la turbina son:

- a. La altura efectiva: busca ser máxima en los casos que el agua abandona el rodete axialmente.
- b. El perfil de los alabes del rodete: es diseñado teniendo en cuenta, principalmente, el caudal y los ángulos de entrada y salida del agua.
- c. El perfil de los alabes del distribuidor.
- d. La operación a velocidad variable y constante.
- e. La cavitación como turbulencia.
- f. El tamaño, en cuanto a las pérdidas por fugas (menores en turbinas grandes).
- g. Las pérdidas por choque a la entrada del rodete.
- h. Las pérdidas por fricción del fluido.

- i. Las pérdidas de energía cinética debido a la velocidad absoluta del agua en la descarga del rodete, entre otras.

Evidentemente la máxima eficiencia será obtenida cuando las condiciones de diseño y de operación sean tales que la altura (o energía) pérdida sea mínima, esto es, cuando todas las pérdidas anteriormente mencionadas sean mínimas (EFICIENCIA @ 2006).

5.1 LA CAVITACIÓN COMO FACTOR CRÍTICO EN LA REDUCCIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA VIDA ÚTIL DE TURBINAS FRANCIS

La cavitación y la eficiencia están relacionadas de forma directa, esto es, mientras se optimizan parámetros relacionados con la eficiencia de la turbina, como por ejemplo el perfil de los alabes, la cavitación en la turbina aumenta, un ejemplo de ello es la mejora realizada por la empresa generadora de energía para Canada Hydro-Quebec, quien a través de una mejora al perfil de los alabes (específicamente al borde de salida del alabe) utilizando un CFD⁸, para analizar turbulencias en los flujos del tubo de salida, generó ganancias por cinco millones de dólares anuales, ello aumentando la eficiencia de sus turbinas en un 1.6%. El efecto del nuevo diseño, más eficiente, respecto a la erosión por cavitación, fue negativo pues respecto al diseño antiguo se incrementó la cavitación a la entrada "inlet cavitation" en un 30% a la máxima eficiencia y en un 85% a máxima potencia (JOURNAL – CAVITATION @ 1998).

No solo las investigaciones adelantadas por la central hidroeléctrica canadiense Hydro-Quebec y los creadores del software CFD Fluent, donde se adelantaron los análisis, afirman la relación entre la cavitación y la eficiencia, tal relación es confirmada también por instituciones como la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y el Politécnico Federal de Lausanne, Suiza, con su laboratorio de máquinas hidráulicas (LMH-IMHEF) quienes en su investigación con-

⁸ Siglas en inglés: Computational Fluid Dynamics

junta de detección de cavitación en turbinas hidráulicas afirman que la cavitación afecta el funcionamiento y la eficiencia de las maquinas hidráulicas (SCIENCE DIRECT – CAVITACIÓN @ 2004).

De lo mencionado anteriormente se puede deducir que al realizar acciones para minimizar o eliminar la cavitación de las turbinas, se afectan los niveles de eficiencia y máximo rendimiento, un ejemplo practico de ello es la turbina Francis objeto de estudio de este proyecto. Su fabricante describe unos puntos limites de operación para que no ocurra el fenómeno de cavitación (Salto de 225m y descarga de 4.3 m³/s para obtener una potencia de 8855KW) con estos parámetros se obtiene una eficiencia del 93.5%; el obtener una eficiencia mayor implica modificar los parámetros especificados por el fabricante y por lo tanto dar las condiciones para la aparición del fenómeno cavitante.

La cavitación, como se mencionó anteriormente, a demás de ser un factor relevante en la reducción de la eficiencia, es un factor crítico en cuanto la reducción de la vida útil de una turbina; este hecho lo confirma la investigación realizada en diferentes documentos, institutos y bases de datos internacionales consultadas, donde dicho fenómeno es frecuentemente tratado y estudiado; es por ello que a continuación se profundiza en la caracterización de tal fenómeno como un modo de falla critico para dar cumplimiento al objetivo especifico descrito al respecto.

5.2 CAVITACIÓN EN MAQUINAS HIDRÁULICAS

El fenómeno de la cavitación se debe tener en cuenta para el diseño de una gran variedad de máquinas a través de las cuales hay fluido circulante. Bajo determinadas condiciones, la cavitación puede disminuir la potencia suministrada y el rendimiento de las turbinas; también puede producir vibraciones, ruido, inestabilidad de la maquina y la erosión de los materiales más cercanos (SCIENCE DIRECT – CAVITACIÓN @ 2004).

La aparición de la cavitación y sus consecuencias son función de muchos factores, tales como el diseño y tamaño de la máquina, la velocidad específica o el punto de funcionamiento, entre otros. La influencia de estos factores ha sido estudiada por muchos investigadores en modelos de máquinas hidráulicas en laboratorio (ver por ejemplo Hammitt (1980), Laperrousaz et al. (1994) y Bourdon et al. (1994)), y concluyen que aún no es posible conseguir la predicción de la influencia de estos factores con precisión satisfactoria. Es necesario evaluar aún más la cavitación con datos ya existentes, hacer comparaciones en unidades con geometría similar y en unidades con diferentes velocidades. La evaluación debe ser auxiliada con estudios utilizando modelación y simulación para determinar el posible lugar de aparición de la cavitación (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

Desde el punto de vista de utilización, si la cavitación es inevitable, se debe saber si un determinado diseño de máquina, aunque con algunas restricciones, puede funcionar dentro de patrones aceptables. A menudo, la operación con alguna cavitación se tolera debido a necesidades operacionales (KAYE, 1999).

Las excitaciones debidas a la cavitación generalmente son de banda ancha y ocurren a altas frecuencias, dependiendo del tipo y del punto de funcionamiento de la máquina (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

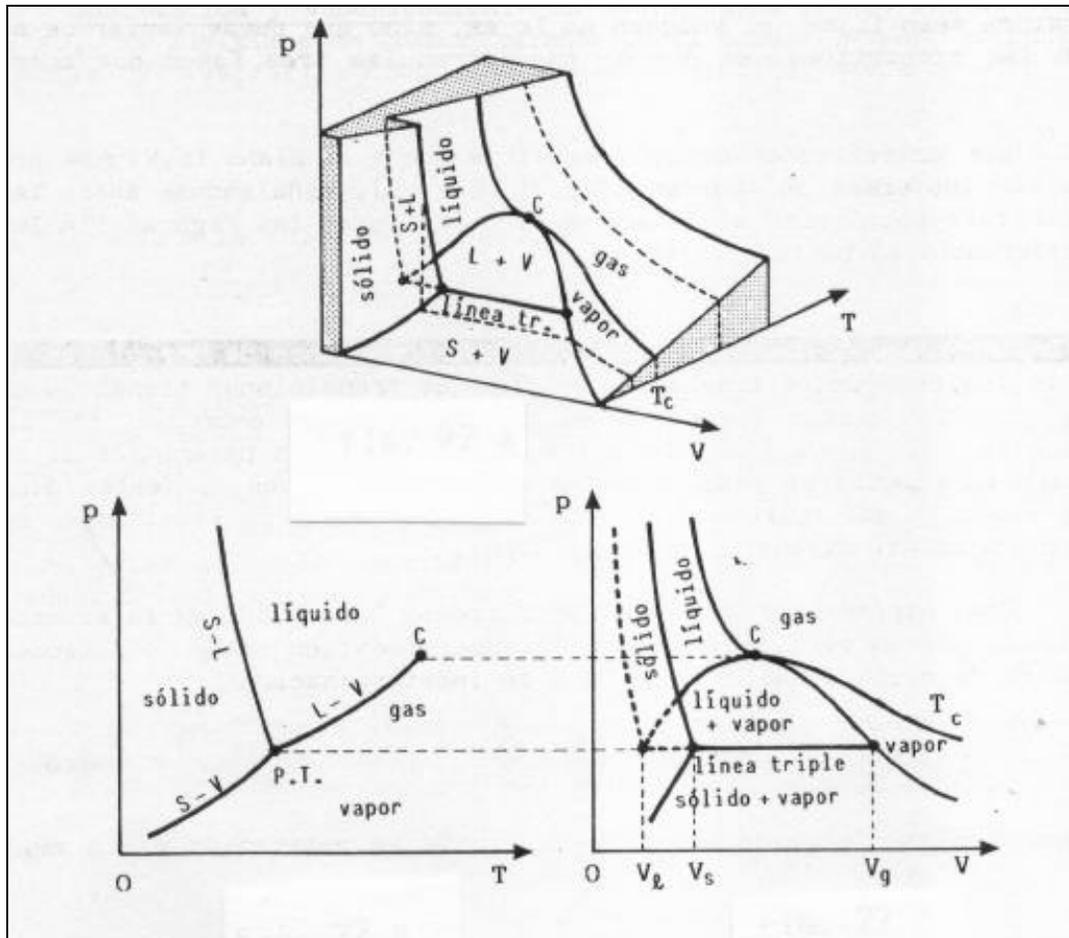
5.2.1 Definición del Fenómeno.

La cavitación es la formación y actividad de burbujas (cavidades) en líquidos. La formación, de estas cavidades tiene lugar cuando la presión de un líquido baja por debajo de la tensión de vapor (P_v) (U OF MINNESOTA – CAVITACIÓN @ 2006).

Cuando la presión de un líquido disminuye lo suficiente, comenzará a evaporarse; esto es: una parte del mismo sufrirá una transformación de fase, pasando del estado líquido al gaseoso, ver Figura 7 La presión a la que este fenómeno tiene lugar es la denominada presión o tensión de vapor de

saturación (P_v), valor que depende fuertemente de la temperatura del fluido, incrementándose rápidamente con el aumento de la temperatura.

Figura 7. Superficie característica de una sustancia que se contrae al fundirse (Ej: el agua) y proyecciones de la superficie característica sobre los planos (T, p) y (p, V).



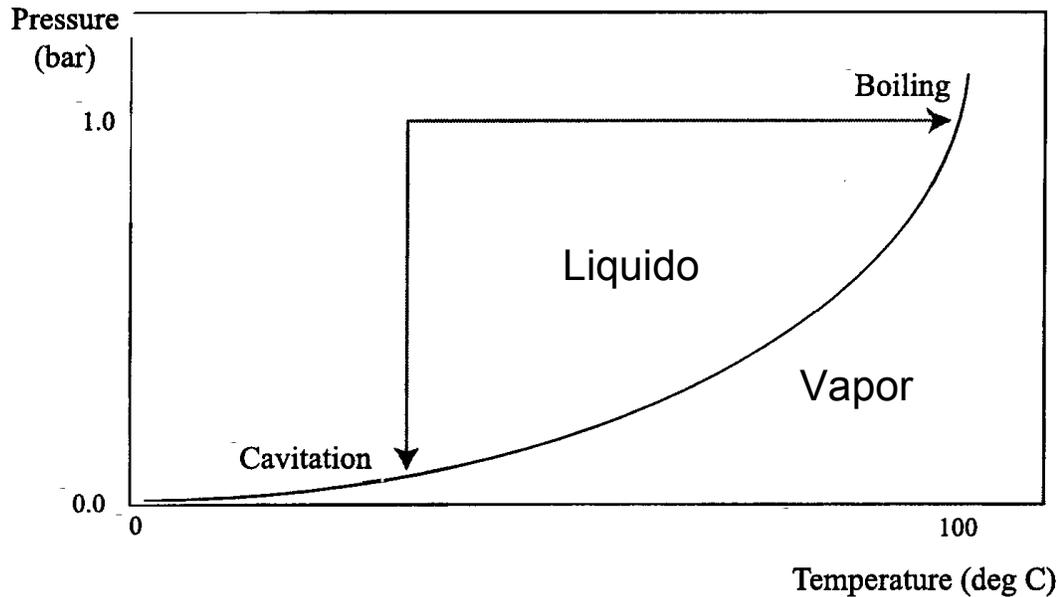
UPC – CAVITACIÓN @ 2004

5.2.2 Formación de la Cavitación

La cavitación se produce por un descenso local de la presión por debajo de la de saturación del líquido que se traduce en la formación de vapor o gas y en la condensación brusca subsiguiente. Supone ni más ni menos que la ebullición del líquido a temperatura ambiente provocado por muy bajas presio-

nes. En la Figura 8 se muestra el diagrama de presión-temperatura (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

Figura 8. Diagrama presión-temperatura.



OXFORD UNIVERSITY – CAVITACIÓN @ 1995

Las burbujas se inician en las microcavidades presentes en todos los líquidos, denominadas precisamente gérmenes o núcleos y dentro de ellas coexisten gas y vapor en equilibrio estable.

La cavitación en máquinas hidráulicas es el resultado de una reducción en la presión del líquido cuando se acelera al trasladarse a lo largo de superficies curvas. El cambio de fase se originará en la superficie del sólido o bien en el medio fluido, donde se detecta vaporización de núcleos (nuclei).

Los flujos o las corrientes cavitantes pueden erosionar las superficies sólidas al colapsar las burbujas como consecuencia de un nuevo aumento de la presión por encima de la presión de saturación del fluido (y siempre que estas burbujas se encuentren lo suficientemente cerca de las superficies: “colapso no es sinónimo de erosión”) Esta es la razón fundamental por la que conviene

evitar, en la medida de lo posible, la presencia de flujos cavitantes en máquinas hidráulicas.

5.2.3 Fases Del Fenómeno De La Cavitación

La formación de la cavitación se divide en dos fases:

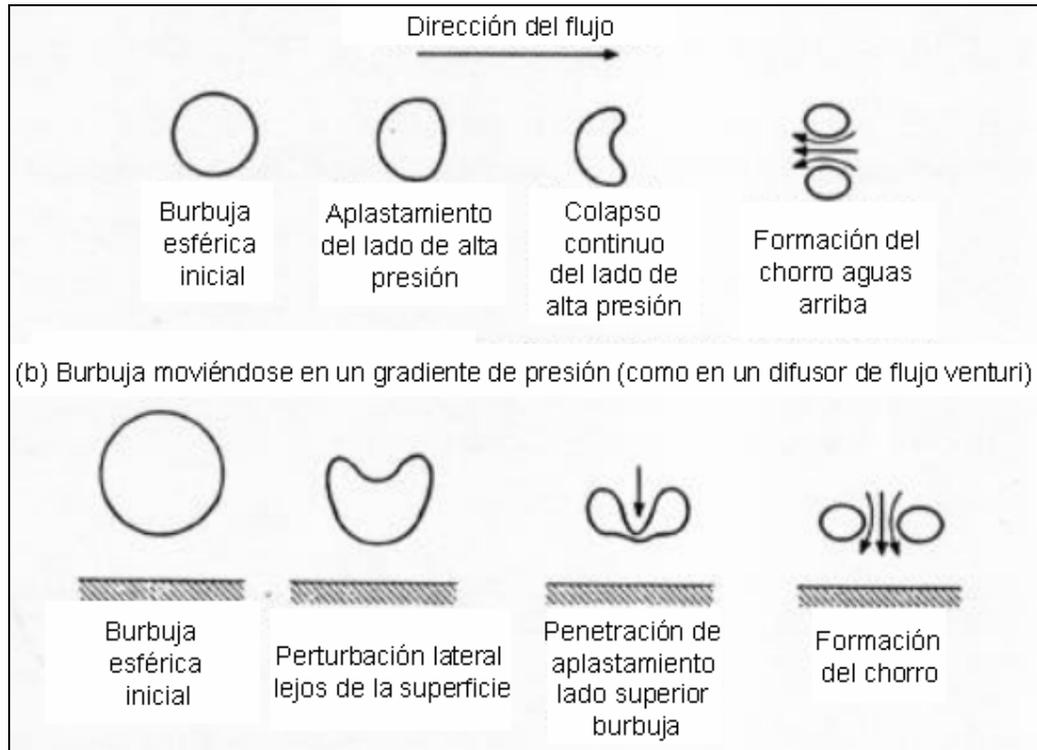
- a. La aparición y crecimiento de cavidades llenas de vapor en el interior del líquido que son arrastradas por la corriente, pudiendo aparecer junto al contorno del sólido en contacto con el líquido. La velocidad de crecimiento será función de varios parámetros: el radio inicial de la cavidad, la presión exterior, etc.
- b. Una vez formadas y arrastradas las cavidades “burbujas”, estas colapsan, ya que la presión exterior a la cavidad es superior a la presión de vapor, y las burbujas colapsan violentamente, condensándose casi instantáneamente y pudiendo martillar la pared sólida con elevada amplitud que puede alcanzar valores instantáneos de 500 atm. (presión) y temperaturas de 800° C debido a las ondas de choque. El colapso propiamente dicho es muy rápido: del orden de nanosegundos.

La intensidad de la implosión de la burbuja es función del tamaño de la misma y del gradiente local de presión (ETSEIB-CPDA)

Cuando el colapso de las burbujas ocurre cerca de la superficie, se generan vibraciones de alta frecuencia, ya que el tiempo de colapso es muy rápido y el proceso de generación de cavidades también es muy elevado.

En la Figura 9 se ilustran las posibles formas de colapso de las burbujas en un medio infinito y cerca de una pared.

Figura 9. Posibles formas de colapso de las burbujas



OXFORD UNIVERSITY – CAVITACIÓN @ 1995

5.2.4 Clasificación De La Cavitación En Turbinas Francis

La cavitación puede ser clasificada de varias formas: según la forma en que se produce (por reducción de tensiones en el líquido, por introducción de energía), según su grado de desarrollo (incipiente, desarrollada, supercavitación y cavitación desinente), según el lugar donde se produce, según la forma en que empíricamente se ha observado que esta sucede, esto es: cavitación de burbujas separadas (bubble cavitation), cavitación de lámina (sheet cavitation) o cavitación de vórtice (vortex cavitation).

Las variaciones del punto de funcionamiento de las turbinas, tanto de salto como de caudal, hacen posible que se puedan producir diferentes tipos de cavitación en las mismas.

5.2.5 Características De La Cavitación En Turbinas Hidráulicas.

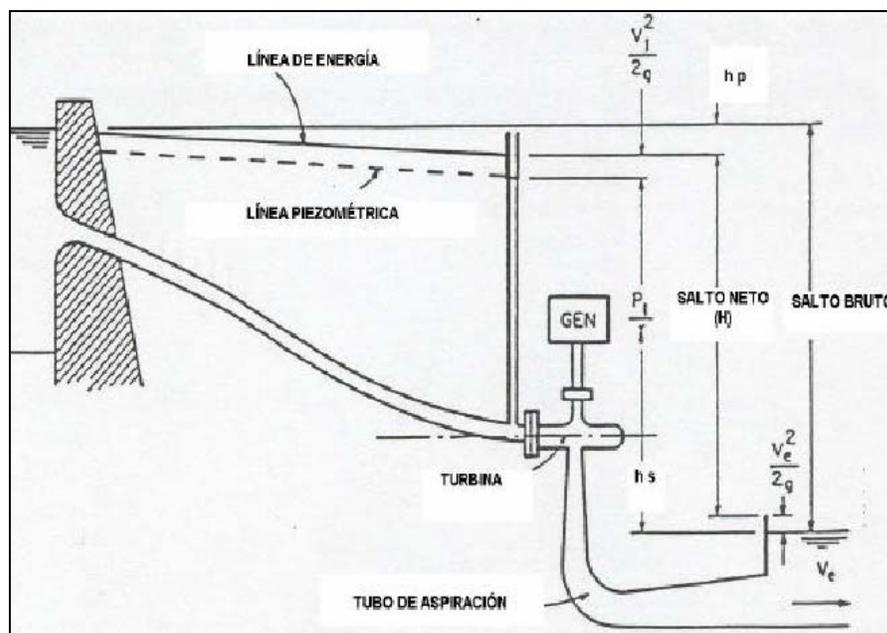
La cavitación en turbinas hidráulicas se caracteriza por un coeficiente adimensional llamado Thoma (σ), el cual se describe a continuación:

$$\sigma = \frac{H_a - h_s - h_v}{H}$$

En esta ecuación H_a es la altura barométrica, h_s la altura de aspiración, h_v la altura de vapor y H el salto neto, como se ve en la Figura 10.

Existen varias formas de determinar el coeficiente de Thoma, pero en general este se relaciona con la potencia W , salto neto H_n y caudal Q de la central. Por lo tanto el coeficiente varía constantemente y la existencia o no de cavitación se determina por comparación con un coeficiente crítico de cavitación obtenido a partir de fórmulas experimentales para turbinas Francis, mientras dicho coeficiente sea menor al valor crítico, se evitara la cavitación (CARTIF – CAVITACIÓN @ 2006).

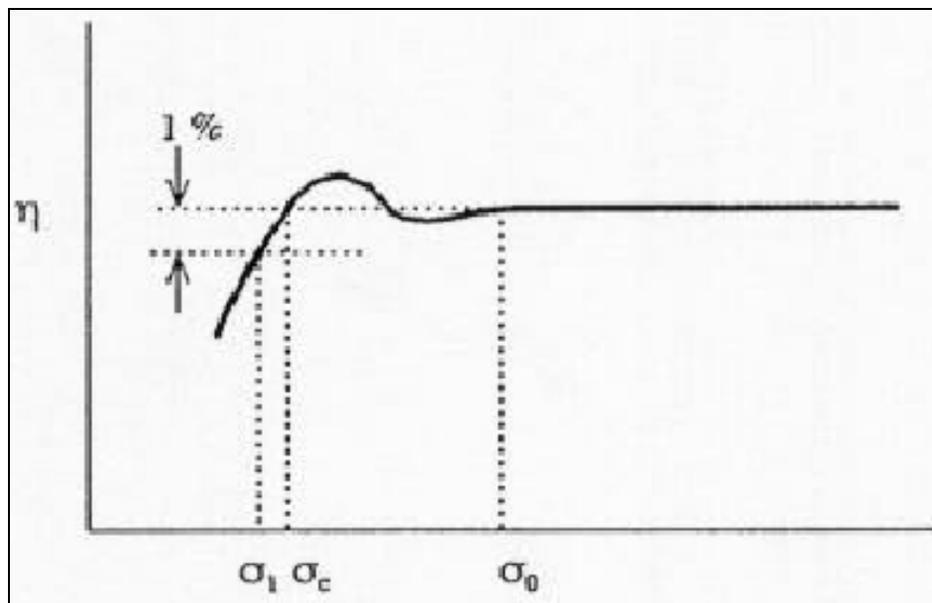
Figura 10. Esquema de una instalación hidroeléctrica



UPC – CAVITACIÓN @ 2004

El coeficiente de cavitación puede ser determinado experimentalmente en bancos de ensayo de laboratorios, utilizando modelos a escala reducida de las turbinas en cuestión. Para ello se considera el coeficiente σ de cavitación desarrollada, esto es, cuando la caída del rendimiento (σ debida a la cavitación es del 3%. Otros valores que se pueden tener como referencia son el coeficiente σ de cavitación incipiente (valor de σ donde se detecta visualmente el comienzo de la cavitación) o el coeficiente σ de cavitación crítica, valor más bajo de σ que no presenta variación de rendimiento; una posible definición del coeficiente de Thoma, con respecto a la caída del rendimiento, se puede observar en la Figura 11.

Figura 11. Posible definición del coeficiente de Thoma, con respecto a la caída del rendimiento.

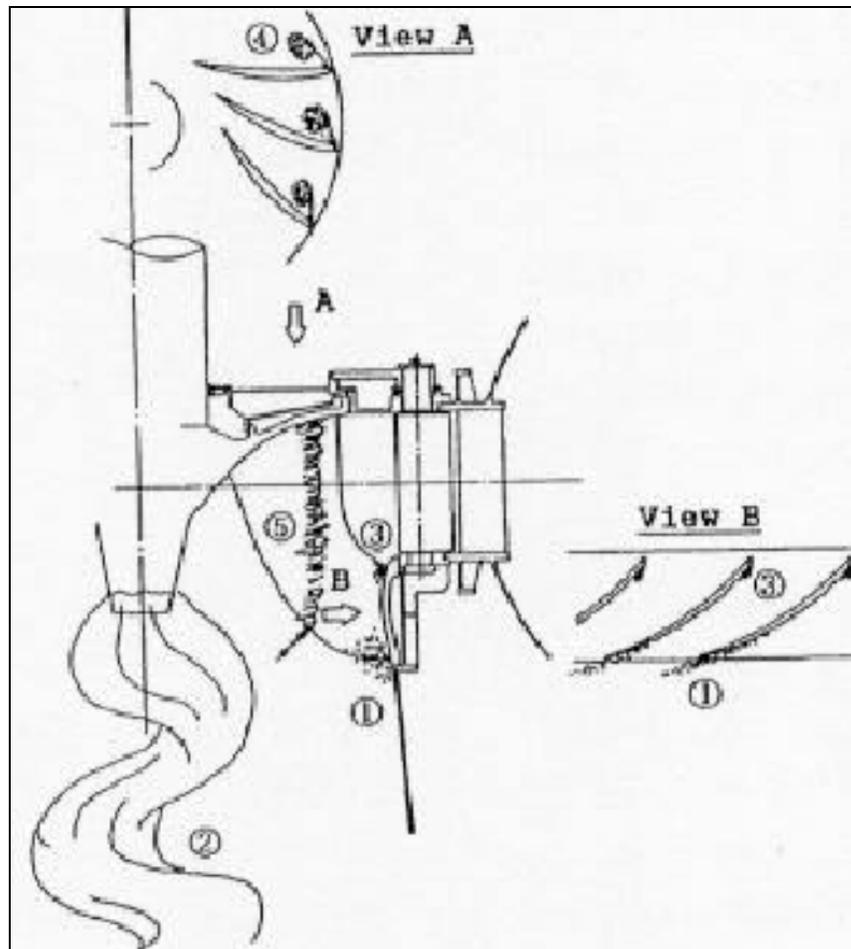


UPC – CAVITACIÓN @ 2004

Los diferentes tipos de cavitación que se presentan en turbinas hidráulicas, pueden o no depender del coeficiente de cavitación (σ y por consiguiente de los parámetros para su cálculo, como lo es por ejemplo el punto de funcionamiento de la turbina. En la Figura 12 se muestra la ubicación de los principales tipos de cavitación en turbinas Francis, ① corresponde al lugar de aparición de la cavi-

tación de burbuja, ③ a la cavitación de entrada extradós o cara de succión, ⑤ a la cavitación producida por vórtices a carga parcial, ② a la cavitación de antorcha y ④ a la cavitación por desprendimiento de vórtices de Von Karman.

Figura 12. Localización de los principales tipos de cavitación presentes en una turbina Francis.

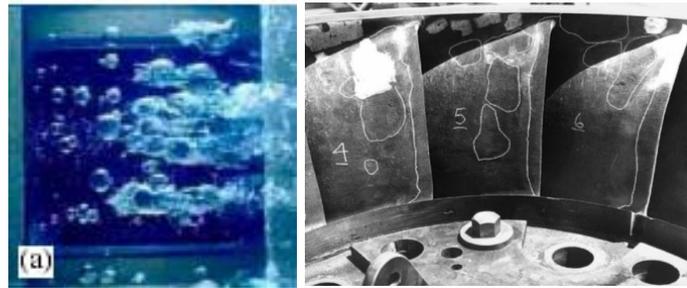


UPC – CAVITACIÓN @ 2004

- Tipos de cavitación que dependen de σ

Cavitación de burbujas (Bubble Cavitation): este tipo de cavitación es considerada la más importante dependiente de σ . Generalmente aparece en el extradós de los álabes, hacia la salida del rodete, como se ve en la Figura 13, este tipo de cavitación se ve influenciado por el punto de funcionamiento de la máquina.

Figura 13. Cavitación de burbuja (a) y localización de sus daños en el rodete.



UPC-CAVITACIÓN@2004 / SCIENCE DIRECT-CAVITACIÓN@ 2004

Cavitación a la salida del álabe (outlet cavitation): este tipo de cavitación se localiza en la cara de succión del alabe.

- Cavitación que no depende de σ

Cavitación de entrada extradós o cara de succión (Extradós inlet cavitation o leading edge cavitation): Es conocida como la forma de cavitación más dañina y erosiva en máquinas hidráulicas, como puede verse en la Figura 14. Puede producir erosiones profundas en un corto período de exposición. Se produce generalmente cuando la turbina trabaja con saltos mayores que los de diseño.

Figura 14. Daños por erosión en un rodete Francis por efectos de cavitación



Fuente: OXFORD UNIVERSITY – CAVITACIÓN @ 1995

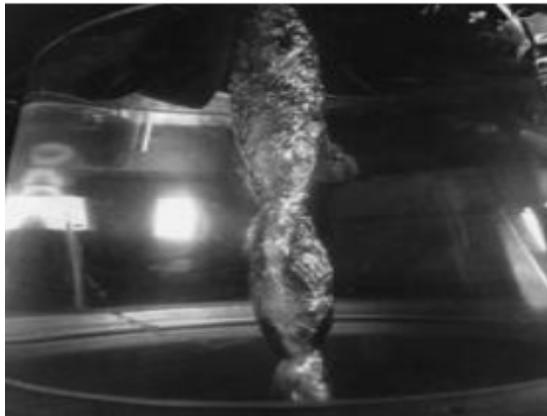
Cavitación de entrada intradós o cara de presión (Intradós inlet cavitation): Es igual a la cavitación de entrada extradós con la diferencia que es resultado de trabajar con saltos bajos.

Cavitación producida por vórtices a carga parcial (Part-load vortex): su formación es debida a las características del flujo que circula por los canales del rodete cuando se trabaja a cargas muy bajas. Se caracteriza por la aparición de torbellinos cavitantes paralelos que inducen un derrame fuertemente tridimensional en los canales del rodete. La posibilidad de erosión es baja, se produce ruido (aunque de menor intensidad respecto a la cavitación de entrada intradós).

- Otros tipos de cavitación

Cavitación de antorcha: llamada antorcha gracias a su forma, consiste en un vórtice cavitante que se forma en el tubo de aspiración cuando se trabaja a cargas parciales o con sobrecargas. La antorcha provoca oscilaciones de presión que pueden traducirse en fluctuaciones no deseadas de par en el eje de la turbina, acompañado de un notable incremento en el nivel de vibraciones.

Figura 15. Forma de la cavitación de antorcha



EPFL/LMH – F.T Stability @ 2006

Cavitación por desprendimiento de vórtices de Von Karman (Von Karman vortex-shedding): Este tipo de cavitación aparece a partir del borde de salida del álabe, ver 5 en Figura 18, esto debido a la cavitación de los vórtices desprendidos.

Figura 16. Von Karman vortex-shedding cavitation.



SCIENCE DIRECT – CAVITACIÓN @ 2004

Cavitación en las juntas (Gap cavitation). Se forma a partir de un flujo a alta velocidad resultado del contacto entre dos zonas a diferente presión.

Cavitación en las directrices. La cavitación en esta parte de la turbina suele formarse cuando el perfil de los álabes del distribuidor no está adaptado a las condiciones hidrodinámicas del punto de trabajo.

- Principales tipos de cavitación en turbinas Francis

Los principales tipos de cavitación considerados y mas frecuentemente estudiados por instituciones como el laboratorio de maquinas hidráulicas de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, Suiza, la Universidad Politécnica de Catalunya, España y el departamento de Investigación de la central hidroeléctrica de Québec, Canadá, son descritas a continuación, si se desea tener mayor detalle de estas, ver (S.C. Li Ed).

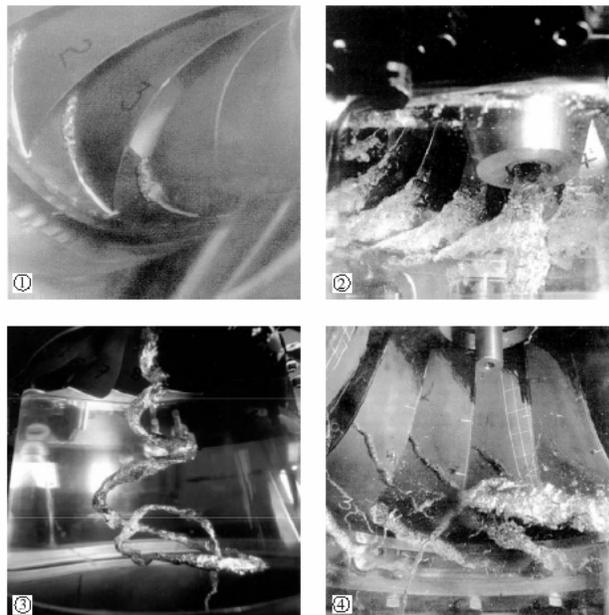
Leading edge cavitation (Cavitación en cara de succión): esta toma la forma de una cavidad fija en la cara de succión de los alabes del rodete, ver 1 en Figuras 17 y 18, como se menciono anteriormente, es debida a la operación de la turbina a cabezas mayores a las de diseño, cuando sucede lo contrario, cabezas menores, la cavitación ocurre en la cara de presión del alabe (SCIENCE DIRECT – CAVITACIÓN @ 2004).

Traveling bubble cavitation (Cavitación de burbuja): toma forma de esferas que se pegan al lado de succión del los alabes del rodete, cerca del borde de salida, ver 2 en las Figuras 17 y 18, se incrementa cuando la maquina opera con condiciones de sobrecarga a alta rata de flujo. Este tipo de cavitación hace mucho ruido y reduce considerablemente la eficiencia de la turbina, puede provocar erosión si las burbujas colapsan con los alabes o paredes de la maquina.

Draft tube swirl (Turbulencia en el tubo de salida): su formación se da a cargas parciales y a sobre cargas , debido al la componente tangencial de la velocidad del flujo de descarga del rodete, ver 3 en Figuras 17 y 18. El vortice gira en la dirección de rotación del rodete a cargas parciales y en sentido contrario cuando la turbina trabaja a sobrecarga.

Inter blade vortex cavitation (Cavitación entre vértices de alabe): este tipo de cavitación solo puede causar erosión si tiene contacto con el alabe, aparece a cargas parciales de operación y a cabezas muy altas, ver 4 en Figuras 17 y 18.

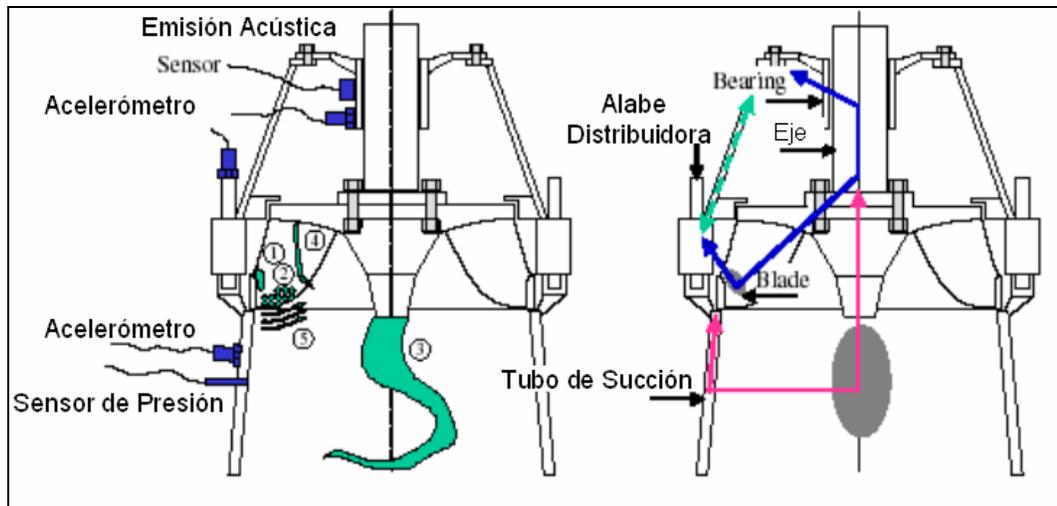
Figura 17. Principales tipos de cavitación en turbinas Francis



SCIENCE DIRECT – CAVITACIÓN @ 2004

En la Figura 18 se muestra un esquema de turbina Francis, a la izquierda se ve la posición de varios tipos de cavitación y la posible ubicación de sensores y a la derecha las posibles trayectorias recorridas por las excitaciones en los alabes y al interior del tubo de succión.

Figura 18. Esquema de una turbina Francis



SCIENCE DIRECT – CAVITACIÓN @ 2004

5.2.6 Efectos de la cavitación en maquinas hidráulicas

Los efectos de la cavitación en maquinas hidráulicas son negativos, como se ha mencionado anteriormente, esta influye desfavorablemente tanto para el rendimiento de la turbina como para su vida útil, algunas de las consecuencias de su presencia son:

- La formación de inestabilidades de carga parcial, consecuencia de trabajar con caudales inferiores al de diseño (cavitación de antorcha).
- La formación de antorchas por sobrecarga (caudales de funcionamiento superiores al de diseño).
- Presencia de ruido y vibraciones.

- Disminución de prestaciones de la máquina hidráulica (caída del rendimiento), reduciendo la fiabilidad de las instalaciones.
- Aumento en los gastos de mantenimiento (no solo el costo asociado de la(s) pieza(s) afectada(s), sino también los efectos asociados a parámetros de la producción).

Figura 19. Rodete erosionado por efectos de cavitación



EPFL/LMH - UPC @ 2004

5.3 DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN TURBINAS FRANCIS

El estudio de la cavitación y sus consecuencias en máquinas hidráulicas es muy importante para el diseño y operación de turbinas; mientras se cuente con este tipo de maquinaria no se podrá dejar de lado tal fenómeno.

Las turbinas hidráulicas soportan excitaciones dinámicas de origen hidráulico, mecánico y eléctrico que inducen vibraciones y generan un estado de esfuerzos y tensiones variables que provocan el envejecimiento y el desgaste de sus componentes. Cuando el nivel de deterioro de una máquina llega a un cierto punto, empieza a operar fuera de su condición normal, operación que provoca que los daños evolucionan hasta llegar a causar su completa indisponibilidad, ya sea por no ofrecer las prestaciones para las que ha sido diseñada o bien por el desgaste de alguno de sus componentes. El nivel de deterioro de una máquina rotativa se puede ver reflejado, por ejemplo, en la amplitud de las

vibraciones. Los niveles de vibraciones excesivos son peligrosos para el funcionamiento de las máquinas y están limitados por algunas normas vigentes.

Cuando una turbina es propensa a sufrir de cavitación no existen soluciones inmediatas lo suficiente mente efectivas para prevenir tal fenómeno hidrodinámico; las acciones tomadas ante un proceso avanzado de erosión pueden disminuir el avance de la misma pero no detenerlo, por lo tanto solo un correcto monitoreo de la maquina basado en vibraciones es la mejor solución. (EPFL/LMH - UPC @ 2004).

El objetivo de las empresas constructoras de turbinas es reducir costos construyendo turbinas cada vez más pequeñas para potencias más altas, esto implica aumentar las velocidades de rotación, las cuales tienden a desencadenar problemas de cavitación. La reducción de los costos por parte de las empresas se torna en una variable incremental a través del tiempo, por lo tanto los problemas que ello acarrea, como la cavitación, también lo hacen, haciendo importante intervenir investigando tales problemas.

Como respuesta a la problemática con la cavitación anteriormente planteada, algunas plantas de generación de energía e institutos internacionales, han adelantado estudios e investigaciones alrededor de dicho fenómeno estableciendo, concluyendo y recomendando parámetros para su tratamiento, a continuación se describe algunas investigaciones realizadas en torno a la cavitación en turbinas Francis.

5.3.1 Estudios realizados en la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)

El estudio realizado por el ingeniero Pedro Ayuso “Detección de cavitación en turbinas Francis”, de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), se basa en el estudio de cuatro tipos de cavitación presentes en turbinas Francis: de burbuja, de Von Karman, a la entrada del álabe, y a la salida del mismo, tal estudio se basa en el análisis de vibraciones generadas utilizando las técnicas de análisis a altas frecuencias: espectro de potencia, demodulación en amplitud,

función de transferencia y coherencia, envolventes y tiempo frecuencia, descritas en el capítulo 3. La adquisición de los datos se realizó en un banco experimental por medio de 4 sensores de presión (P1, P2, P3 y P4) y 2 de aceleración (A1 y A2). Para acondicionar las señales se empleó un filtro pasa-bajos del tipo Chebyshev (UPC – CAVITACIÓN @ 2004).

El estudio dispone de cinco puntos de funcionamiento, para hacer las mediciones pertinentes, uno de referencia donde no se presenta ningún tipo de cavitación y otros cuatro donde por observación empírica se atribuye a cada uno de los 4 tipos de cavitación a estudiar, la variación de los puntos de funcionamiento se realizó variando parámetros como el caudal, ángulo de apertura de las directrices y por lo tanto el coeficiente de cavitación. Se tomaron 10 lecturas (para otros tantos instantes de tiempo escalonados y consecutivos) con todos y cada uno de los captadores y para cada uno de los cinco puntos de funcionamiento.

Los resultados obtenidos en cuanto al posicionamiento de los sensores y su respuesta respecto a los diferentes puntos de funcionamiento, con base al punto donde no se observó cavitación son extractados directamente de su estudio; se describen a continuación:

- Resultados basados en la técnica: estudio de las altas frecuencias

Cavitación de burbuja: los dos acelerómetros A1 y A2 situados en el cojinete de la turbina parecen detectar perfectamente la presencia de cavitación de burbuja, así como los captadores de presión en el tubo de aspiración P3 y P4. En cuanto a los captadores de presión situados en la cámara espiral, P1 y P2, no presentan resultados concluyentes sobre este tipo de cavitación.

El tipo de cavitación de salida + von Karman podría ser detectada a partir de los dos acelerómetros. En cuanto a los captadores de presión, no muestran diferencias significativas respecto al patrón sin cavitación.

La que parece ser más complicada de detectar será la cavitación a la salida del álabe: sólo la información del captador de presión P3 sería susceptible de aportar algo.

Con esta técnica (estudio de las altas frecuencias), la cavitación de entrada no es detectada por ningún sensor.

Los acelerómetros registran siempre diferencias de contenido a alta frecuencia para todos los tipos de cavitación respecto al caso de no cavitación. Si se presta atención a la magnitud de dichas diferencias (donde el sustraendo “cavitante” es siempre superior al minuendo “sin cavitación”, para todos los tipos de cavitación respecto a la situación de no cavitación) se pueden ordenar los diferentes tipos de cavitación por su intensidad. Estos incrementos de energía a altas frecuencias respecto a una situación en la cuál no se ha observado cavitación también están presentes en los captadores de presión P3 y P4.

- Resultados basados en la técnica: estudio para la demodulación.

No se tiene en cuenta la información arrojada por los captadores P1 y P2 por no mostrar características de interés.

Cuando no hay cavitación no aparece ninguna de las dos frecuencias hidrodinámicas, ni de paso de álabes (f_b) ni de paso de directrices (f_v).

Para la cavitación de entrada y salida sólo los captadores de presión (P1, P2, P3 y P4) parecen mostrar levemente la presencia de alguno de estos picos, pero no queda demasiado claro.

Para la cavitación de salida + von Karman: tanto A1 como A2 presentan un pico perteneciente a la frecuencia de paso de directrices (f_v), igual que el captador P4.

El captador P3, muestra un pico en frecuencia de paso de álabes (f_b).

Para la cavitación de burbujas: los dos acelerómetros (A1 y A2) y los dos captadores de presión (P3 y P4) muestran pico correspondiente a frecuencia de paso de álabes (f_b). No aparece la frecuencia de paso de directrices.

- Resultados basados en la técnica: estudio de la coherencia

La coherencia entre dos señales de las frecuencias hidrodinámicas (f_b y f_v) es siempre mayor para el punto de funcionamiento con cavitación desarrollada (Concretamente, de burbuja) que para el que no presenta cavitación cuando se comparan los dos acelerómetros A1 y A2.

La coherencia entre los dos acelerómetros permite distinguir tanto la frecuencia de paso de álabes como la de directrices, rondando ambas el 90% para el punto con cavitación de burbuja y no excediendo el 50% (y sólo la frecuencia de paso de álabes (f_b), pues la frecuencia de paso de directrices (f_v) no aparece claramente) en el caso sin cavitación.

En la comparación entre el captador P2 y el P4 no se observa un incremento de la misma cuando hay cavitación. El hecho de que la coherencia se sitúe en valores muy bajos nos explicaría la falta de información aportada por P2 para el caso sin cavitación.

En la coherencia entre A2 y P3 (la única efectuada entre instrumental de diferente naturaleza y función y, por ello mismo, la que da menor grado de correlación) destaca la frecuencia de paso de álabes con valores de coherencia del 20% para el punto de cavitación de burbuja y el 5% para el punto sin cavitación. Pero no hay coherencia buena para ninguna condición.

- Resultados basados en la técnica: estudio de las envolventes

Constatar cómo a medida que el fenómeno cavitativo se hace más importante, la envolvente muestra más claramente fluctuaciones correspondientes al número de álabes y al número de directrices.

Respecto a la sucesión en la señal (la importancia cuantitativa) se sigue guardando el orden habitual, encabezando nuevamente el ranking la cavitación de burbujas, seguida de la de Von Karman, a entrada de álabes y, en último lugar, a la salida.

- Resultados basados en la técnica: estudio tiempo frecuencia

Esta técnica demuestra un gran potencial decisorio: no solamente permite detectar la presencia de cavitación, sino que atendiendo a lo compacto de las implosiones podría servir para identificar el tipo de cavitación.

- Conclusiones del estudio

Las técnicas de comparación para las altas frecuencias, demodulación y tiempo frecuencia son las que resultan más adecuadas. El estudio de las envolventes y de la coherencia entre captadores sirve para complementar las anteriores técnicas. Del estudio de las altas frecuencias mediante acelerómetros dispuestos radial y axialmente entorno al cojinete de la turbina se sigue una gradación de las intensidades de las diferentes formas en que se presenta la cavitación.

En las condiciones ensayadas la cavitación a la salida de álabes es la menos importante de todas. Le sigue la de entrada y destacan especialmente la de salida + von Karman y de burbujas, siendo esta última la más severa de todas. Es posible afirmar que la cavitación de burbujas es aquella que mayor repercusión puede tener sobre el modelo de turbina Francis empleado para el estudio, en términos de reducción de la vida útil.

Para la cavitación de burbujas, tanto los acelerómetros A1 y A2 como los captadores de presión P3 y P4 se muestran lo suficientemente sensibles a su presencia. Por lo tanto, esta técnica permite confirmar la presencia de cavitación,

pero se muestra de difícil aplicación para determinar el tipo de la misma si no se conoce a priori la intensidad relativa del fenómeno. En cambio, la técnica de demodulación permite marginar entre algunos casos de cavitación. Por ejemplo, entre la cavitación a la salida de álabes + Von Karman y la cavitación de burbujas. Nótese además –como ventaja incuestionable respecto a la técnica empleada para las altas frecuencias- que no exige conocer el patrón ‘sin cavitación’.

Las frecuencias hidrodinámicas que aportan la clave son:

- La frecuencia de paso de álabes (f_b), que aparece claramente en los dos acelerómetros (A1, A2) y en ambos captadores de presión situados aguas abajo (P3, P4) para el caso de cavitación con burbujas.
- La frecuencia de paso de directrices (f_v), que predomina en los acelerómetros A1 y A2 y en el captador de presión P4. Por lo tanto, la presencia de uno u otro pico permite saber si hay cavitación de salida + von Karman o de burbujas.

Por último, el análisis tiempo-frecuencia podría ser decisivo en las dos líneas ya apuntadas: permitiría detectar la presencia de cavitación y separar prácticamente todos los tipos aquí estudiados, atendiendo al número de colapsos (se densifican las implosiones, aumentando su frecuencia y permitiendo graduar sus efectos). Esta técnica requiere de un estudio más detallado que podría ser objeto de futuros trabajos.

En resumen, el estudio de la alta frecuencia combinado con la técnica de demodulación se muestra como una metodología válida para detectar e identificar diferentes tipos de cavitación en modelos a escala reducida de turbinas. Otras posibles líneas de actuación para futuros trabajos serían: validar dichos resultados en el prototipo o diseñar con mayor rigurosidad ensayos para lograr detecciones más efectivas de los tipos de cavitación a la entrada y a la salida.

5.3.2 Estudios realizados en CARTIF, Valladolid España

Los ingenieros (as): Cristina Gonzalo de Luis, Ángeles Gallego de Santiago y Juan Miguel Herrero Marcos pertenecientes a CARTIF (Centro de Automatización, Robótica, Tecnologías de la Información y de la Fabricación) realiza un estudio de detección de cavitación, que actualmente se está llevando a cabo en la central hidroeléctrica de Villalcampo I, propiedad de IBERDROLA, con tres grupos hidroeléctricos de turbina Francis.

El estudio se basa en el análisis de las vibraciones utilizando sondas de presión, barómetros e hidrófobos. Se cuenta con 2 sondas de presión absoluta ubicadas, una en la cámara espiral y otra en el tubo de aspiración, el hidrófono es ubicado en el tubo de aspiración.

La medida elegida para las sondas de presión es un filtro dc que reproduce la situación estática. Los hidrófonos, poseen un rango de frecuencias entre 0,1Hz y 100KHz.

El estudio realiza un seguimiento de todas las variables que intervienen en el proceso de la cavitación como: la potencia, el caudal, el salto neto, el rendimiento, el factor de seguridad de la cavitación y la vibración global obtenida del hidrófono situado en el tubo de aspiración. De esta información se deduce, que cuando la turbina se encuentra fuera de la zona de peligro para la cavitación, única zona conocida hasta el momento, el nivel de vibración aumenta a medida que también lo hace el factor de seguridad, lo cual corrobora la relación existente entre el nivel de vibración y la potencia generada (CARTIF – CAVITACIÓN @ 2006).

5.3.3 Estudios Realizados En La Facultad De Ingeniería De La Universidad UNESP/FEIS, Brasil.

La Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP está instalada en una región denominada de Complejo de Urubupunga. Este complejo es formado

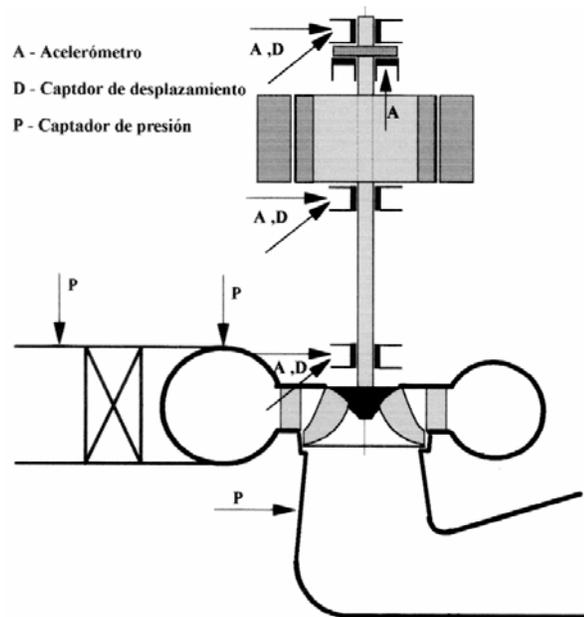
por cuatro centrales hidroeléctricas de gran tamaño: Ilha Solteira con 3.200 MW, Jupia con 1.410 MW, Água Vermelha con 1.380 MW y Três Irmãos con 1.290 MW. Todo eso ha incentivado el Laboratorio de Vibraciones y Instrumentación del Departamento de Ingeniería de esta facultad a desarrollar investigaciones con respecto a la monitorización y diagnóstico de daños de centrales regionales para el establecimiento de rutinas de mantenimiento predictivo.

5.3.3.1 Instalación de los sensores

Se siguen las normas establecidas para la instalación, pero en ocasiones la ubicación se hace en función de las características de las excitaciones que se cree están excitando la máquina, de los defectos en la máquina que las originan, entre otros. La ubicación se realiza dependiendo de la accesibilidad para la ubicación de los sensores en los lugares indicados, esto debido a que los lugares indicados por las normas para la ubicación de captadores, son de difícil acceso y ubicación dependiendo de la central.

En los cojinetes guías se instalan dos acelerómetros para medición de vibración radial absoluta y dos captadores de no contacto para medición de desplazamiento relativo eje/cojinete. Todos ellos fijados en puntos separados de 90 grados entre sí y pertenecientes a los planos paralelo y perpendicular a la tubería forzada. Los captadores de no contacto, cuando es posible, deben ser instalados en las mismas direcciones de los acelerómetros. En el cojinete pivote se instala un acelerómetro para medición de vibración absoluta axial. En la Figura 20 se muestra la ubicación de tales sensores.

Figura 20. Ubicación de sensores para el monitoreo de vibraciones



UNESP/FEIS – CAVITACIÓN @ 2006

5.3.4 Estudios Realizados En El Laboratorio De Máquinas Hidráulicas (LMF) De La Escuela Politécnica Federal De Lausanne (EPFL), Suiza.

El laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL) cuenta con un gran recorrido y experiencia en el tema de maquinas hidráulicas y especialmente en el de la cavitación en turbinas Francis, son varias las publicaciones y estudios relajados por sus integrantes quienes, ocasionalmente, en asociación con otras instituciones, publican sus estudios y experimentos. A continuación se da información arrojada por estudios, experimentos realizados e informes de simposios, acerca de la cavitación en turbinas Francis.

- Predicción de la cavitación erosiva en turbinas hidráulicas a partir de vibraciones.

La Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL) y la universidad de Catalunya (UPC) se reúnen en el “22 IAHR symposium on hidraulic machinary and systems” para mejorar las técnicas de medición y monitoreo de la cavitación

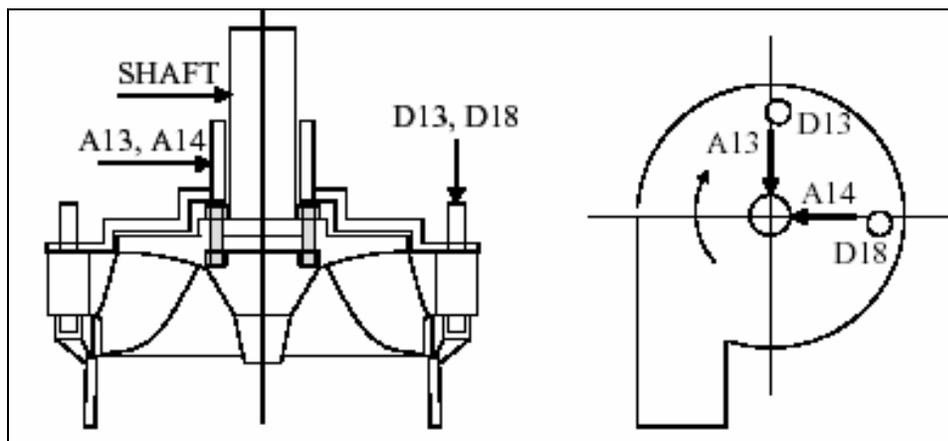
utilizando vibraciones, para ello se realizaron mediciones en dos turbinas Francis similares. Para las mediciones realizadas se utilizó un sistema telemétrico el cual se encargó de transmitir las señales captadas por acelerómetros ubicados en el eje de la turbina así como también se realizaron mediciones en el cojinete guía y el alabe distribuidor.

El mejor sitio para hacer las mediciones es el cojinete guía de la turbina, sin embargo las mediciones remotas solo dan una indicación relativa de la energía asociada con la cavitación. Es necesario realizar una determinación experimental de la función de transmisibilidad entre la ubicación de la erosión y la ubicación de los instrumentos de medición (EPFL/LMH - UPC @ 2004).

➤ Posicionamiento de los instrumentos de medición

El acelerómetro, indicado como SHFT en la Figura 21, ha sido fijado en la parte superior cerca del cojinete guía de la turbina, los demás sensores han sido ubicados en las partes fijas de la turbina, en particular, dos de ellos han sido ubicados en la parte superior del cojinete guía de forma radial distanciados 90° uno del otro y nombrados A13 y A14 en la Figura 21. El último acelerómetro (D18) ha sido situado en la parte superior del alabe distribuidor, en dirección axial.

Figura 21. Descripción de la ubicación y dirección de las mediciones de vibraciones



EPFL/LMH - UPC @ 2004

➤ Condiciones de operación

Las mediciones fueron realizadas operando la turbina a varias condiciones de carga, desde la mas baja, hasta la mas alta.

➤ Análisis de los datos arrojados por los sensores

Una banda de alta frecuencia, de 3 a 6 Khz, se escogió para los primeros análisis. Los niveles completos de vibraciones RMS se calcularon para todas las señales. Luego las frecuencias contenidas por las señales fueron analizadas por un espectro de potencia con una banda de 20KHz. Finalmente las señales fueron filtradas en dos bandas de frecuencia, de 3 a 6 KHz y de 17 a 20 KHz, con la finalidad de determinar la principal modulación de amplitud de frecuencias.

➤ Conclusiones del estudio

El sistema telemétrico con acelerómetros de alta frecuencia ubicados en el eje de rotación, tuvo gran éxito en cuanto a la detección de cavitación erosiva. Para la predicción de cavitación erosiva, las mediciones realizadas en el eje de la turbina presentan mas ventajas que las realizadas en el cojinete pues este lugar es mas libre de ruidos y la función de transmisibilidad con el rodete es mas fácil de caracterizar con la maquina en paro.

- Clasificación de la cavitación en maquinas hidráulicas usando análisis de vibraciones

La cavitación puede ser clasificada de varias maneras utilizando análisis de vibraciones. La cavitación adjunta a los alabes del rotor es modulada por inestabilidades causadas por la interacción con los alabes y el distribuidor. El perfil de esta demodulacion no es senoidal.

Las técnicas de análisis empleadas incluyen la de demodulacion, espectro envolvente de potencia, análisis tiempo frecuencia y la técnica “phase averaging”, técnica utilizada para entender la interacción entre los alabes y el distribuidor.

➤ Mediciones experimentales

Para realizar las mediciones se utilizó un modelo a escala de turbina Francis bajo las condiciones mostradas en la tabla 6.

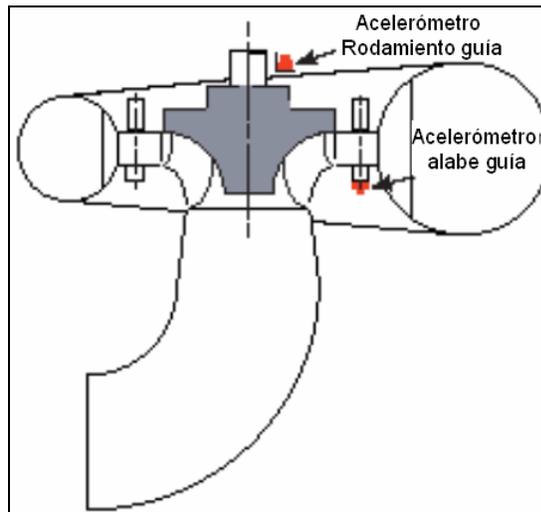
Tabla 5. Características de la turbina empleada y condiciones de flujo

Numero de alabes	13
Numero de alabes directores	16
Cabeza nominal	88m
Potencia nominal	400Kw
Flujo nominal	0,54 m ³ /s
Velocidad normal del eje	1000rpm
Condiciones de cabeza para prueba	88m
Condiciones de potencia para prueba	467Kw
Condiciones de flujo para prueba	0,64m ³ /s
Condiciones de velocidad eje para prueba	500rpm
Condiciones de sigma para prueba	0,07

EPFL/LMH @ 2002

Se realizó una observación visual del comportamiento de la cavitación a través del tubo de aspiración, el cual es transparente, utilizando un estroboscopio. Se posicionaron acelerómetros de alta frecuencia cerca del cojinete guía y sobre dos alabes distribuidores, como se ve en la Figura 22.

Figura 22. Ubicación de sensores



EPFL/LMH @ 2002

Las mediciones realizadas en los alabes distribuidores fueron las mas útiles a la hora de realizar la clasificación de la cavitación.

Las señales vibratorias se filtran inicialmente en un rango de 40 a 50 KHz, que incluye el rango de frecuencia de las vibraciones inducidas por la cavitación, posteriormente, se analizaron los datos arrojados por los sensores, realizando el tratamiento indicado para ello, este incluye principalmente análisis de gráficos donde se plasma información referente a la velocidad armónica de rotación, espectrograma STFT promedio, entre otros.

➤ Conclusiones del análisis

El estudio realizado permite clasificar la cavitación de la turbina analizada de la siguiente forma:

- La cavitación adjunta a los alabes del rodete, es modulada por inestabilidades causadas por la interacción con los distribuidores en cuanto al flujo de entrada y con los remolines del tubo de salida en cuanto a este.
- El perfil de tal modulación no es senoidal.
- La cavitación en el rodete no es uniforme.

➤ Otros estudios realizados

Los estudios realizados por la Escuela Politécnica Federal de Lausanne y sus integrantes, son bastante numerosos, a continuación se describe brevemente los más relevantes en cuanto al tema de cavitación en turbinas Francis recientemente publicados.

- Monitoreo de la cavitación en maquinas hidráulicas

La cavitación en maquinas hidráulicas puede causar grandes problemas, como por ejemplo la erosión, ello denota la necesidad de realizar un monitoreo constante del estado de la turbina en cuanto a la erosión por cavitación, para ello, la Escuela Politécnica, da fe del monitoreo a partir de las vibraciones, atribuyén-

dole ventajas como por ejemplo la facilidad y rapidez de instalación de sensores y el fácil tratamiento de la información arrojada por los mismos.

La relación entre la posición de los sensores y el lugar donde ocurre la cavitación, ya que es difícil ubicar sensores en tales lugares, se establece a partir de una calibración dinámica desarrollada por el laboratorio de máquinas hidráulicas de la Escuela Politécnica, esta consiste en un martillo utilizado para impactar los alabes con el fin de establecer la función de transmisibilidad entre el área donde ocurre o se quiere medir la cavitación y la ubicación de los sensores (EPFL/LMH – C. Monitoring @ 2006).

- Estudio físico de la cavitación por desprendimiento del borde de entrada “Leading Edge Cavity Detachment”

Este estudio de la cavitación de borde de entrada “leading edge cavitation”, considerado por este instituto como el modo más erosivo de cavitación, consiste en realizar pruebas de simulación tanto numéricas como experimentales referentes a la formación de este tipo de cavitación, para la simulación numérica se utiliza el código “Neptune” desarrollado en la Escuela Politécnica y para la simulación física se utiliza el banco experimental y el túnel de cavitación a alta velocidad “high-speed cavitation tunnel” del instituto, en este, entre otros, se realiza captura de imágenes del fenómeno con cámaras especiales a 1.000.000 de cuadros por segundo (EPFL/LMH – L.E. Cavitation @ 2003) (EPFL/LMH – C. Monitoring @ 1994).

Al igual que este estudio de la cavitación del borde de entrada, se tienen otros más asociados a otros tipos de cavitación y sus diferentes variables. También se estudia la estabilidad de operación de las turbinas francias y los fenómenos que intervienen en esta, entre ellos la cavitación (EPFL/LMH – F.T Stability @ 1993) (EPFL/LMH – F.T Stability @ 2006).

5.3.5 Estudios Realizados por LMH-IMHEF⁹ y UPC¹⁰

Integrantes del Laboratorio de maquinas hidráulicas de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne se unen a personal de la Universidad Politécnica de Catalunya para realizar una investigación en cuanto a la detección de cavitación en turbinas hidráulicas, entre ellas, dos Francis y un modelo a escala, la metodología se basa en la medición y análisis de vibraciones estructurales, emisiones acústicas y presiones hidrodinámicas. El estudio se enfoca en las dos clases de cavitación mas relevantes en turbinas Francis: de borde de entrada “leading edge cavitation”, debido a sus efectos altamente erosivos, y de burbuja “bubble cavitation” pues esta afecta el rendimiento de la turbina y la estabilidad de la misma, al causar remolinos en el tubo de aspiración (SCIENCE DIRECT – CAVITACIÓN @ 2004).

- Técnicas de Detección Utilizadas

Las técnicas de detección utilizadas se basan en la medición y análisis del ruido sostenido provocado por el fluido en la estructura “Structure and fluid-borne noise”, para ello se analizan las altas frecuencia a través de el estudio de las vibraciones, las emisiones acústicas y los niveles dinámicos de presión. El uso de sensores de emisión acústica permite registrar señales que los acelerómetros no alcanzan a percibir. Para mejorar el diagnostico dado a partir de las señales de los sensores, se utilizan técnicas de demodulacion de amplitud que permiten identificar los valores de frecuencia asociados al comportamiento dinámico de la cavitación. Para las señales de baja frecuencia, caso de las turbulencias presentes en el tubo de aspiración, se utiliza transductores de presión, la información arrojada por estos no requiere de ningún acondicionamiento especial, simplemente análisis del contenido de frecuencia de las señales de presión y vibración con un rango bajo de frecuencia.

⁹ Laboratorio de maquinas hidráulicas de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, Suiza.

¹⁰ Universidad Politécnica de Catalunya, España

- Localización de los sensores

Basados en otros estudios y experiencias de investigadores del fenómeno cavitación, las mediciones de vibraciones se hacen ubicando sensores en la base del cojinete guía, los alabes distribuidores, la cámara espiral y la pared del tubo de aspiración.

- Conclusiones del estudio

Los tipos de cavitación de mayor interés en turbinas hidráulicas son: la de borde de entrada “inlet leading edge cavitation”, la de burbuja a la salida “outlet bubble cavitation” y la que provoca turbulencias en el tubo de aspiración “draft tube swirl”.

El proceso de colapso de cada uno de los tipos de cavitación, que genera señales de alta frecuencia, es gobernado por bajas fluctuaciones de frecuencia asociadas a la cavitación dinámica. Como resultado, las señales de alta frecuencia son moduladas en amplitud a estas bajas frecuencias.

La cavitación inestable de borde de entrada “Unstable leading edge cavitation”, provoca vibraciones en los alabes del rotor que se propagan a través del sistema mecánico, para su detección es recomendado realizar las mediciones lo mas cerca posible al rodete en la base del cojinete guía de la turbina. Las mediciones realizadas en los alabes distribuidores son útiles pero no lo suficientemente claras. Las paredes del tubo de aspiración resultan no ser buenas para realizar mediciones.

Para la detección de cavitación de burbuja a la salida “outlet bubble cavitation”, resultan útiles las mediciones realizadas por los sensores ubicados en las paredes del tubo de aspiración, mientras las mediciones en los alabes distribuidores no resultan útiles.

En general, la presencia de vibraciones en máquinas hidráulicas es incrementada en alrededor de 3KHz por la presencia de cavitación.

Los resultados obtenidos por los sensores de emisión acústica a altas frecuencias, son análogos a los resultados obtenidos con los acelerómetros en bandas de más baja frecuencia.

El mejor posicionamiento de los sensores de medición está dado por el tipo de cavitación que se quiere analizar.

5.3.6 Estudios Realizados Por La Central Hidroeléctrica Canadiense Hydro Quebec.

La central hidroeléctrica Canadiense Hydro Québec, a iniciado fuertes investigaciones en el tema de la cavitación en máquinas hidráulicas desde 1986, entre los principales temas de sus investigaciones se encuentra metalurgia de mecanismos hidrodinámicos del proceso de erosión por cavitación, desarrollo de nuevos materiales con mejor resistencia a los ataques de la cavitación, desarrollo de procesos eficientes para la reparación de daños por cavitación, transposición de principios de modelo a prototipo y desarrollo de sistemas de monitoreo de daños por cavitación (HIDRO QUEBEC – CAVITACIÓN @ 2006).

El tema que atañe la actual investigación es el trabajo realizado en cuanto al monitoreo de los daños por cavitación, para ello la central hidroeléctrica Canadiense diseña un sistema de monitoreo dedicado a las mediciones en línea de las agresiones por cavitación a través de las vibraciones. Los experimentos fueron realizados en cuatro turbinas Francis localizadas en centrales diferentes.

- Medición de las vibraciones.

Estudios anteriores demuestran que el mejor lugar para monitorear los efectos cavitantes sobre los alabes del rodete, es la parte baja del cojinete guía. El trabajo demuestra que la modulación en amplitud de las señales vibratorias debe ser extraída a altas frecuencias para separar las señales producidas por los impactos de la cavitación de otras fuentes. Las vibraciones han sido tomadas en la parte baja del cojinete guía de la turbina y en el tubo de aspiración.

- Calibración dinámica.

Para relacionar las vibraciones medidas en la turbina con las fuerzas que actúan en los alabes de esta, es necesario realizar una calibración dinámica; para ello se diseñó un martillo especial, ver Figura 23, con el cual se golpea el área de mayor erosión por cavitación, la respuesta de los acelerómetros es comparada con la fuerza de impacto para derivar la función de transferencia

Figura 23. Martillo para calibración dinámica



HIDRO QUEBEC – CAVITACIÓN @ 20006

- Conclusiones del estudio

El monitoreo de las vibraciones constituye un buen método para la detección de la cavitación. La generación y colapso de cavidades transitorias es altamente dependiente de las condiciones de operación y de todo el diseño de la turbina. Según las experiencias de la central Canadiense, el mejor sistema de monitoreo debe integrar todas las herramientas necesarias para el tratamiento de señales para reducir al mínimo los errores de estimación de los regimenes de cavitación.

5.3.7 Criterios Generales Concluyentes

La investigación descrita anteriormente y los efectos de la erosión en alabes y tubería, dejan ver a la cavitacion como un modo de falla critico para las turbinas Francis, las características de su formación y desarrollo durante el funcionamiento de la turbina, indican que el monitoreo de las vibraciones es un método apropiado de medición de dicho fenómeno, ello es confirmado por los estudios adelantados por diferentes institutos internacionales, estudios que han sido tratados en los numerales 5.3.1 a 5.3.6 de la actual investigación. Los estudios adelantados por los institutos consultados se basan en la detección de la cavitacion a partir de el monitoreo de las vibraciones, en tales estudios prima la utilización de sensores de presión aceleración y ultrasonido, todos con la característica del manejo de las altas frecuencias, esto es, con rangos de sensibilidad que van de los 3 a los 6 KHz así como otros que van de los 40 a los 50 KHz, la diferencia en los rangos de sensibilidad entre unos y otros, no distorsiona los resultados obtenidos, por lo contrario, estos son equivalentes, según lo concluido por el instituto Suizo y la Universidad Politécnica Española (EPFL/LMH-UPC@2004).

La identificación de los parámetros descritos anteriormente, da pie a la proposición del siguiente capitulo “INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA DE MEDICIÓN PROPUESTO PARA LA DETECCIÓN DE LA CAVITACIÓN”, en este se tienen

en cuenta las experiencias, recomendaciones y conclusiones de los estudios consultados en la actual investigación.

6. INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA DE MEDICIÓN PROPUESTO PARA LA DETECCIÓN DE LA CAVITACIÓN

Las turbinas hidráulicas cuentan actualmente con normas que reglamentan diferentes aspectos como por ejemplo los límites de severidad en función de la rotación de la máquina, tema de la norma ISO/TC/SC2-1994, pruebas de aceptación y diagnóstico como la IEC 60041; 60193; 994; 61364, ISO 7919-5, vibraciones ISO 7919-1; 10816-1; 10816-5; 10816-4, la cavitación, caso de las normas ASTM G32; G40, IEC 609, entre otras.

6.1 INFORMACIÓN DE LAS NORMAS EN CUANTO A CONDICIONES DE INSTALACIÓN.

Es importante tener en cuenta la información suministrada por las normas a la hora de monitorear la cavitación en turbinas pero en ocasiones es difícil acatar todos los aspectos plasmados en estas debido por ejemplo a las condiciones específicas de cada instalación en cuanto a la accesibilidad para la ubicación de sensores, las características de las excitaciones que pueden estar excitando la máquina, los defectos en la máquina que originan tales excitaciones, entre otros, ver por ejemplo los estudios realizados por la facultad de ingeniería de la universidad UNESP/FEIS, Brasil, citados en la sección 5.3.3.

Las razones expuestas dejan ver que no basta con establecer sistemas de instrumentación y monitoreo basándose tan solo en lo especificado por las normas, si no que se debe establecer parámetros basándose en las características propias de cada central, es por ello que a continuación se proponen instrumentos de monitoreo, su localización y un sistema de medición con base a las experiencias y resultados de estudios adelantados por institutos internacionales consultados a lo largo del actual proyecto.

El posicionamiento recomendado de los sensores de medición está dado por el tipo de cavitación que se quiere analizar, es por ello que para la propuesta se tienen en cuenta principalmente los tipos de cavitación más relevantes en

cuanto a lo determinado por los investigadores Xavier Escaler y Mohamed Farhat de la Universidad Politécnica de Catalunya, España y el Laboratorio de Maquinas Hidráulicas de la Escuela Federal de Lausanne, Suiza, respectivamente, en su trabajo de detección de cavitación en maquinas hidráulicas. A continuación se describe los tipos de cavitación con los lugares donde se recomienda posicionar los sensores:

- Inlet leading edge cavitation (Cavitación de borde de entrada): base del cojinete guía de la turbina, lo más cerca del rodete.
- Outlet bubble cavitation (cavitación de burbuja a la salida): paredes del tubo de aspiración.
- Draft tube swirl (turbulencias en el tubo de aspiración, cavitación de Von Karman): paredes del tubo de aspiración.

La ubicación, tipo y sensibilidad de los sensores, que se propone a continuación, tabla 7, cumple con los parámetros mínimos de medición de los principales tipos de cavitación descritos anteriormente, ello según lo concluido en diferentes investigaciones referentes al monitoreo de cavitación en turbinas hidráulicas Francis, descritas en el capítulo cuatro del actual proyecto, ello no indica que no se pueda monitorear otros tipos de cavitación con este sistema. El tipo y la cantidad de sensores a utilizar se proponen según los resultados y conclusiones dadas por investigaciones de diferentes institutos internacionales en el tema de cavitación en turbinas Francis, ver por ejemplo los estudios realizados en UPC, descritos en el capítulo 5. Los elementos de monitoreo que se proponen satisfacen las expectativas de la norma ISO 17359 que, entre otros, propone la necesidad del monitoreo de vibraciones y presiones.

Tabla 6. Descripción de instrumental propuesto

Monitoreo De Vibraciones Radiales		Monitoreo De Presión Aguas Abajo (1):	
Ubicación:	Cojinete de la turbina	Ubicación:	En tubo de aspiración
Tipo	Acelerómetro	Tipo	Captador de presión dinámica
Frecuencia de respuesta	1.....10000 [Hz]	Rango mecánico	(0 -250) [bar]
Rango mecánico	±25 [g]	Frecuencia natural	70 [KHz]
Monitoreo De Vibraciones Axiales		Monitoreo De Presión Aguas Abajo (2):	
Ubicación:	Cojinete de la turbina	Ubicación:	En tubo de aspiración
Tipo	Acelerómetro	Tipo	Captador de presión dinámica
Frecuencia de respuesta	1.....10000 [Hz]	Rango mecánico	(0 -250) [bar]
Rango mecánico	±25 [g]	Frecuencia natural	70 [KHz]

Nota: Se debe tener en cuenta que en ciertas condiciones las turbinas tipo Francis presentan vació en el tubo de aspiración, ello se plantea como inquietud para futuros sistemas de medición de la cavitación propuestos.

6.2 EQUIPO DE CAPTURA DE DATOS.

6.2.1 Canales.

El número de canales debe ser como mínimo cuatro, cada uno configurado de acuerdo al principio de operación de cada sensor.

6.2.2 Captura de los Datos.

Para la captura de datos es necesario contar con un filtro anti-aliasing.

6.2.3 Frecuencia de Muestreo.

Se propone una frecuencia de muestreo de 10 KHz.

6.3 OTRAS VARIABLES A TENER EN CONSIDERACIÓN.

El sistema de medición y monitoreo propuesto anteriormente se basa en la detección de la cavitación analizando las vibraciones generadas por tal fenómeno, en este se proponen sensores de presión y aceleración, pero es importante tener en cuenta sensores con rangos dinámicos de respuesta mas elevados (debido a las características de aparición del fenómeno), como lo son los sensores de ultrasonido, los cuales no se proponen debido a los resultados de otras investigaciones que afirman la coherencia de la información captada por sensores de uno u otro tipo, dando la opción de seleccionar un solo tipo (EPFL/LMH - UPC @ 2004 -1004-).

La detección del fenómeno de la cavitación, en la mayor parte del actual trabajo, se ha basado en técnicas de monitoreo pertenecientes a la rama de la vibraciones, ello debido a las ventajas que presenta, pero es posible utilizar otras ramas como lo es la tribologica, donde, por ejemplo la Esso Mobil, recomienda el uso de aceites como el DTE Light, Medium, Heavy Medium y Heavy, que poseen propiedades de desaireación, lo que permite una rápida separación del agua introducida en el sistema, evitando la cavitación y por tanto un funcionamiento errático; durante la investigación realizada no se encontro información referente a detección de cavitación en base a análisis de lubricantes, pero es posible hacer seguimiento a las condiciones de los aceites de turbinas hidráulicas en busca de patrones que permitan detectar variaciones en los sistemas lubricados causadas por el fenómeno de la cavitación.

La tercera gran ramade los análisis y monitoreos de sistemas mecánicos, hidráulicos, entre otros, es la térmica, de la que a lo largo de la actual investigación no se halló información, la posibilidad de aplicación de esta técnica a la detección de la cavitaicion en turbinas hidráulicas se basa en la segunda etapa de formación del fenómeno, descrita en la sección 5.2.3, donde una ves formadas y arrastradas las cavidades “burbujas”, colapsan violentamente, condensándose casi instantáneamente y pudiendo martillar la pared sólida con elevada amplitud que puede alcanzar valores instantáneos de 500 atm. (presión) y temperaturas de 800° C debido a las ondas de choque. El colapso pro-

piamente dicho es muy rápido: del orden de nanosegundos. La temperatura alcanzada al momento del colapso (800°C) deja ver la posibilidad de la utilización de técnicas de monitoreo térmicas que permitan hacer una caracterización en cuanto a la medición y el monitoreo de la cavitación desde el punto de vista de las temperaturas.

7. CONCLUSIONES

Las turbinas Francis son turbinas de reacción gracias a al comportamiento del flujo sobre el rodete, este constituye el principal componente de la turbina en cuanto al cumplimiento de la función principal del artefacto, esto es, convertir la energía hidráulica del agua en energía mecánica rotacional. Un elemento importante a tener en cuenta a la hora de diseñar o seleccionar una turbina hidráulica Francis, es el número específico de revoluciones, que permite seleccionar diferentes elementos de la turbina que ha de trabajar con un salto y caudal conocido.

Los principales parámetros que influyen en la eficiencia de la turbina Francis son:

- a. La altura efectiva: busca ser máxima en los casos que el agua abandona el rodete axialmente.
- b. El perfil de los alabes del rodete: es diseñado teniendo en cuenta, principalmente, el caudal y los ángulos de entrada y salida del agua.
- c. El perfil de los alabes del distribuidor.
- d. La operación a velocidad variable y constante.
- e. La cavitación como turbulencia.
- f. El tamaño, en cuanto a las pérdidas por fugas (menores en turbinas grandes).
- g. Las pérdidas por choque a la entrada del rodete.
- h. Las pérdidas por fricción del fluido.
- i. Las pérdidas de energía cinética debido a la velocidad absoluta del agua en la descarga del rodete, entre otras.

Las técnicas de monitoreo descritas en el capítulo 3, pueden ser clasificadas en tres grandes ramas de aplicación general: térmica, tribológica y de vibraciones.

La aplicación de las técnicas de monitoreo descritas en el capítulo 3 pueden ser aplicadas a diversos componentes de las turbinas hidráulicas Francis, dependiendo de que elemento, sección de la máquina, comportamiento, modo de falla, entre otros se quiera analizar, un ejemplo de ello pueden ser los rodamientos de la misma, los cuales pueden denotar anomalías por calentamiento (provocado por desalineamiento, desgaste, etc.), tal calentamiento puede ser rastreado por técnicas de monitoreo de las temperaturas; como esta situación se presentan muchas más que admiten el uso de técnicas de medición y monitoreo en su tratamiento, debido a ello se hace necesario conocer y tener claro los aspectos pertinentes de la máquina a monitorear, para así poder decidir que técnica de medición y monitoreo se ha de utilizar, ello obliga a su vez a conocer que técnicas existen y que resultados permiten obtener, para así elegir la más adecuada en cada situación.

La realización del actual proyecto da como resultado la consideración de la cavitación como modo de falla crítico en turbinas hidráulicas del tipo Francis, coincidiendo con lo planteado por diferentes institutos internacionales, esto se determina gracias a la investigación llevada a cabo a través de las consultas electrónicas realizadas en Internet, donde además de páginas en general, se consultó institutos de renombre en el tema de máquinas hidráulicas y en especial de turbinas Francis, como por ejemplo el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza, la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), España, el Instituto de Investigación de la central hidroeléctrica de Canadá, HydroQuebec, entre otros y se halló que los temas centrales de investigación, tanto actuales como los ya consolidados en estudios anteriores, giran en torno a la cavitación, enfocándose a modos específicos de formación de la misma, sus consecuencias, su monitoreo, entre otras.

La aparición de la cavitación y sus consecuencias son función de factores como el diseño y tamaño de la máquina, la velocidad específica o el punto de funcionamiento, entre otros, su presencia en una máquina hidráulica obliga a

determinar si esta puede o no continuar operando, dependiendo de los niveles tolerados por la turbina.

El método de medición y monitoreo mas utilizado para la detección de cavitación en turbinas Francis, de acuerdo a las experiencias de los institutos internacionales consultados a lo largo del actual trabajo, es el de vibraciones, el trabajo con este método se basa en la utilización de sensores principalmente de aceleración y presión, dichos sensores son óptimos para la detección del fenómeno debido a las características de su manifestación “pulsaciones generadas por el colapso de las burbujas”.

Es importante tener en cuenta la información suministrada por las normas a la hora de monitorear la cavitación en turbinas pero en ocasiones es difícil acatar todos los aspectos plasmados en estas debido a las condiciones específicas de cada instalación en cuanto a la accesibilidad para la ubicación de sensores, las características de las excitaciones que se cree están excitando la máquina, los defectos en la máquina que originan tales excitaciones, entre otros, por tal razón no basta con establecer sistemas de instrumentación y monitoreo basándose tan solo en lo especificado por las normas, si no que se debe establecer parámetros basándose en las características propias de cada central.

El mejor posicionamiento de los sensores utilizados en la medición y monitoreo del fenómeno de la cavitación en turbinas Francis, a nivel de monitoreo de vibraciones, esta dado por el tipo de cavitación que se quiere analizar.

El software CAD utilizado para la caracterización geométrica, previamente acordado con la empresa de generación de energía local, Inventor 10, brinda las condiciones, características y herramientas necesarias para una adecuada caracterización 3D de la turbina Francis en cuestión.

La caracterización geométrica de un componente de la turbina es causa de paro del equipo en el caso de que no se tenga un repuesto o un plano de taller 2D

completamente definido del elemento, por esto es preferible contar con el plano de taller completamente definido o en su defecto un repuesto que pueda ser sometido a un proceso de ingeniería inversa.

7.1 POSIBLES VÍAS DE DESARROLLO EN LA DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN MAQUINAS HIDRÁULICAS

La detección del fenómeno de la cavitación, en la mayor parte del actual trabajo, se ha basado en técnicas de monitoreo pertenecientes a la rama de la vibraciones, ello debido a las ventajas que presenta, pero es posible utilizar otras ramas como lo es la tribologica, donde, por ejemplo la Esso Mobil, recomienda el uso de aceites como el DTE Light, Medium, Heavy Medium y Heavy, que poseen propiedades de desaireación, lo que permite una rápida separación del agua introducido en el sistema, evitando la cavitación y por tanto un funcionamiento errático; durante la investigación realizada no se halló información referente a detección de cavitación en base a análisis de lubricantes, pero es posible hacer seguimiento a las condiciones de los aceites de turbinas hidráulicas en busca de patrones que permitan detectar variaciones en los sistemas lubricados causadas por el fenómeno de la cavitación.

La tercera gran rama de los análisis y monitoreos de sistemas mecánicos, hidráulicos, entre otros, es la térmica, de la que a lo largo de la actual investigación no se halló información concluyente. La posibilidad de aplicación de esta técnica a la detección de la cavitación en turbinas hidráulicas se basa en la segunda etapa de formación del fenómeno, descrita en el capítulo 4, donde una vez formadas y arrastradas las cavidades “burbujas”, colapsan violentamente, condensándose casi instantáneamente y pudiendo martillar la pared sólida con elevada amplitud que puede alcanzar valores instantáneos de 500 atm. (presión) y temperaturas de 800° C debido a las ondas de choque. El colapso propiamente dicho es muy rápido: del orden de nanosegundos. La temperatura alcanzada al momento del colapso (800°C) deja ver la posibilidad de la utilización de técnicas de monitoreo térmicas que permitan hacer una carac-

terización en cuanto a la medición y el monitoreo de la cavitación desde el punto de vista de las temperaturas.

La caracterización geométrica del rodete de la turbina, actividad enmarcada por uno de los objetivos del actual proyecto, incluye el a los alabes, componentes de dicho elemento, su caracterización requiere de la ecuación del plano “superficie”, la ecuación de las curvas que describen las fronteras de la superficie o una matriz de puntos que describan la superficie, esta nube de puntos puede ser adquirida a través de métodos como la digitalización, basado en la adquisición punto a punto de la geometría a trabajar, otro método de ingeniería inversa capas de dar información de la geometría de los alabes es el procesamiento de imágenes, que utiliza técnicas de reconstrucción geométrica a partir de imágenes.

Basta con adquirir la información del plano o superficie de un solo alabe pues una vez ensamblada en el plano, podrá aplicarse una matriz circular “circular pattern” gracias a que todos los alabes poseen igual geometría.

8. ANEXOS

8.1 CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA TURBINA FRANCIS

Las piezas a caracterizar geoméricamente fueron acordadas previamente con los ingenieros encargados del actual proyecto en la empresa de generación de energía dando así cumplimiento al uno de los objetivos planteados para el actual proyecto, dicho acuerdo se encuentra por escrito y firmado por ambas partes. Para la caracterización geométrica se acordó el software CAD Inventor versión 10. Las piezas acordadas son:

- 03201.2205.51.01.000A-CG (Guide Vane)
- 03201.2205.31.01.000A CG – (Runner with shaft)
- 03201.2205.51.03.000 CG – (Cubierta Anterior)
- 03201.2205.51.02.000 CG – (Cubierta Posterior)
- 03201.2205.51.00.003A (Link)
- 03201_2205_51_00_006A (Lever)
- 03201_2205_51_00_011A (Lever Plate)
- 03201_2205_51_00_012A (Lever Plate)
- 03201_2205_51_00_013A (Lever)

El elemento “03201.2205.31.01.000A CG – (Runner with shaft)”, se proporciona sin alavés dado a que el plano suministrado de este elemento no contiene la información requerida para su caracterización geométrica. La caracterización de los álabes requiere de la ecuación del plano “superficie” o de una matriz de puntos que describan la superficie.

Para la nomenclatura de las piezas se utilizó lo estipulado en la norma IEC TR 61364 Ed.1 - Nomenclatura Turbinas – como también la nomenclatura y clasificación usada por la empresa fabricante de la turbina. El nombre y ubicación en la carpeta del archivo con la información de las piezas descritas “dibujadas”, obedece a la nomenclatura del fabricante; la carpeta con tales archivos se al-

macena en otra carpeta con el nombre de la pieza según la norma IEC descrita.

Adicional a los planos de las partes en Inventor 10 (.ipt), se entrega un archivo ejecutable (.exe) del programa e-drawing que permite visualizar los modelos 3D caracterizados en cualquier PC, aun sin ningún software CAD instalado. A continuación se presenta una Figura de cada una de las partes dibujadas.

Figura 24. 03201.2205.51.01.000A-CG (Guide Vane)

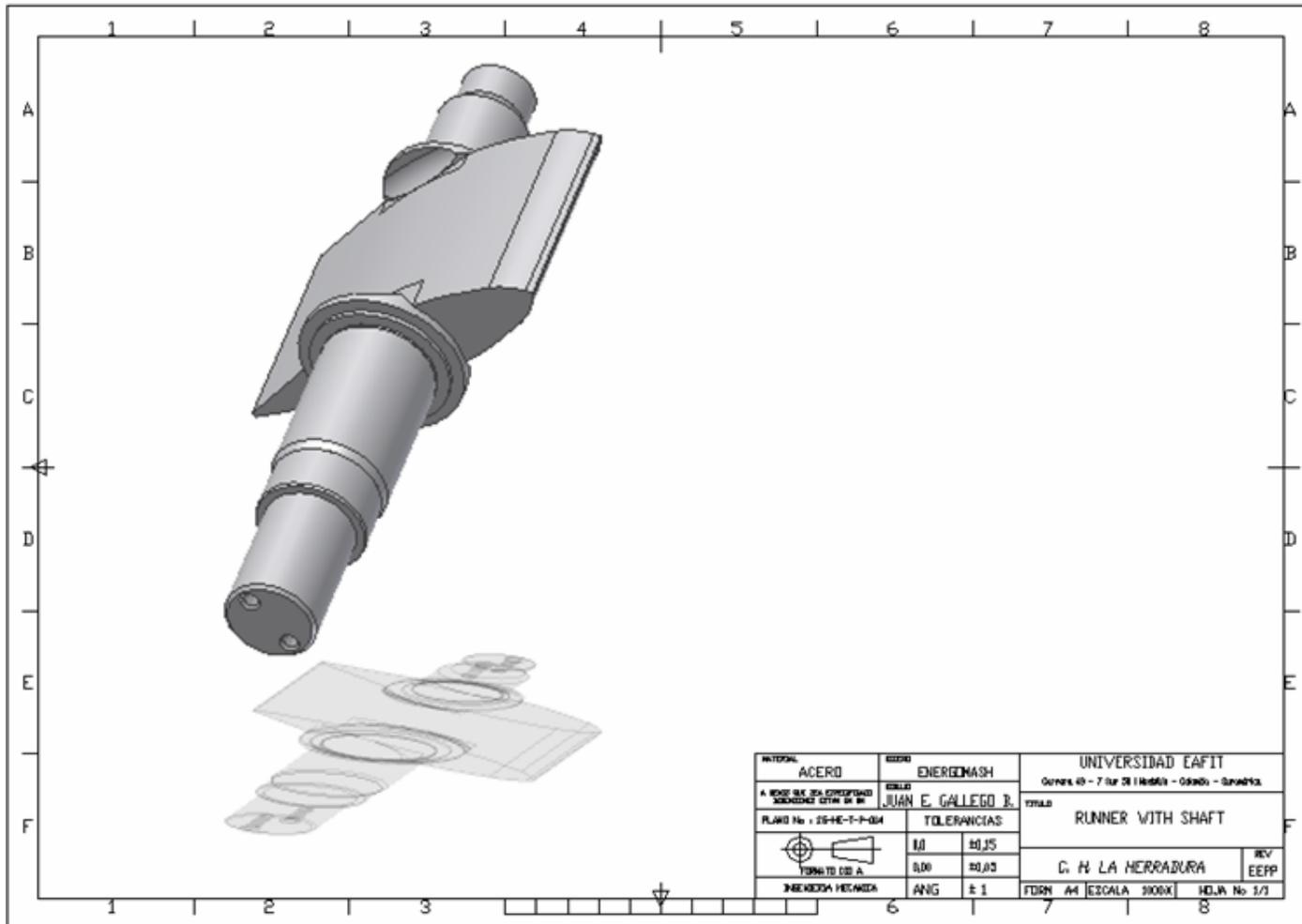


Figura 25. 03201.2205.31.01.000A CG – (Runner with shaft)

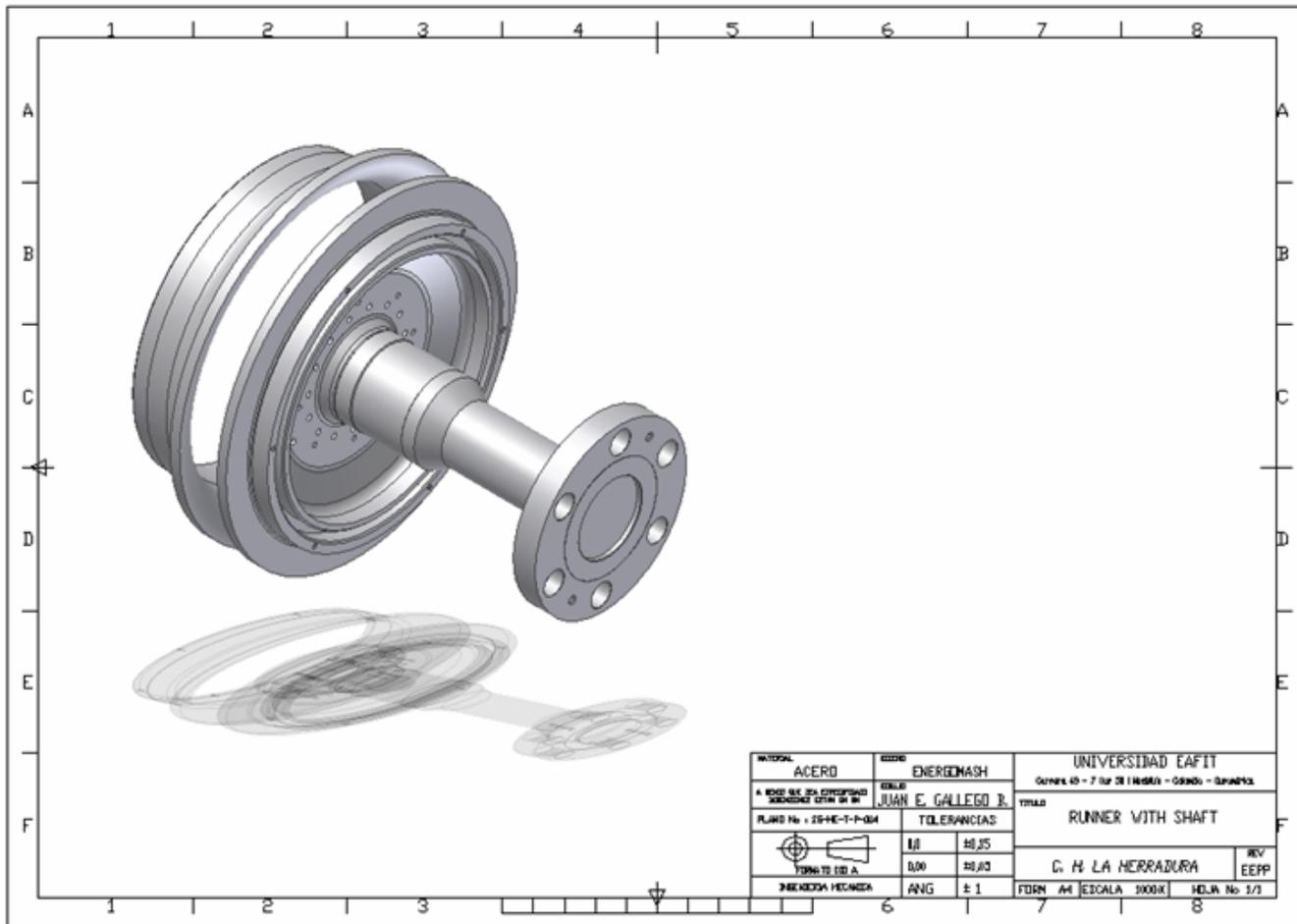


Figura 26. 03201.2205.51.03.000 CG – (Cubierta Anterior)

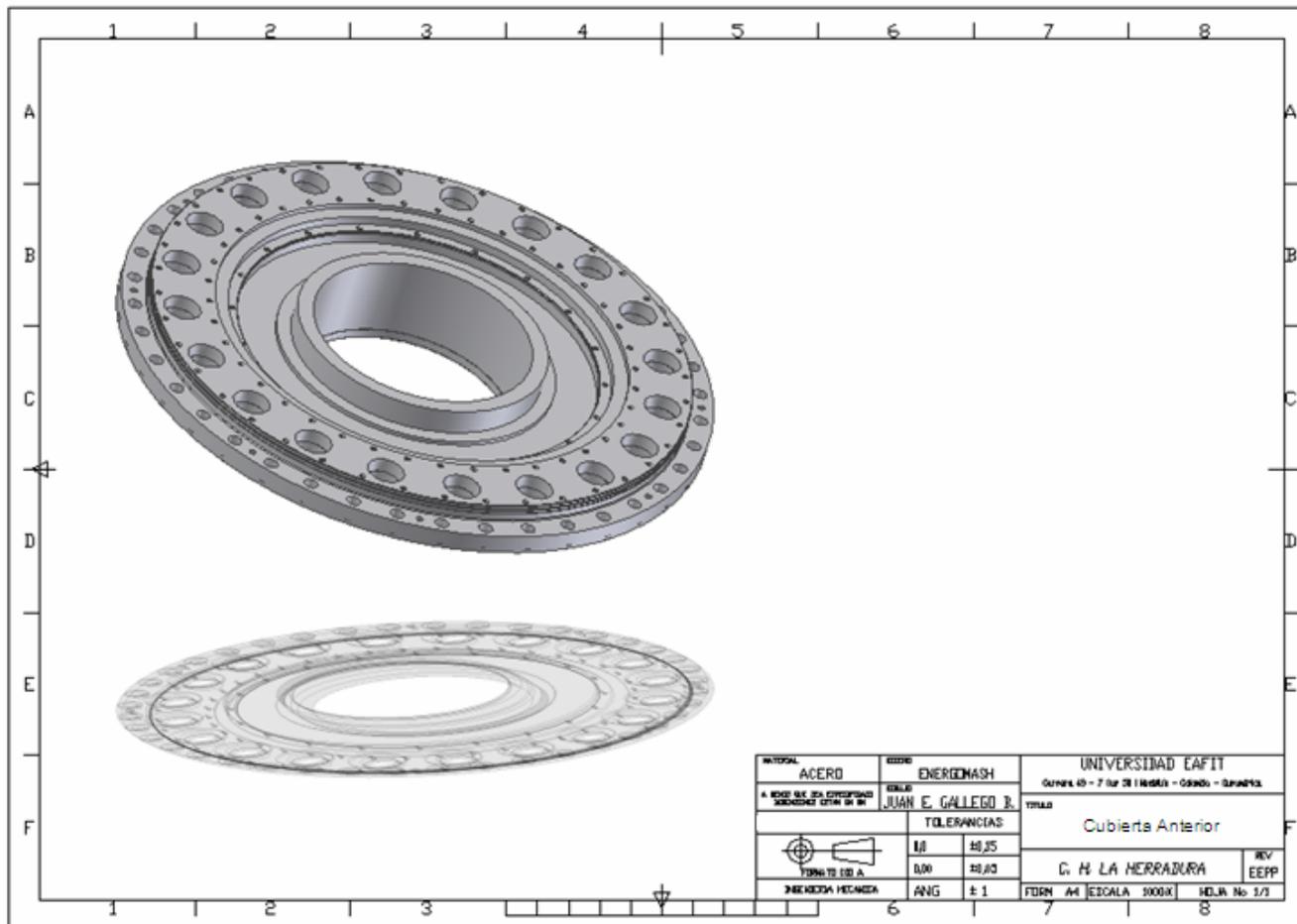


Figura 27. 03201.2205.51.02.000 CG – (Cubierta Posterior)

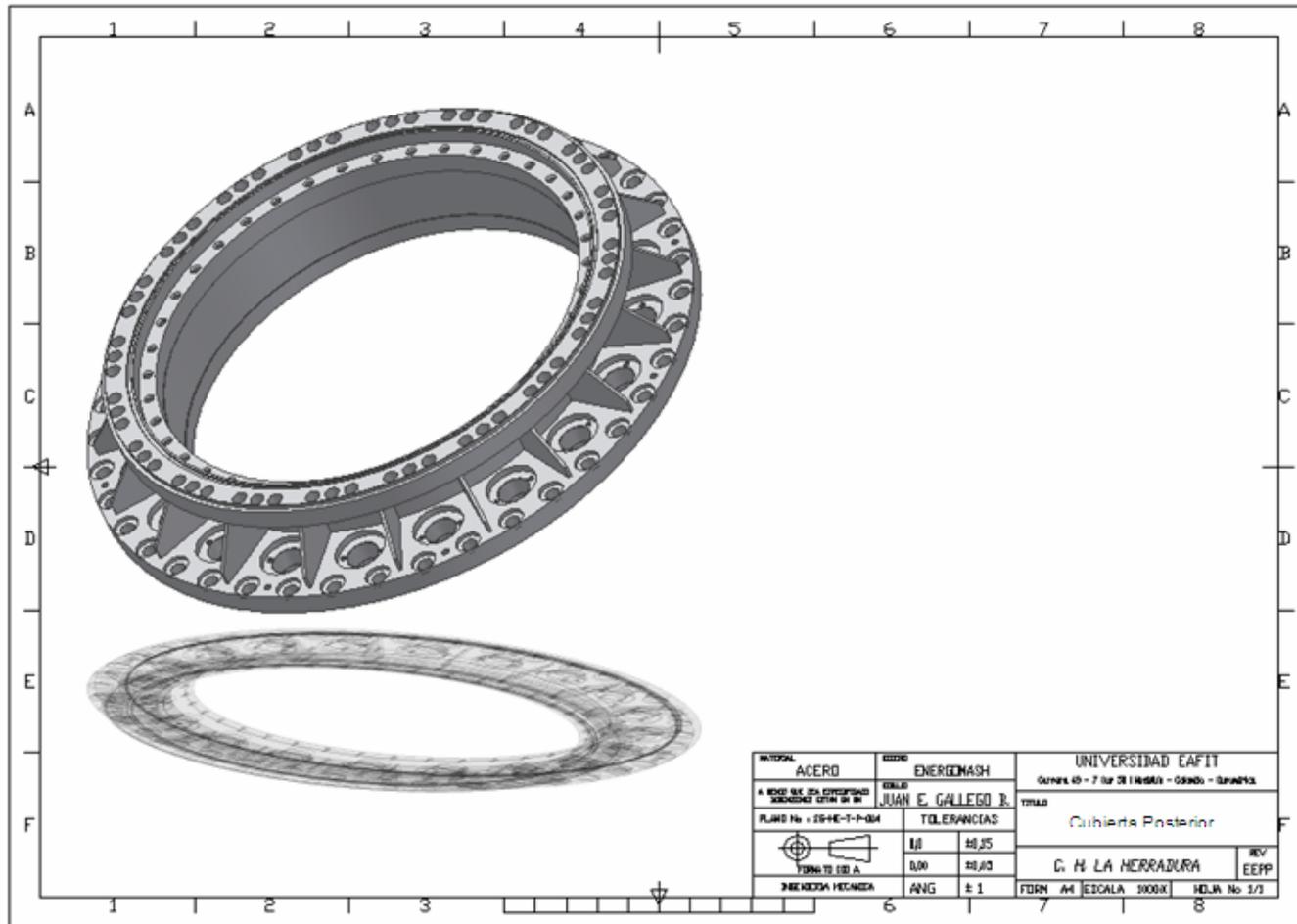


Figura 28. 03201.2205.51.00.003A (Link)

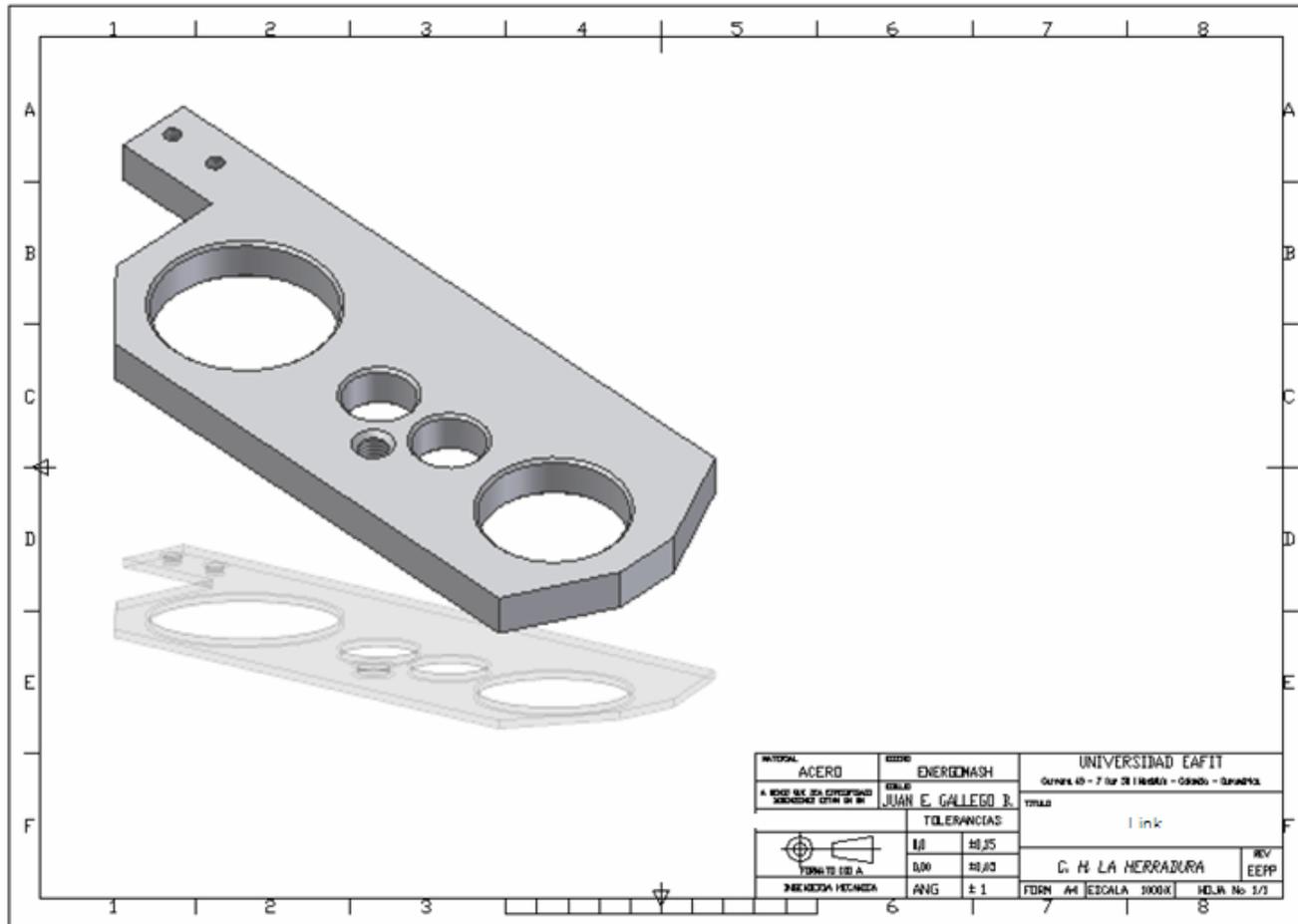


Figura 29. 03201_2205_51_00_006A (Lever)

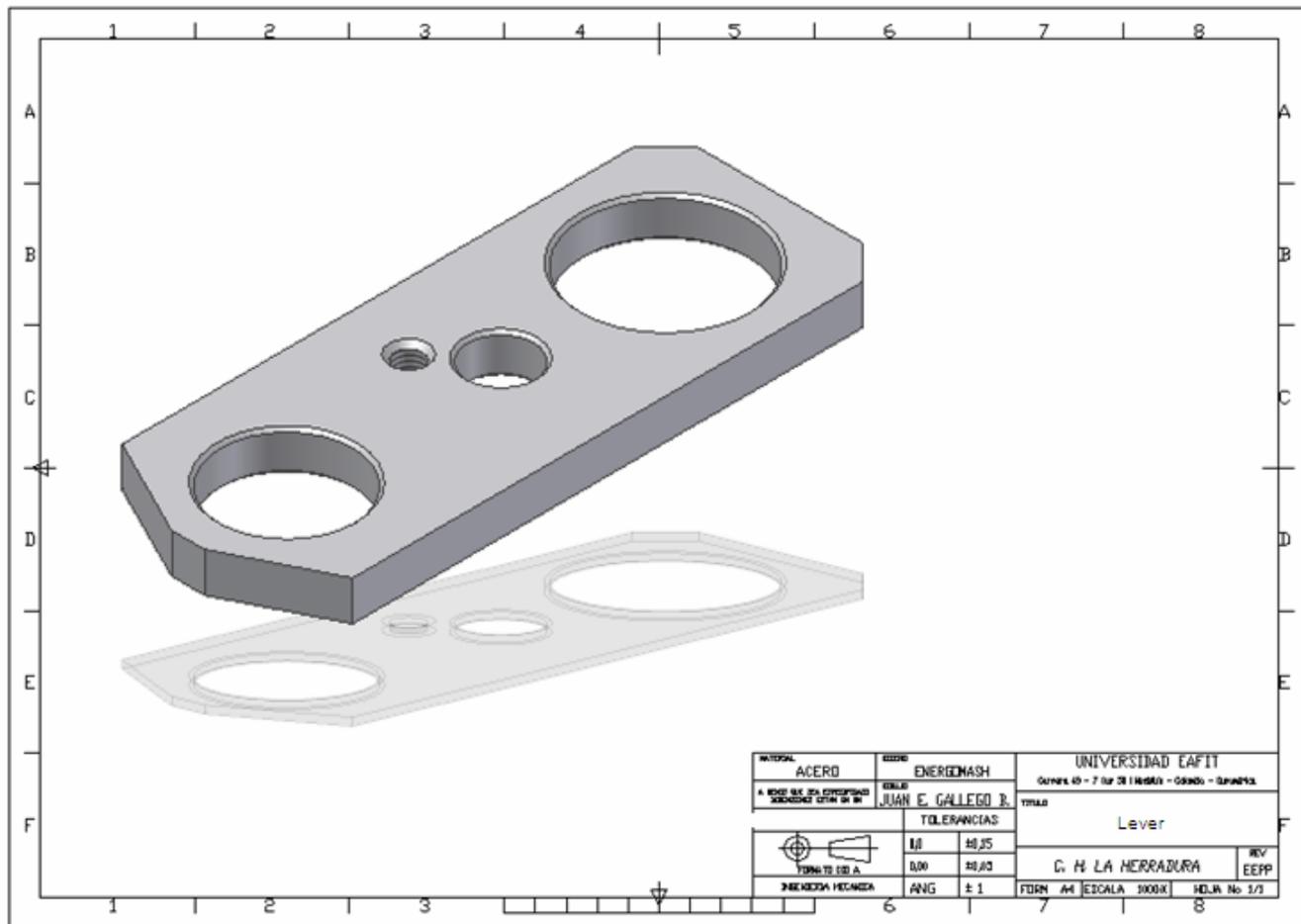


Figura 30. 03201_2205_51_00_011A (Lever Plate)

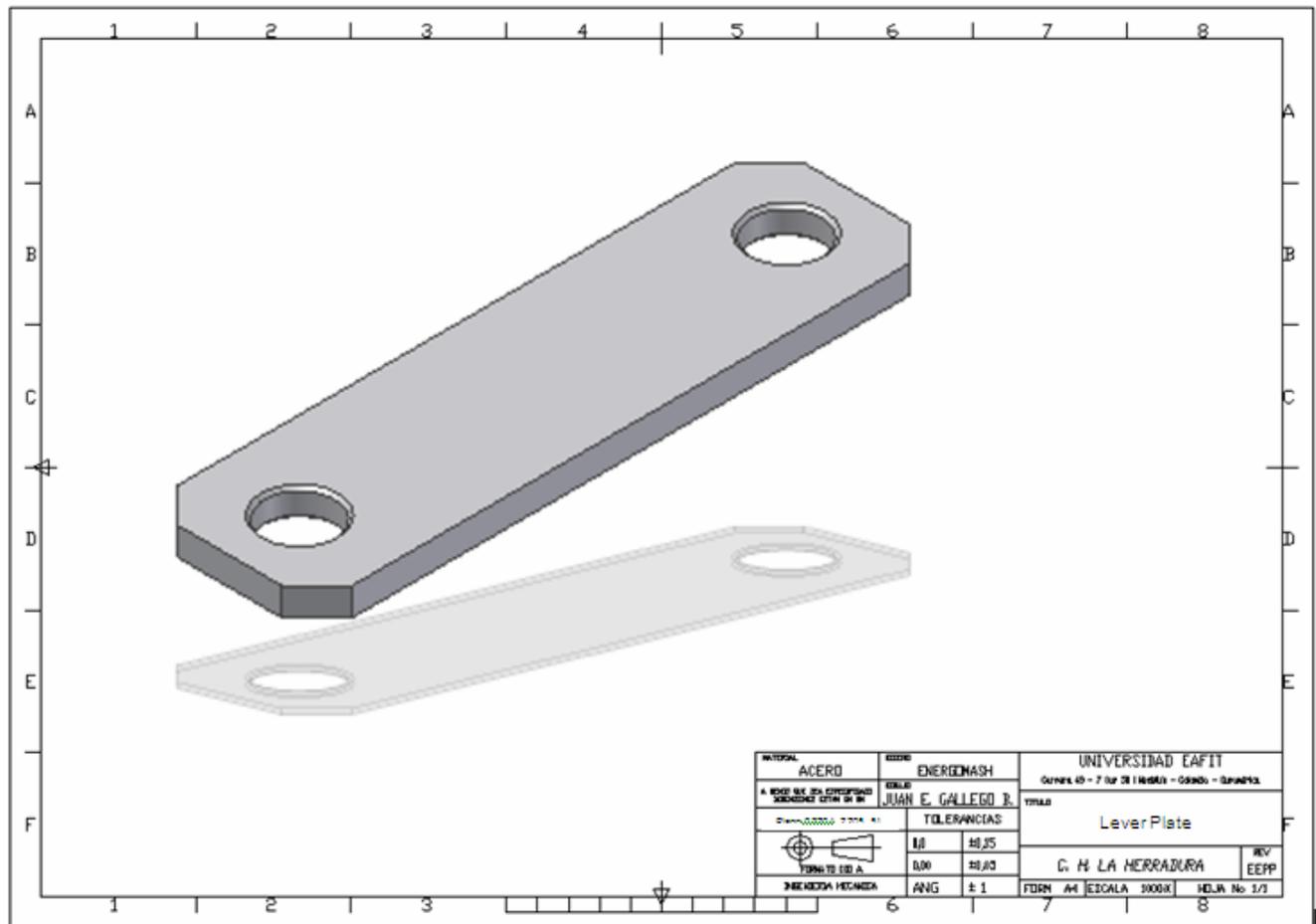


Figura 31. 03201_2205_51_00_012A (Lever Plate)

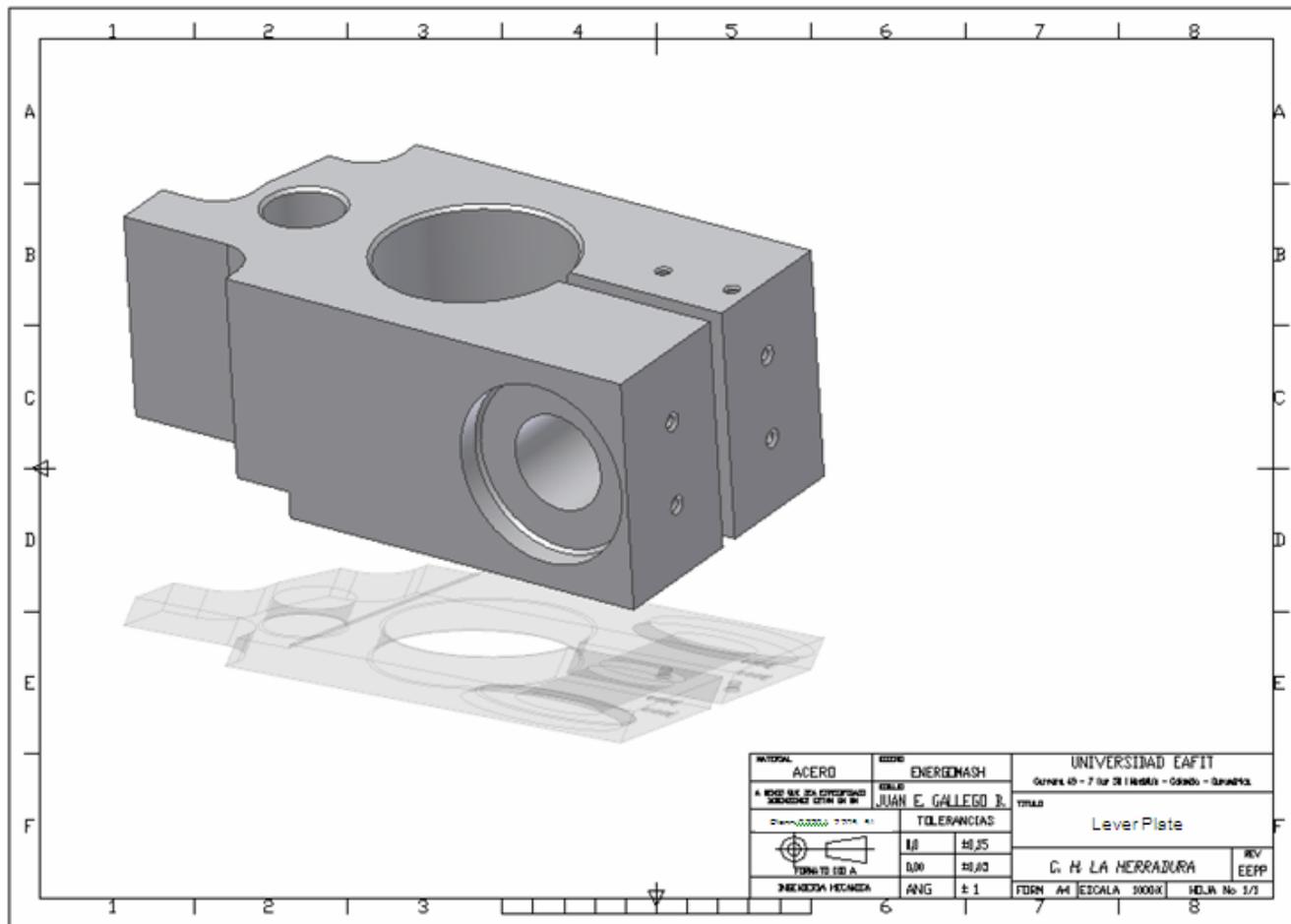
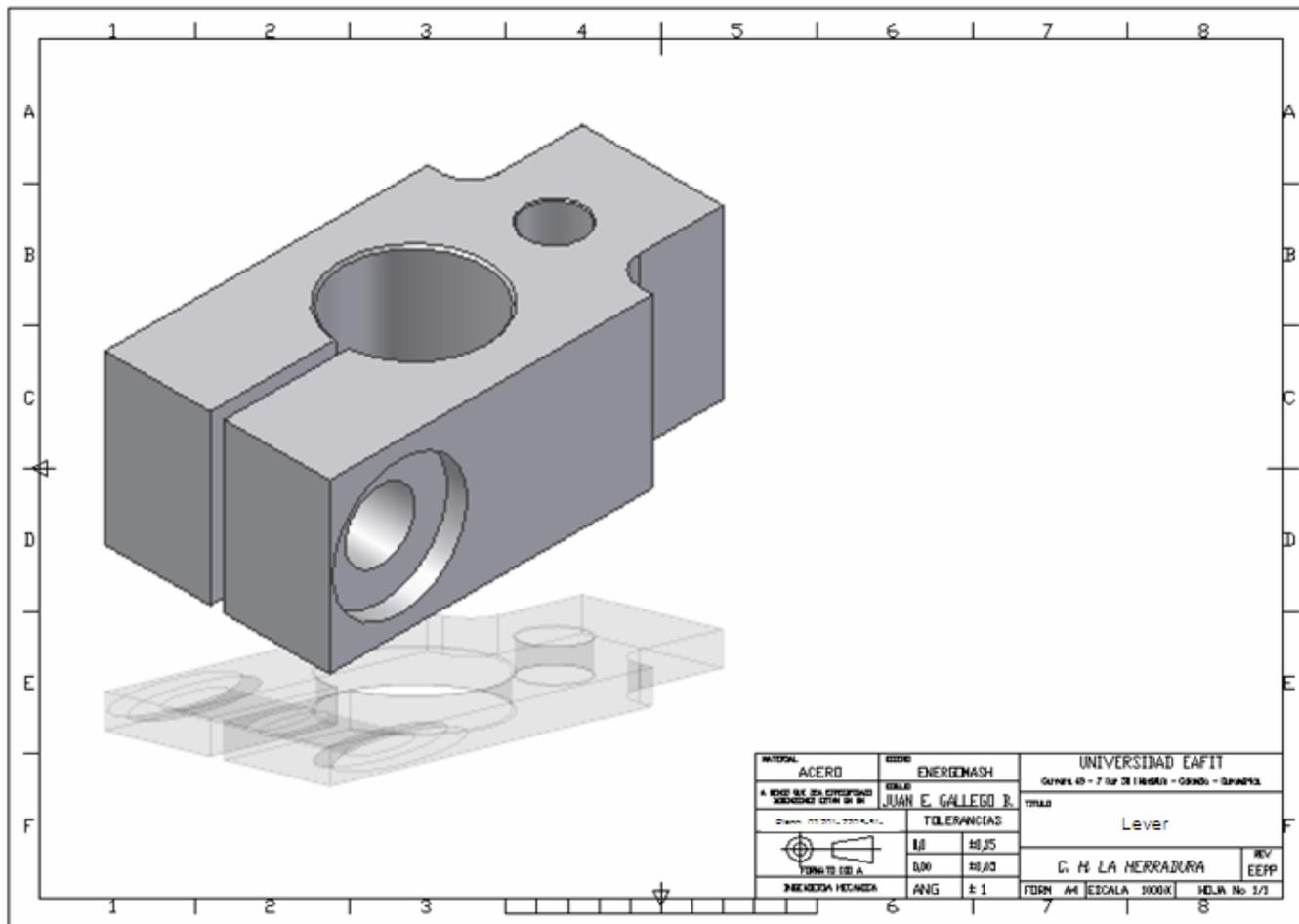


Figura 32. 03201_2205_51_00_013A (Lever)



9. BIBLIOGRAFÍA

9.1 CLÁSICA

CONSORCIO ESGEM & Energomash. 090314619. Oferta para suministro de los equipos electromecánicos y servicio de supervisión de montaje requeridos para las centrales hidroeléctricas "La Vuelta y La Herradura". Tomos 1 y 2. Archivo de generación de energía EEPP.

DOUNCE Villanueva, Enrique – *La productividad en el mantenimiento industrial* – Compañía Editorial Continental, SA de CV. Segunda Edición – México, DF – México – 1998 – ISBN: 968-26-1089-3

DUFFUAA, S.O. – Ben-Daya, S – Maintenance and quality: the mission link. – Journal of Quality in Maintenance Engineering – Volumen 1 Número 1 – 1995 – West Yorkshire – England – ISSN: 1355-2511

E. Martins, Marcelo. Cuidado y mantenimiento de sistemas de lubricación de turbinas. Consejo 030. Lubricadores y Especialistas ExxonMobil. 2006

ESCALER, Xavier, EGUSQUIZA, Eduard, FARHAT, Mohamed, AVELLAN, François; " Cavitation erosion prediction in hydro turbines from onboard vibrations", Proceedings of the 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm, Sweden, June 29 - July 2, 2004

FARHAT, Mohamed, BOURDON, Paul, LAVIGNE, Pierre; "Some Hydro Quebec Experiences on the Vibratory Approach for Cavitation Monitoring ". In Proceedings of Modelling, Testing and Monitoring for Hydro Powerplants-II Conference and Exhibition, Lausanne, 8-11 July 1996, pp. 151-161

GÜLICH JF, Eichhorn G, Eberl J, Frei A, "Rotor dynamic and thermal deformation tests of high-speed boiler feedpumps" EPRI Report GS-7405, July 1991

KAYE, Mike, DUPONT, Philippe, Cavitation Erosion monitoring of a Prototype Francis Turbine by Vibration Analysis, Proceedings of the third international Symposium on Cavitation, Grenoble, France, 7-10 avril 1998, vol. 2, pp. 129-134

KAYE, Mike. Cavitation Monitoring of Hydraulic Machines by Vibration Analysis. Ph.D. Thesis. November 1999. LMH (Laboratoire de Machines Hydrauliques).

KAYE, Mike, FARHAT, Mohamed; "Classification Of Cavitation In Hydraulic Machines Using Vibration Analysis". Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, Switzerland, 9-12 September 2002

KELLY, Anthony. y Harris, M. J. - Gestión del mantenimiento industrial – Editorial Fundación REPSOL Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar – Traducido por Gerardo Álvarez Cuervo y equipo de trabajo – Madrid – España – 1998 – ISBN: 84-923506-0-1 – Traducido de Management Industrial Maintenance Soft. – Edit. Butterworth-Heinemann - USA – April 1983 – ISBN: 040801377X

Manual De Operación SG-HE-T-MA-003. Turbina Hidráulica Tipo Francis. Central Hidroeléctrica la Herradura. Energomash (UK) LTD. Departamento de Hidro-maquinaria.

MARTINS, Marcelo E. Análisis de aceite de turbinas. Consejo 031. lubricadores y Especialistas ExxonMobil. 2006.

MCKENNA, P, Kevin. Turbinas y su lubricación. The Engineered Difference. ExxonMobil. Primavera 2001

MORA Gutiérrez, Alberto – Mantenimiento Estratégico Para Empresas De Servicios Y/O Industriales. – Ph.D. En Ingeniería – Medellín – Colombia – 2005 ISBN 958-33-8228-3

S.C. Li (Ed.), Cavitation of Hydraulic Machinery, vol. 1, Imperial College Press, London, 2000.

SOURÍS, Jean Paul – El mantenimiento: fuente de beneficios – traducido por Diorki, S.A. Madrid de la obra original La maintenance, source de profits – ISBN: 2-7081-1136-1 – Editado e francés en 1990 - Les éditions d'organisations – Edición en español por Editorial Díaz de Santos, S.A. – Madrid – España – 1992 – ISBN: 84-7978-021-5

ETSEIB-CPDA. Varios Autores. DEPARTAMENT DE MECÀNICA DE FLUIDS. Cavitació a les Màquines Hidràuliques. Barcelona: ETSEIB-CPDA.

9.2 INTERNET

CARTIF – CAVITACION @ 2006

CARTIF (Centro de Automatización, Robótica, Tecnologías de la Información y de la Fabricación). DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN UN GRUPO HIDROE-LÉCTRICO. Visitado en Mayo 20 de 2006. Disponible en: <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BB07.htm>

CIPRESS @ 2006

Temas Relevantes de Turbinas Francis. Visitado en: Mayo 20 de 2006. Disponible en: <http://cipres.cec.uchile.cl/~gvillarr/francis.html#1>

CORRIENTES INDUCIDAS @ 2006

Corrientes Eddy, Corrientes inducidas. Visitado en septiembre 1 de 2006. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos30/corrientes-eddy/corrientes-eddy.shtml#aplicac>

EFICIENCIA @ 2006

Parámetros que influyen sobre la eficiencia de una turbina. Dr. Raúl Olalde Font. Centro de Estudio de Termoenergética Azucarera (CETA). Facultad de Mecánica. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Visitado en: Mayo 20. Disponible en: de 2006 <http://www.monografias.com/trabajos10/pain/pain.shtml#desa>

EPFL/LMH @ 2002

CLASSIFICATION OF CAVITATION IN HYDRAULIC MACHINES USING VIBRATION ANALYSIS. Proceedings of the XXIst IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems September 9 - 12, 2002, Lausanne. VIPAC Engineers and Scientists, Singapore and Swiss Federal Institute of Technology/ LMH, Lausanne, Switzerland. Visitado en Julio 4 de 2006. Disponible en: <http://lmhwww.epfl.ch/> (Publications).

EPFL/LMH – C. Monitoring @ 1994

Contribution To The Cavitation Erosion Study: Hydrodynamic Mechanisms and Prediction. laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza. Visitado en Junio 06 de 2006. Disponible en: <http://lmhwww.epfl.ch/> (Publications)

EPFL/LMH – C. Monitoring @ 2006

Cavitation Monitoring in Hydraulic Machines. laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza. The Vibratory Approach For Cavitation Monitoring. Visitado en Junio 06 de 2006. Disponible en: <http://lmhwww.epfl.ch/> (Publications)

EPFL/LMH – F.T Stability @ 1993

Evaluation On A Scale Model And Prediction Of The Stability Of Operation Of Francis Turbines. laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza Thierry JACOB Ph.D. Thesis No 1146, EPFL, 1993 Abstract. Disponible en: <http://lmhwww.epfl.ch/> (Research)

EPFL/LMH – F.T Stability @ 2006

STABILITY OF FRANCIS TURBINE. laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza. Visitado en Junio 06 de 2006. Disponible en: <http://lmhwww.epfl.ch/> (Research)

EPFL/LMH – L.E. Cavitation @ 2003

Physical Study of a Leading Edge Cavity Detachment. laboratorio de máquinas Hidráulicas (LMF) de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), Suiza. Visitado en Junio 06 de 2006. Disponible en: <http://lmhwww.epfl.ch/> (Publications)

EPFL/LMH - UPC @ 2004

Cavitation erosion prediction in hydro turbines from onboard vibrations. 22 IAHR symposium on hydraulic machinery and systems June 29 – July 2, 2004 Stockholm Sweden. Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL). Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Visitado en Julio 4 de 2006. Disponible en: <http://lmhwww.epfl.ch/> (Publications)

CARTIF – CAVITACION @ 2006

CARTIF (Centro de Automatización, Robótica, Tecnologías de la Información y de la Fabricación). DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN UN GRUPO HIDROELECTRICO. Visitado en Mayo 20 de 2006. Disponible en: <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BB07.htm>

JOURNAL – CAVITATION @ 1998

JOURNAL ARTICLES BY FLUENT SOFTWARE USERS. Simulation Creates Potential \$5 Million Revenue Gain from Hydropower Turbines. By Bernard Massé, Hydraulic Machines Team Leader Hydro-Québec Institute of Research, Varennes, Québec, CANADA. Visitado en agosto 8 de 2006. Disponible en: <http://www.fluent.com/solutions/articles/ja101.pdf>

OXFORD UNIVERSITY – CAVITACION @ 1995

Cavitation And Bubble Dynamics. Christopher Earls Brennen. Oxford University. Capítulos 3, 6 y 7 Visitado en Julio 4 de 2006. Disponible en: <http://caltechbook.library.caltech.edu/1/04/content.htm>

RODETE FRANCIS @ 2006

Figura Rodete Francis. Visitado en Julio de 2006. Disponible en: <http://membres.lycos.fr/alexis779/exploitation.htm>

RUEDA PELTON @ 2006

Figura Rueda Pelton. Visitado en Julio de 2006. Disponible en: <http://membres.lycos.fr/alexis779/exploitation.htm>

SCIENCE DIRECT – CAVITACION @ 2004

Detection of cavitation in hydraulic turbines. Xavier Escalera, Eduard Egusquiza, Mohamed Farhatb, Franc-ois Avellanb, Miguel Coussirata. LMH-IMHEF, EPFL – UPC. Visitado en Agosto 1 de 2006. Disponible en: www.sciencedirect.com

SCOPUS – FAILUREANALYSIS @1999

Failure analysis of hydro-generator thrust bearing. Department of Mechanical Engineering, University of Zimbabwe, Visitado en Agosto 1 de 2006 Disponible en: www.scopus.com

SCOPUS – TURBINA @1999

Main Dimensions. 6-20-20Francis-20Turbine, Visitado en Agosto 15 de 2006 Disponible en: www.scopus.com

UNESP/FEIS – CAVITACION @ 2006

Monitorización Y Diagnostico Del Estado De Los Grupos Hidroeléctricos Por Análisis De Las Vibraciones. Grupo de trabajo sobre hidromecanica. Quinta reunion Montevideo Uruguay 11 a 14 de Mayo de 1999. Brazil. Visitado en junio 21 de 2006.

U OF MINNESOTA – CAVITACION @ 2006

Cavitation Tutorial. University Of Minnesota. St. Anthony Falls Laboratory (SAFL). Visitado en Agosto 8 de 2006. Disponible en: <http://cav.safl.umn.edu/tutorial/index.htm>

UPC – CAVITACION @ 2004

Biblioteca tecnica. Detección de cavitación en turbina Francis. Pedro Ayuso, Jorge-Mauro de. Tesis Ingeniería Industrial. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) 2004. Visitado en Mayo 20 de 2006 Disponible en: http://biblioteca.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=31091http://ibiblioteca.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=31091

UNCOMA – EQUIPOS @

Equipos Electromecánicos De La Casa De Máquinas, Toma, Vertedero Y Descargador De Fondo. Visitado en Junio 21 de 2006 Disponible en: <http://fain.uncoma.edu.ar/impsat/Modulo%20II%20Equipos%20Electromecanicos.pdf>

TEV.CAP.2@ 2001

Hidropower in Norway. Arne Kjølle. Professor Emeritus. Norwegian University of Science and Technology. Diciembre de 2001. Visitado en Junio 24 de 2006
Disponibile en:

<http://www.tev.ntnu.no/vk/publikasjoner/pdf/ArneKjolle/chapter2.pdf>

TEV.CAP.7@ 2001

Hidropower in Norway. Arne Kjølle. Professor Emeritus. Norwegian University of Science and Technology. Diciembre de 2001. Visitado en Junio 24 de 2006
Disponibile en:

<http://www.tev.ntnu.no/vk/publikasjoner/pdf/ArneKjolle/chapter7.pdf>

TEV.CAP.14@ 2001

Hidropower in Norway. Arne Kjølle. Professor Emeritus. Norwegian University of Science and Technology. Diciembre de 2001. Visitado en Junio 24 de 2006
Disponibile en:

<http://www.tev.ntnu.no/vk/publikasjoner/pdf/ArneKjolle/chapter14.pdf>

Wikipedia @ 2006

Definición de Turbina. Visitado en: julio 19 de 2006. Disponible en:
es.wikipedia.org/wiki/Turbina