

Resumen

En el presente proyecto se pretenden aplicar y validar diversas técnicas de detección de cavitación, prestando especial atención a los fenómenos de cavitación erosiva, pues son estos los que mayor impacto pueden tener –en términos de reducción de la vida útil– sobre las turbinas hidráulicas.

Tras una introducción teórica sobre el fenómeno de la cavitación en turbinas hidráulicas, se hace un breve recorrido por el estado del arte. A continuación, se presentan una serie de mediciones experimentales realizadas en un modelo a escala reducida de turbina hidráulica, que consisten en el registro de vibraciones remotas en el cojinete del modelo y de presiones en la cámara espiral y el tubo de aspiración.

Previamente se justifican tanto los puntos de medición escogidos como los regímenes de funcionamiento ensayados, que consisten en una situación sin cavitación y en varias situaciones con diferentes tipos de cavitación.

Dicha información se trata con las técnicas de detección de cavitación actuales mediante un paquete informático adhoc. Los resultados de los análisis de las señales nos permiten exponer una serie de conclusiones relativas a la bondad de dichas técnicas: aquellos tipos de cavitación más agresivos, la fiabilidad del instrumental empleado de cara a detectar tipos de cavitación particulares, posibles patrones de sesgo...

A tal efecto se discuten los resultados mediante comparaciones, gráficas y tablas, y se elabora un presupuesto final donde –además del indispensable report del coste experimental propiamente dicho– se destaque la capital importancia –y no sólo en términos económicos– de implementar estas técnicas de detección en instalaciones que pueden resultar críticas para el suministro energético de países enteros.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. NOMENCLATURA	7
2. PREFACIO	9
2.1. Origen del proyecto	9
3. INTRODUCCIÓN	11
3.1. Objetivos del proyecto	11
3.2. Alcance del proyecto.....	11
4. GENERALIDADES SOBRE TURBINAS HIDRÁULICAS	13
4.1. Definición	13
4.2. Clasificación	13
4.3. Generalidades sobre turbinas hidráulicas tipo Francis. Aplicación.....	14
4.3.1. Un poco de historia. Generalidades constructivas	14
4.3.2. Elementos principales	15
4.3.3. Funcionamiento.....	17
4.3.4. Margen de funcionamiento	19
5. CAVITACIÓN EN MÁQUINAS HIDRÁULICAS	21
5.1. Definición del fenómeno	21
5.1.1. ¿Qué es la cavitación?.....	22
5.1.2. Aparición de la cavitación.....	22
5.1.3. Fases del fenómeno de la cavitación.....	24
5.2. Tipos de cavitación en turbinas Francis	25
5.2.1. Cavitación que depende de σ	28
5.2.2. Cavitación que no depende de σ	28
5.2.3. Otros tipos de cavitación.....	29
5.3. Consecuencias en máquinas hidráulicas.....	30
5.4. Estado del arte	30
5.4.1. Artículo I: “Cavitation detection in a Francis turbine”.....	31
5.4.2. Artículo II: “Field assessment of cavitation detection methods in hydropower plants”.....	32
5.4.3. Artículo III: “Cavitation detection and erosion prediction in hydro turbines”.....	33



5.4.4.	Artículo IV: “Cavitation erosion prediction on Francis turbines. Part 2. Model tests and flow analysis”	34
5.5.	Comentario a la bibliografía	35
6.	ADQUISICIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS	37
6.1.	Descripción del instrumental empleado	37
6.2.	Medidas.....	39
6.3.	Acerca de Lab_View	40
6.4.	Ubicación de los captadores de presión y aceleración.....	42
6.5.	Justificación regímenes de funcionamiento ensayados.	42
7.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	45
7.1.	Características del modelo empleado.....	45
8.	DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS	47
8.1.	Espectro de potencia (power spectrum)	47
8.2.	La técnica de demodulación en amplitud	47
8.3.	La función de transferencia y la coherencia	49
8.3.1.	Función de transferencia.....	49
8.3.2.	Coherencia	50
8.4.	Tiempo-frecuencia	50
9.	RESULTADOS	51
9.1.	Estudio de la alta frecuencia.....	52
9.1.1.	Vibración radial en cojinete (A1).....	54
9.1.2.	Vibración axial en cojinete (A2)	56
9.1.3.	Presiones en cámara espiral (P1, P2).....	58
9.1.4.	Presiones en tubería forzada (P3, P4)	60
9.1.5.	Comparativa de todos los puntos de funcionamiento medidos con el acelerómetro A1	62
9.1.6.	Comparativa de todos los puntos de funcionamiento medidos con el acelerómetro A2	63
9.1.7.	Comparativa de todos los puntos de funcionamiento medidos con los captadores de presión P3 y P4.....	64
9.1.8.	Comparación amplitudes de los espectros	66
9.2.	Aplicación técnicas de demodulación.....	71
9.2.1.	Punto de funcionamiento con cavitación de salida + Von Karman	71
9.2.2.	Punto de funcionamiento con cavitación de burbuja	74
9.2.3.	Otros puntos de funcionamiento.....	76
9.3.	Estudio de las envolventes.....	78



9.4. Coherencia.....	88
9.5. Tiempo-frecuencia	92
10. DISCUSIÓN	97
10.1. Estudio para las altas frecuencias	97
10.2. Estudio para la demodulación	99
10.3. Estudio de la coherencia.....	100
10.4. Estudio de las envolventes.....	101
10.5. Tiempo-frecuencia	101
CONCLUSIONES	103
PRESUPUESTO	105
AGRADECIMIENTOS	107
BIBLIOGRAFÍA	109
Referencias bibliográficas.....	109
Otras referencias bibliográficas.....	109
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS	111

ANEXOS

A. EL CASO GURI: ANÁLISIS DE LOS COSTES

B. REPRESENTACIONES GRÁFICAS

- B.1. Gráficas para las altas frecuencias
- B.2. Ampliaciones (algunas gráficas al detalle)
- B.3. Gráficas para la demodulación
- B.4. Gráficas para las envolventes





1. Nomenclatura

α	ángulo de incidencia	[°]
f_b	frecuencia de paso de álabes	[Hz]
f_f	frecuencia fundamental	[Hz]
f_v	frecuencia de paso de directrices	[Hz]
FFT	transformada de Fourier	
$h(t)$	señal de respuesta al impulso	[-]
H	salto neto	[m]
H_a	altura barométrica	[m]
$H_{m\acute{a}x}$	salto máximo	[m]
$H_{m\acute{i}n}$	salto mínimo	[m]
H_n	salto neto	[m]
H_{nom}	salto nominal	[m]
h_s	altura de aspiración	[m]
h_v	altura de vapor	[m]
$H(f)$	función de respuesta frecuencial	[-]
n_s	velocidad específica	[rpm]
P_m	potencia	[kW]
P_v	presión de vapor	[Pa]
Q	caudal	[m ³ / s]
T_{rodete}	período de giro del rodete	[s]



\dot{u}	velocidad de rodete	[rpm]
$x(t)$	señal de entrada	[-]
$y(t)$	señal de salida	[-]
σ	coeficiente de cavitación de Thoma	[-]
Z_b	número de álabes	[-]
Z_v	número de directrices	[-]



2. Prefacio

Como antesala a la introducción y definición de objetivos, se expone el origen de la problemática –circunstancias históricas incluidas- y su relación con otros trabajos de investigación elaborados en el último trienio; concretamente, una serie de artículos que ponen de manifiesto el interés que desde siempre ha suscitado el conocimiento de las causas que conducen a la cavitación (ver final del capítulo 5).

2.1. Origen del proyecto

El estudiar la cavitación y sus consecuencias es y seguirá siendo una necesidad de primer orden en el diseño y la explotación de máquinas hidráulicas.

Los grupos hidroeléctricos durante su funcionamiento soportan excitaciones dinámicas de origen hidráulico, mecánico y eléctrico que inducen vibraciones y establecen 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 de modo anómalo. Si dicha anomalía no es corregida, los daños evolucionan hasta llegar a provocar su completa indisponibilidad, bien por no ofrecer las prestaciones para las que ha sido diseñada, bien por la rotura 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.

La búsqueda incansable del óptimo para niveles de potencia particulares responde a una paradoja estructural ya clásica. Con el objetivo de reducir el peso (o simple y llanamente, el coste) se tiende a construir turbinas lo más pequeñas posibles. Si queremos seguir desarrollando, con todo, la misma potencia, se impone un aumento en la velocidad de rotación... que puede redundar –por ejemplo- en el desencadenamiento de un problema de cavitación.

Debido a ello se hace patente que los problemas de cavitación –con sus consecuencias negativas- tenderán a incrementarse en el futuro, quedando por lo tanto plenamente justificado el presente proyecto que se basa –precisamente- en la mejora de las técnicas de detección de la cavitación.





3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

El principal objetivo del proyecto es la aplicación y validación de técnicas de detección de cavitación que puede ser o no erosiva mediante métodos no intrusivos de carácter remoto basados en la utilización de acelerómetros y captadores de presión sobre un modelo a escala reducida para su extrapolación al prototipo.

Para ello partiremos de un plan de trabajo (ver capítulo 6) que nos ha de permitir separar mediante dichas técnicas los diferentes tipos de cavitación presentes en una máquina hidráulica, concretamente una turbina. Una vez localizadas y distinguidas, estaremos en condiciones de determinar cuál es la agresividad de los diferentes tipos de cavitación y dónde se detectan mejor. Por último, recopilando resultados y conocimientos adquiridos, intentaremos extrapolar conclusiones relativas al prototipo.

3.2. Alcance del proyecto

Del delicado equilibrio entre minimizar presupuestos y poder controlar la cavitación erosiva, surge la idea de este proyecto. Se trata de validar un conjunto de técnicas que nos informen –con la menor incertidumbre posible- de la posibilidad de que este fenómeno se presente en nuestras turbinas tipo Francis.

Los avances en la tecnología han proporcionado múltiples métodos que permiten la evaluación exterior de las condiciones de funcionamiento de la máquina sin desmontarla e, incluso, sin pararla.

Basándonos en esas medidas y analizando dichas señales, trataremos de formular un diagnóstico de nuestra máquina, valorando también cuán eficaces son los captadores utilizados de cara a la detección de los principales tipos de cavitación.

El estado del arte (apartado obligado y que ayuda a definir el alcance de cualquier proyecto) se hará eco de diversos artículos recientes que comparten temática con este estudio. Su ubicación al término de dos capítulos teóricos previos, los inmediatos cuarto y quinto, responde a la necesidad de favorecer la comprensión de los mismos, evitando así que resulten resúmenes áridos de difícil lectura para los legos en la materia.



Previamente realizaremos una breve descripción de las turbinas y del fenómeno de la cavitación.



4. Generalidades sobre turbinas hidráulicas

4.1. Definición

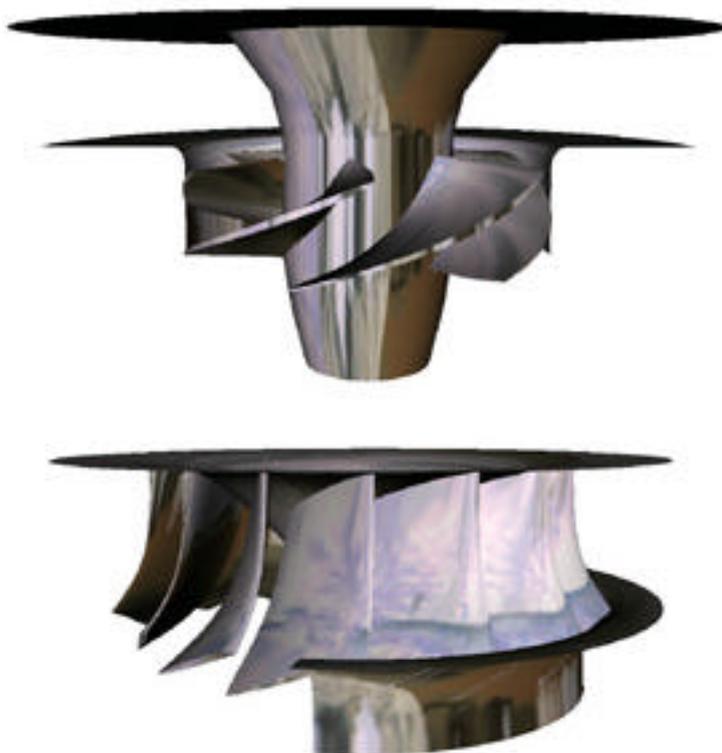
Una turbina es una máquina hidráulica receptora que transforma energía hidráulica en energía mecánica mediante el paso de fluido por su interior.

Dichas máquinas se instalan en centrales hidroeléctricas donde aprovechan la energía acumulada en un salto de agua para generar electricidad a través de un alternador solidario con el eje de la turbina.

4.2. Clasificación

Los parámetros más importantes que establecen el tipo de turbina que debe ser utilizada en una central son el caudal (Q) y el salto (H) disponibles.

Las turbinas se clasifican en dos grupos: turbinas de reacción y turbinas de acción o impulso.



Las turbinas de reacción extraen la potencia de la acción combinada de la energía de presión y la energía cinética del agua. Son de este tipo las turbinas Francis (las más utilizadas) y las Kaplan. Las de impulso obtienen potencia a partir de la energía cinética de uno o más chorros de agua a alta velocidad.

Figura 1 : rodetes de turbina Kaplan (superior) y Francis (inferior).



En este segundo grupo están las turbinas Pelton, que se utilizan únicamente en el caso de saltos muy elevados y caudales relativamente bajos.

Las turbinas Francis se instalan en saltos medianos, entre aproximadamente 30 y 600 metros, y caudales bastante grandes. Finalmente, las turbinas Kaplan son óptimas para saltos muy pequeños y caudales grandes. [2]

4.3. Generalidades sobre turbinas hidráulicas tipo Francis. Aplicación

4.3.1. Un poco de historia. Generalidades constructivas

La primera turbina a reacción que funcionó con éxito fue construida y ensayada en 1849 por el ingeniero norteamericano J.B Francis.

Su concepción aventajó a la de la mayoría de las formas anteriores en las que el flujo se dirigía bajo presión en sentido centrípeto. Con ello, cualquier tendencia a acelerarse quedaba parcialmente contrarrestada por la reducción de flujo que acarrea el aumento de la fuerza centrífuga.



Foto 1: montaje de rodete en central.



En dichas máquinas, la rueda de álabes –nos referiremos a ella a partir de ahora como rodete- presentaba un flujo predominantemente radial, con los mismos radios de entrada y salida para todas las líneas de corriente.

Así que bien pronto surgió la necesidad de conseguir mayores potencias a velocidades más altas. En otras palabras: ¿cómo adaptar un rodete para flujos más caudalosos sin aumentar el diámetro?

La solución pasaba por hacer que el agua siguiera una dirección radial-axial.

El resultado de ello fue el tipo de turbina de flujo mixto que actualmente es el modelo más habitual. Aunque las modernas turbinas de flujo centrípeto guardan poca semejanza con la máquina Francis original, el principio de funcionamiento es esencialmente el mismo y el nombre se ha conservado.

4.3.2. Elementos principales

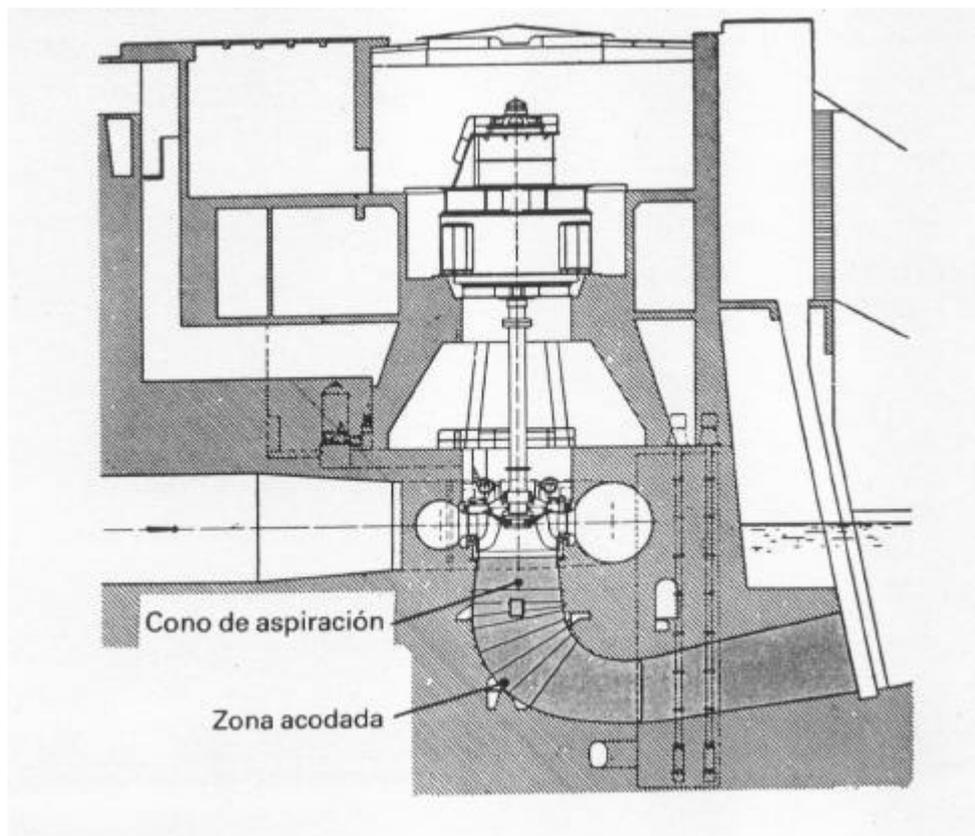
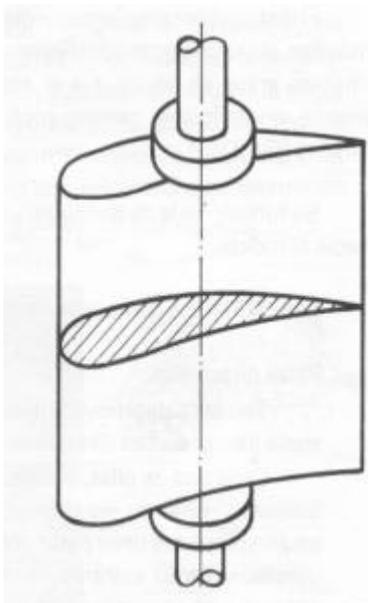


Figura 2: sección transversal de una central hidráulica equipada con una turbina Francis de eje vertical.





Los elementos principales que constituyen una turbina [ver ubicación en Figura 2] son:

- **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 de agua que llega de la cámara espiral y que ha de entrar en el rodete [ver Figura 3].

Figura 3: configuración de una pala directriz.

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.

- **Rodete:** constituido por un cierto número de paletas o álabes. Pasa el agua a su través haciéndolo girar.
- **Tubo de aspiración:** tubería de salida del agua a baja presión.

En turbinas Francis, el agua procedente de la tubería forzada entra radialmente al rodete a través de la cámara espiral y sale del mismo axialmente, por el tubo de aspiración.



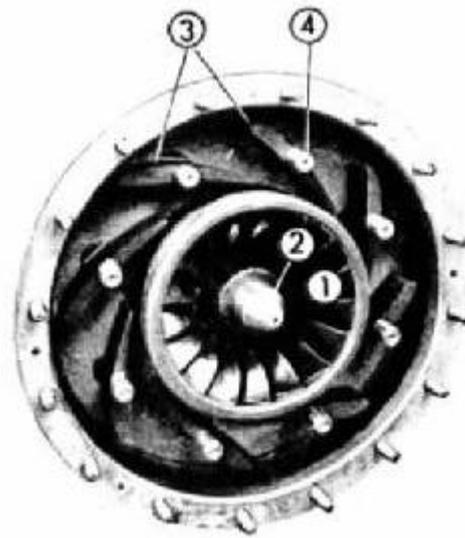


Foto 2: turbina Francis vista desde abajo.

En la *Foto 2*, (1) es el rodete de la turbina, unido al eje (2) de la misma. Las paletas del distribuidor están representadas por (3), y (4) expresa los pivotes sobre los que giran dichas paletas; en la figura, las paletas del distribuidor están casi totalmente abiertas.

4.3.3. Funcionamiento

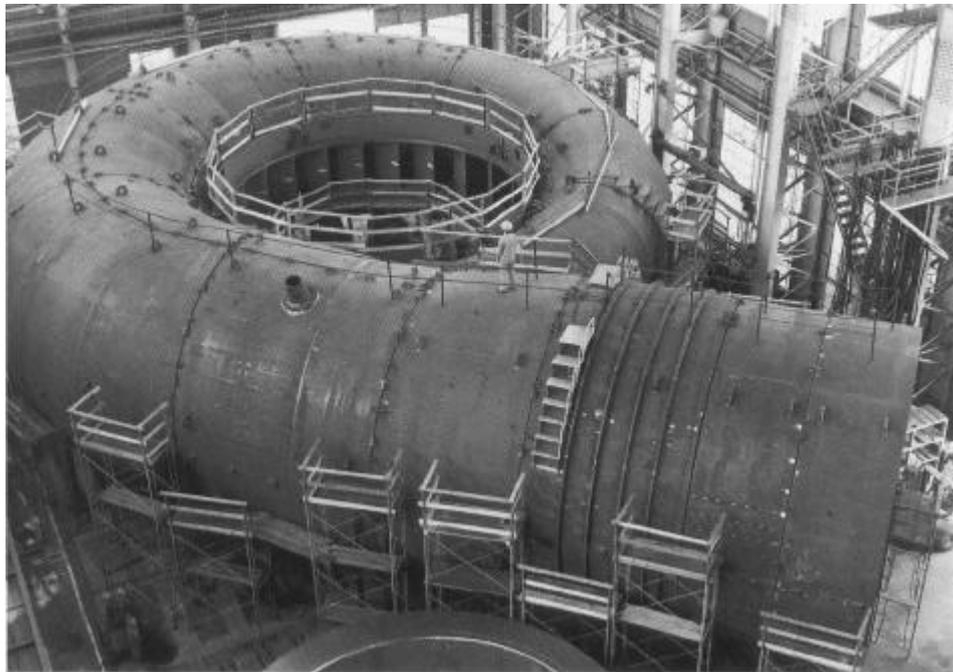


Foto 3 : voluta y predistribuidor con directrices fijas.



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 álabes fijos dispuestos circunferencialmente. Después del predistribuidor el agua pasa por el distribuidor, que tienen los álabes (directrices) móviles y regula el caudal que entra en el rodete.



Figura 4: el dibujo esquemático muestra las directrices en posición abierta (líneas continuas) y en posición cerrada (líneas discontinuas). En esta última posición la extremidad de un álabe se apoya completamente sobre el flanco del anterior, cerrando prácticamente el paso del agua al rodete.

Prestemos ahora especial atención a la función específica que desarrollan las directrices [ver Figura 4].

Ha quedado dicho que el agua se dirige hacia el rodete por medio de una carcasa en espiral y un cierto número de directrices igualmente espaciados en la periferia.

Estas directrices son orientables, de modo que pueden abrir o cerrar completamente el paso del agua hacia el rodete. Su misión es doble:

- encauzar el flujo hacia el rodete con la orientación adecuada para que esté lo mejor conducido a través del álabe.
- 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.

Debido a los problemas (por ejemplo, estanqueidad de las juntas) que plantean las altas presiones y velocidades, existe un límite superior para la altura con la que se puede utilizar este tipo de máquina.



4.3.4. Margen de funcionamiento

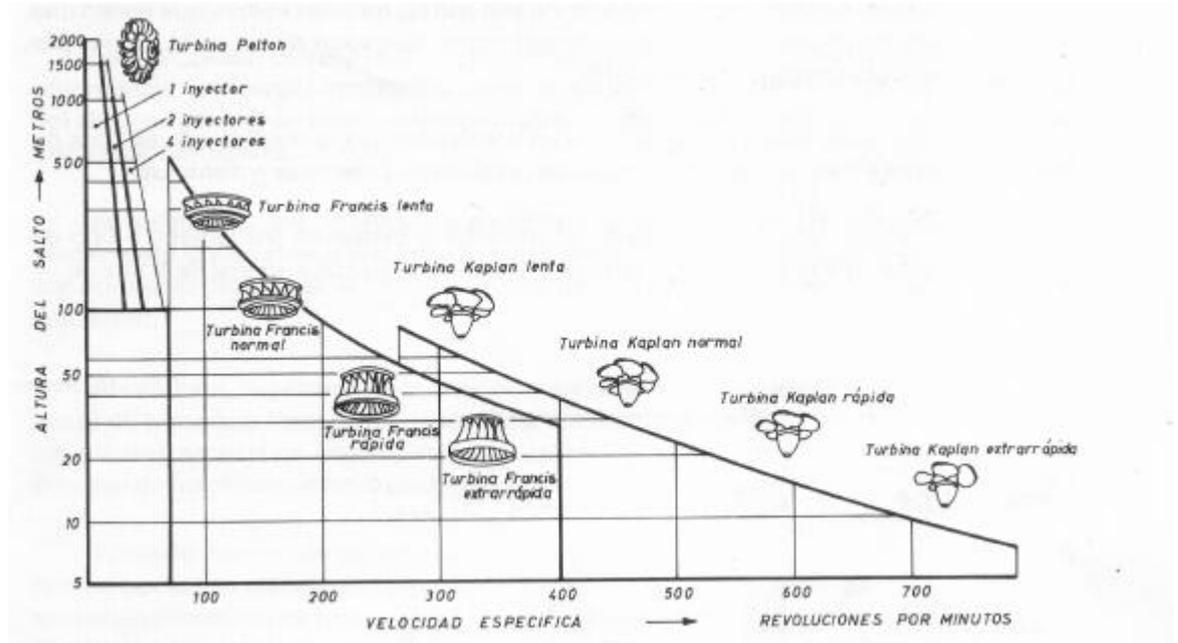


Figura 5: selección de turbinas.

El tipo de turbina más conveniente 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 5*, la turbina tipo Francis se usa en plantas de altura media. Los ejes pueden tener su orientación horizontal ó vertical.

Su utilización es recomendable cuando nos movemos entre los siguientes valores:

- Un salto que puede oscilar entre los 18 - 520 metros
- Caudales medios (de 1 a 700 m³ / s)
- Potencia: 0,1 - 80 MW

(*): una posible definición de la velocidad específica (specific speed) para turbinas hidráulicas es: $n_s = n P_m^{1.25} / (Hn)^{0.75}$ donde n es la velocidad de rotación en [rpm], P_m la potencia en kW y Hn el salto neto en m.





5. Cavitación en máquinas hidráulicas

5.1. Definición del fenómeno

La cavitación es un fenómeno que se debe considerar en el diseño de una gran variedad de máquinas sobre 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 y la erosión de los materiales más cercanos [ver Foto 4].

La formación de 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 modelización y simulación para determinar el posible lugar de aparición de la cavitación.



Desde el punto de vista de utilización, si la cavitación es inevitable, hay que 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. [2]

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.

Foto 4: rodete dañado por cavitación.



5.1.1. ¿Qué es la cavitación?

Una primera definición operativa podría ser la siguiente: la cavitación es la formación y actividad de burbujas (cavidades) en líquidos. La formación, precisamente, de estas cavidades tiene lugar cuando la presión de un líquido baja por debajo de la tensión de vapor (P_v).

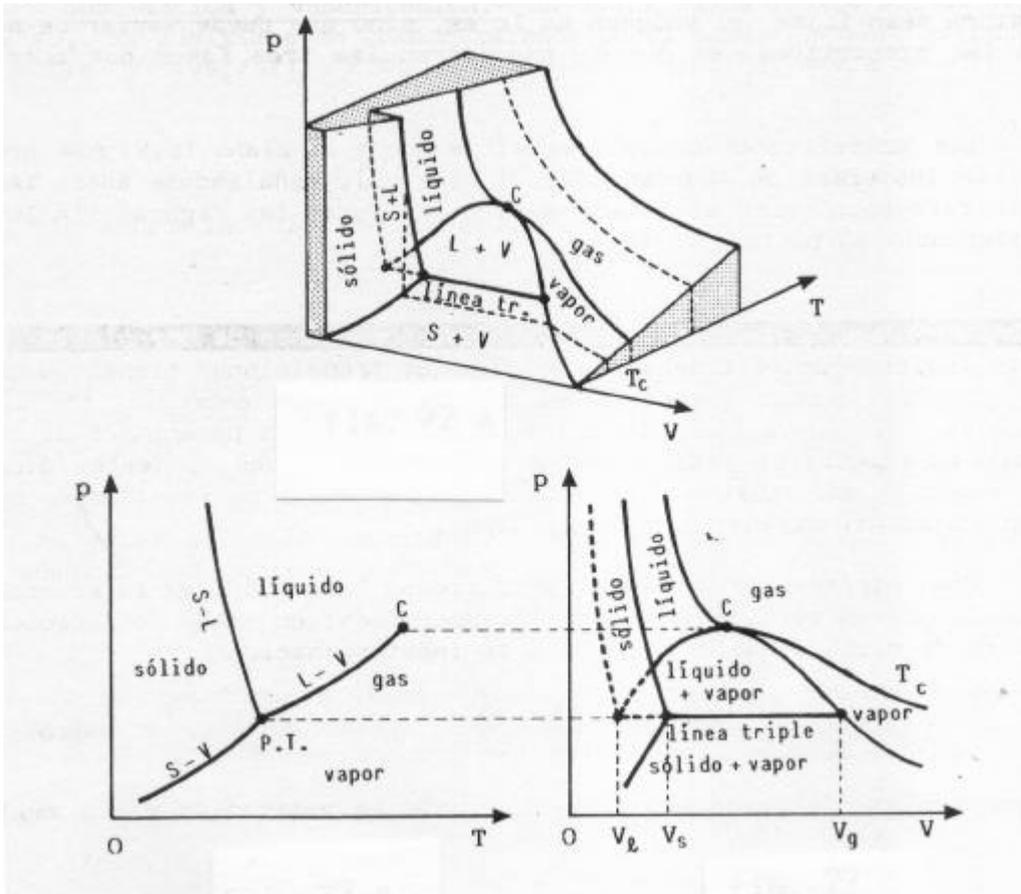


Figura 6: superficie característica de una sustancia que se contrae al fundirse (p. e., el agua) y proyecciones de la superficie característica sobre los planos (T, p) y (p, V).

5.1.2. Aparición de la cavitación

Es bien sabido que si 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. 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.

En definitiva, 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 presiones.

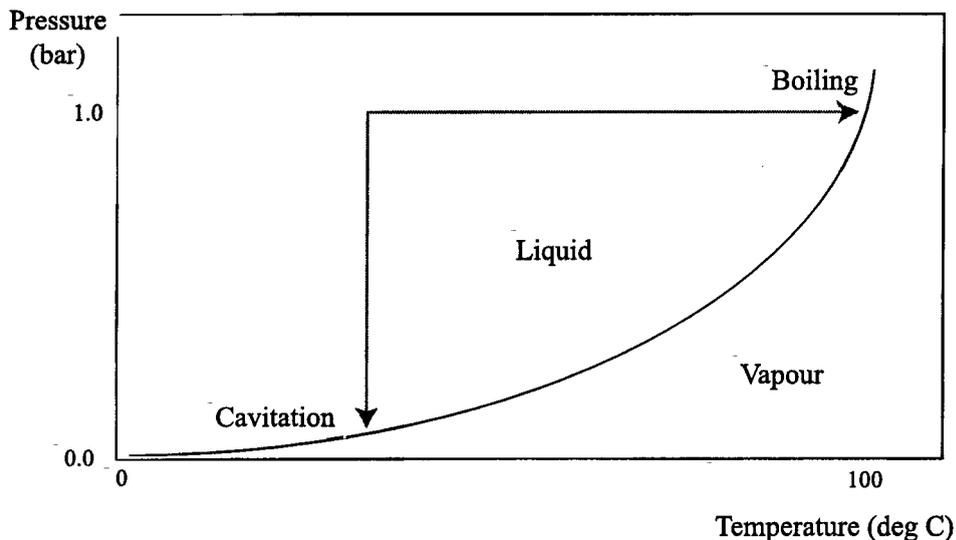


Figura 7: diagrama presión-temperatura.

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.



5.1.3. Fases del fenómeno de la cavitación

En la cavitación se distinguen dos fases:

- La primera se caracteriza por 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...

- La segunda fase consiste en el colapso, 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 martillear 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. [1]

Si el proceso de colapso 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.

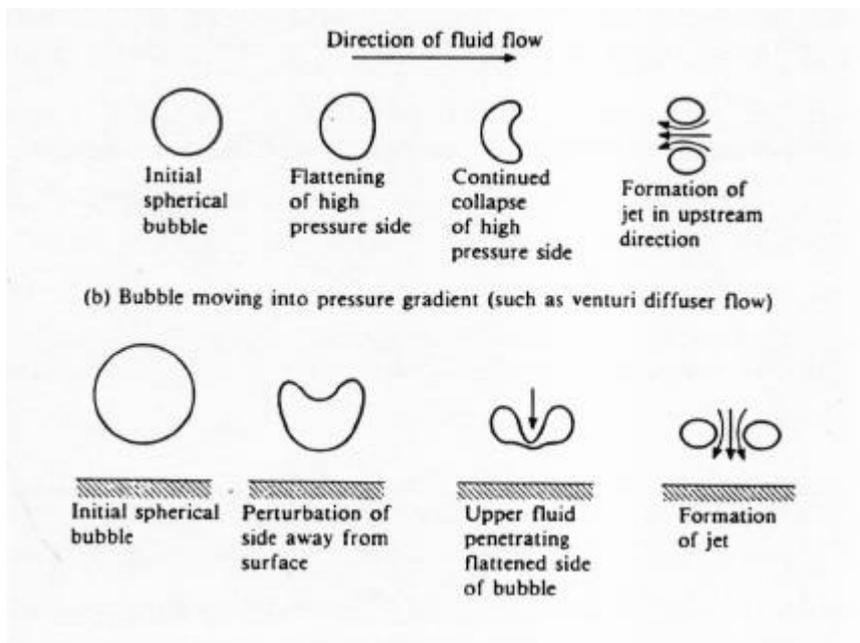


Figura 8: posibles formas de colapso de las burbujas.



En la *figura 8* se ilustran las posibles formas de colapso de las burbujas en un medio infinito y cerca de una pared.

5.2. Tipos de cavitación en turbinas Francis

Son numerosas las posibilidades de clasificación de este fenómeno: 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)...

Otra ordenación más descriptiva y operativa, pues hace referencia directa a la forma en que empíricamente se ha observado que esta sucede, nos habla de cavitación de burbujas separadas (*bubble cavitation*), cavitación de lámina (*sheet cavitation*) o cavitación de vórtice (*vortex cavitation*).

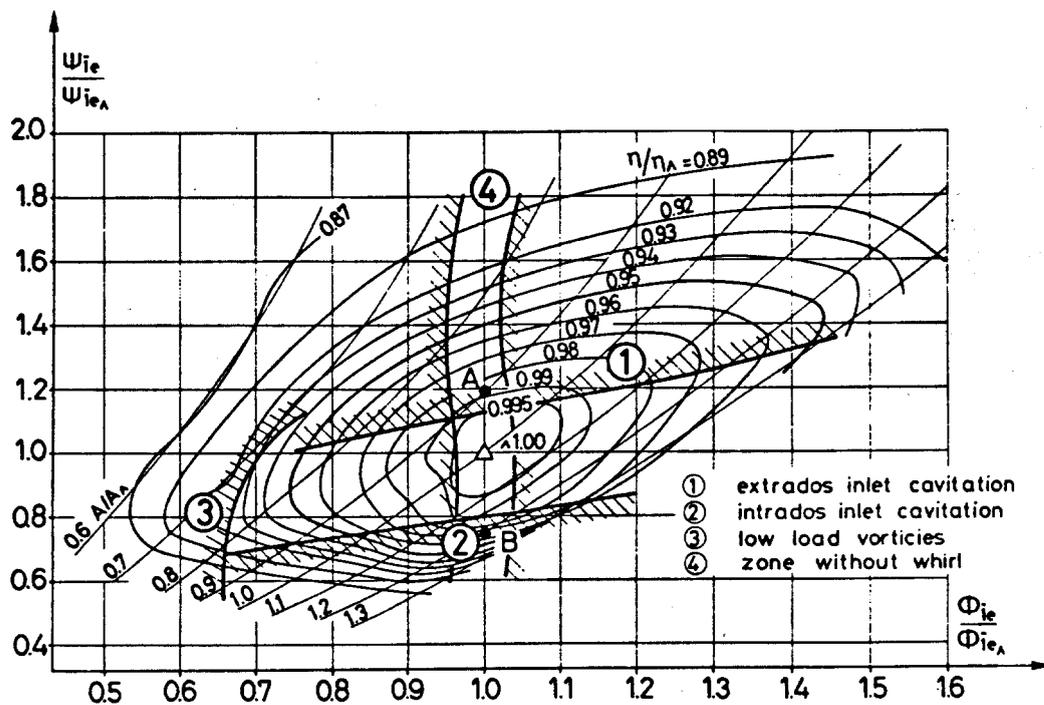


Figura 9: dominios de actuación de los diferentes tipos de cavitación en la playa de funcionamiento de una turbina Francis.

Las posibles 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.



En el caso de las turbinas hidráulicas, la cavitación se caracteriza por un coeficiente adhoc: el de Thoma (σ). Comenzamos, pues, definiéndolo.

$$\sigma = \frac{(H_a - h_s - h_v)}{H} \quad (1)$$

Donde H_a es la altura barométrica, h_s la altura de aspiración, h_v la altura de vapor y H el salto neto [ver Figura 10].

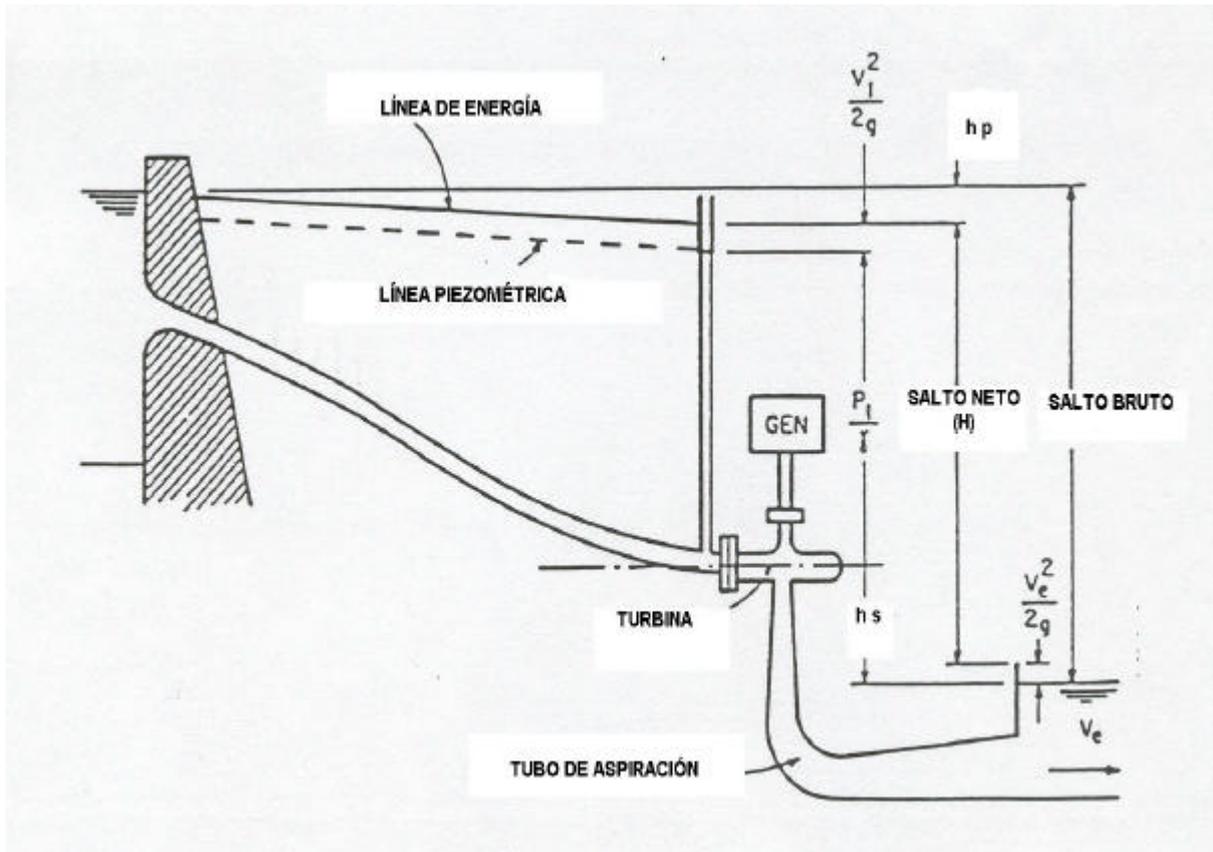


Figura 10: esquema de una instalación hidroeléctrica.

Este coeficiente se puede determinar experimentalmente en bancos de ensayo de laboratorios, utilizando modelos a escala reducida de las turbinas en cuestión. Para ello se considera la σ de cavitación desarrollada (cuando la caída del rendimiento η debida a la cavitación es del 3%). Otros valores que se pueden coger como referencia son la σ incipiente (valor de σ donde detectamos visualmente el comienzo de la cavitación) o la σ crítica (valor más bajo de σ que no presenta variación de η). [Ver Fig. 11]



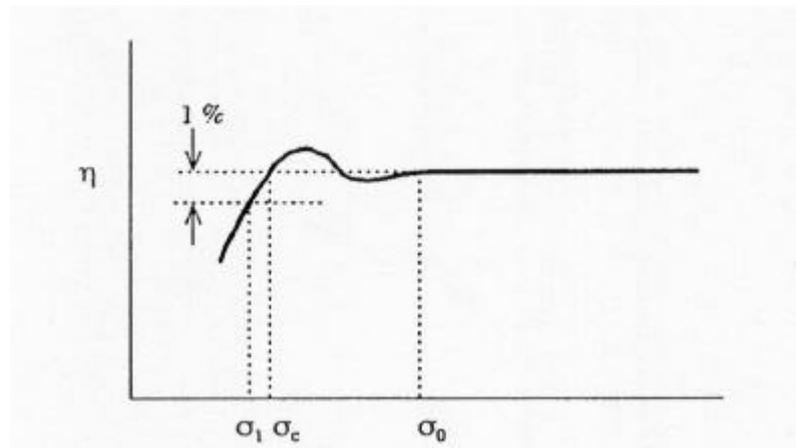


Figura 11: posible definición del coeficiente de Thoma, atendiendo a la caída del rendimiento.

En las turbinas hidráulicas los diferentes tipos de cavitación pueden o no depender de σ . (Así como del punto de funcionamiento, como puede verse en la *Figura 12*).

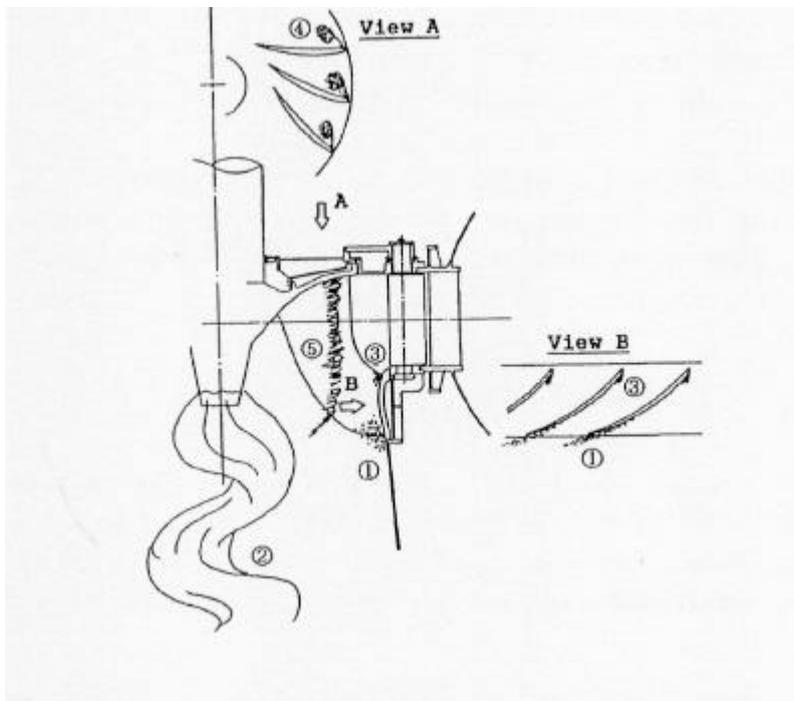


Figura 12: localización de los principales tipos de cavitación presentes en una turbina Francis.



5.2.1. Cavitación que depende de s

- **Cavitación de burbujas** [1 en la figura 12]: sin duda, la más importante dependiente de σ . Acostumbra a aparecer en el extradós de los álabes, hacia la salida del rodete y se ve influenciado por el punto de funcionamiento de la máquina.

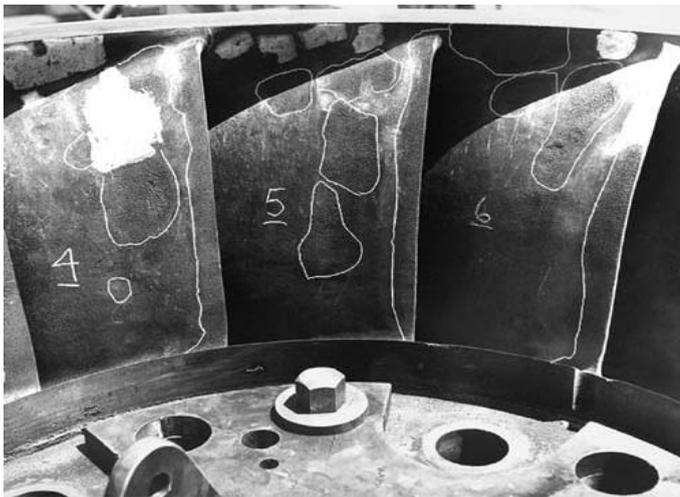


Foto 5: efecto erosivo de la cavitación de burbujas observada en modelo de rodete en laboratorio.

- **Cavitación a la salida del álabe** (*outlet cavitation*): localizado en la cara de succión.

5.2.2. Cavitación que no depende de s

- **Cavitación de entrada extradós o cara de succión** (*Extradós inlet cavitation o leading edge cavitation*). [3 en la figura 12]. Puede producir erosiones profundas en un corto período de exposición, ya que es la forma más dañina de cavitación en máquinas hidráulicas. Acostumbra a producirse cuando la turbina trabaja con saltos mayores que los de diseño.
- **Cavitación de entrada intradós o cara de presión** (*Intradós inlet cavitation*). Ídem que el anterior, pero resultado de trabajar con saltos bajos.
- **Cavitación producida por vórtices a carga parcial** (*Part-load vortices*). [5 en la figura 12]. 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. El peligro de erosión es bajo, produciendo ruido (aunque de menor intensidad respecto a la cavitación de entrada intradós, p. e.)



5.2.3. Otros tipos de cavitación

- **Cavitación de antorcha** [2 en la figura 12]. Aparición de un vórtice cavitante - llamado antorcha- en el tubo de aspiración cuando se trabaja a cargas parciales o con sobrecargas. Esta antorcha provoca oscilaciones de presión que pueden traducirse en fluctuaciones no deseadas de par en el eje de la turbina, acompañado de un notable nivel de vibraciones.

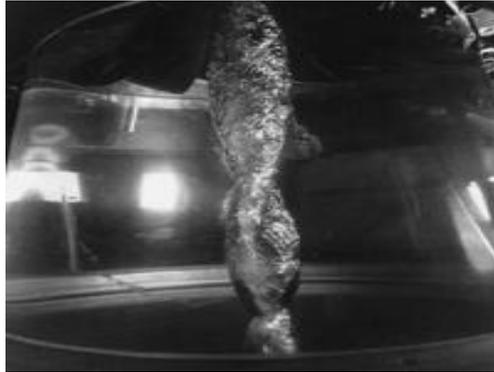


Foto 6: antorcha observada en banco de pruebas.

- **Cavitación por desprendimiento de vórtices de Von Karman** (*vortex shedding cavitation*). [4 en la figura 12] Localizada a partir del borde de salida del álabe y debida a la cavitación de los vórtices desprendidos.
- **Cavitación en las juntas** (*Gap cavitation*). Aparece en un flujo a alta velocidad resultado del contacto entre dos zonas a diferente presión.
- **Cavitación en las directrices**. Puede ocurrir cuando el perfil de los álabes del distribuidor no está adaptado a las condiciones hidrodinámicas del punto de trabajo.

Nuestro estudio prestará especial atención a cuatro de todas las posibilidades de cavitación enumeradas. Concretamente:

- Cavitación de burbuja
- Cavitación de Von Karman
- Cavitación a la entrada del álabe
- Cavitación a la salida del álabe



5.3. Consecuencias en máquinas hidráulicas

Las consecuencias que convierten en dañina la presencia de la cavitación son:



- La formación de inestabilidades de carga parcial, consecuencia de trabajar con caudales inferiores al de diseño (antorcha).
- La formación de antorchas por sobrecarga (caudales de funcionamiento superiores al de diseño).
- Aparición de ruido y vibraciones.
- Disminución de prestaciones de la máquina hidráulica (caída del rendimiento), reduciendo la fiabilidad de nuestras instalaciones.
- Desarrollo de procesos erosivos [Ver Foto 7].

Foto 7: rodete erosionado por cavitación.

- Incremento en los gastos de mantenimiento (no hablamos únicamente del coste asociado a la sustitución de la(s) pieza(s) afectada(s), sino en la problemática asociada a parones en la producción).

5.4. Estado del arte

A continuación se facilita un resumen de cuatro artículos leídos durante la elaboración del trabajo; artículos que por su temática y/o extensión abordan parte de la problemática discutida con posterioridad. No pretende ser esta una revisión bibliográfica exhaustiva, pero sí una foto fija del “estado del arte” a finales de 2003.



5.4.1. Artículo I: “Cavitation detection in a Francis turbine”

Autores: C. Vizmanos, E. Egusquiza, E. Jou

La central hidroeléctrica de Serós, en el río Segre (Lleida), llevaba sufriendo el indeseado efecto de la cavitación durante toda su vida operativa. Y las consecuencias no habían sido en modo alguno desdeñables: provocaban la erosión de los álabes en todas las turbinas Francis de las que consta la planta.

Con la intención de estudiar el fenómeno, se llevó a cabo un trabajo experimental a pie de máquina que consistió en la adquisición de los datos, seguido de un extenso análisis en el laboratorio de la información recolectada. El objetivo fue analizar las vibraciones a altas frecuencias para acabar seleccionando aquellas condiciones operativas de la máquina libres de cavitación y así poder minimizar los gastos por mantenimiento.

Las señales fueron grabadas para diferentes puntos de funcionamiento de la turbina y sometidas a un análisis tanto en el dominio temporal como en el frecuencial y en el tiempo-frecuencia.

El estudio mostró que la detección de fluctuación de la cavidad de vapor es uno de los métodos más exitosos a la hora de detectar la cavitación erosiva de entrada de álabe. Tras seleccionar diversas bandas de frecuencia, la técnica de la demodulación en amplitud de las señales de vibración mostró una acentuación del fenómeno de cavitación erosiva en las condiciones de carga máxima. Además, la información aportada por los acelerómetros también sirvió para resaltar una estrecha dependencia entre la frecuencia seleccionada y la localización del sensor.

Las conclusiones que arrojó el estudio fueron, entre otras:

- En el presente caso particular, resulta que en condiciones de plena carga es donde más se exagera la actividad cavitativa.
- La necesidad de promediar un gran número de espectros resultantes de la demodulación para obtener una señal “de calidad”.
- La demodulación mediante técnicas digitales (en la fecha de realización del presente artículo) todavía exigía de unos requerimientos (en cuanto a capacidad de almacenamiento del computador se refiere) difíciles de asumir.



- La solución para estos problemas podría pasar por sincronizar el promediado temporal con un “*shaft trigger*”.
- Las técnicas tiempo-frecuencia matizan el fenómeno cavitativo con mayor precisión.

5.4.2. Artículo II: “Field assessment of cavitation detection methods in hydropower plants”

(Proceedings of the XXI st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. September 9-12, 2002, Lausanne)

Autores: Xavier Escaler, Eduard Egusquiza, Toufik Mebarki, François Avellan, Mohamed Farhat.

Se trata de un estudio experimental llevado a cabo en turbinas Francis expuestas a erosión por cavitación que permite validar una vez más diferentes métodos actuales de detección y predicción; especialmente los encaminados a descubrir cavitación erosiva.

Parece claro que para incrementar lo máximo posible el tiempo entre reparaciones (y esto es lo mismo que dilatar la vida útil de nuestra máquina), debe evitarse el trabajar bajo aquellas condiciones de operatividad para las cuales la probabilidad de ataque erosivo se ha revelado alta. Pero el saber dónde y cuándo se dan estas condiciones no es tan sencillo. De esta necesidad surgen los principales esfuerzos de la investigación, encaminados a saber cuáles son las posiciones más adecuadas donde efectuar las mediciones, así como las mejores técnicas de detección.

La cavitación erosiva se halla bien localizada en la turbina estudiada y para determinar el origen de las vibraciones, las señales han sido filtradas con filtros pasa-bandas entre 30k y 40k Hz, computando la envolvente mediante la transformada de Hilbert para demodular la señal.

Resultados adicionales indican que no es posible seleccionar la mejor banda en la que detectar la cavitación de antemano y que las lecturas de vibración tomadas con el mismo transductor en distintas máquinas son también diferentes, por lo que se debe escoger dicha banda a partir de la observación de los resultados.



Una de las conclusiones más importantes del trabajo es destacar que el mejor punto para la detección y cuantificación de la cavitación erosiva a la entrada (“*erosive inlet cavitation*”) en los álabes del rodete resulta ser el pedestal donde viene asentado el cojinete guía (“*guide bearing pedestal*”) de la turbina.

5.4.3. Artículo III: “Cavitation detection and erosion prediction in hydro turbines”

(The 9th of Internacional Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery Honolulu, Hawaii, February 10-14, 2002)

Autores: X. Escaler, E. Egusquiza, T. Mebarki, F. Avellan, M. Farhat

En este artículo se destaca la importancia de las técnicas de detección en el dominio temporal y frecuencial como herramientas primordiales para la predicción de la cavitación erosiva en turbinas reales. Todo ello queda ilustrado con dos ejemplos: el de una turbina Kaplan que sufre erosión en la superficie de sus álabes y el de una turbina Francis que presenta cavitación a la entrada (“*inlet cavitation erosion*”).

Bajo ciertas condiciones hidrodinámicas, la cavitación de entrada muestra un comportamiento inestable que se ha demostrado termina provocando una erosión severa. El mecanismo de formación de cavidades y su desprendimiento y colapso se ve influenciado por la variación en el ángulo de incidencia de la velocidad relativa de entrada debido a la no uniformidad del perfil de velocidades absolutas del flujo entrante por la presencia de las directrices. Es en este tipo de cavitación donde el monitoreo de las vibraciones se revela como una eficaz técnica de detección.

En ambos casos, la cavitación es detectada mediante las técnicas basadas en el análisis de las vibraciones inducidas: el *power spectrum*, la demodulación y el tiempo-frecuencia. La realización de las medidas mediante sensores remotos ahorra la farragosa tarea de acceder –previo desmontado e interrupción de la producción- a las partes más inaccesibles de la máquina.

Para determinar en qué punto de funcionamiento aparece la cavitación, las medidas deben de llevarse a cabo bajo diferentes condiciones de operatividad. En el dominio frecuencial, el estudio de las altas frecuencias es una técnica bien conocida para detectar



la presencia de colapsos de las cavidades. En el dominio temporal, la técnica más utilizada es la demodulación de las señales cavitantes previo filtro pasa-bandas.

El paso natural a efectuar una vez detectada e identificada la cavitación es la estimación del grado de erosión, por tratarse de la manifestación más dañina de la misma (un método todavía no completamente desarrollado ni validado en prototipos).

Los resultados obtenidos en la turbina Kaplan (*) refuerzan la importancia cualitativa de los acelerómetros en dirección radial respecto a los axiales, y demuestran el incremento de la alta frecuencia para la carga máxima, lo cuál indica que en dicho rango de funcionamiento se produce la cavitación más erosiva.

Para el caso de la turbina Francis (**) se aplican las técnicas a dos unidades idénticas pero con rodetes de diferente material. El estudio trata de determinar la validez de un nuevo rodete fabricado en acero inoxidable (más resistente a la cavitación que el hierro macizo (“*cast iron*”)) o bien mantener el actual, sometiéndolo a las revisiones / reparaciones de rigor (y basadas, a partir de ahora, en las predicciones).

La principal conclusión del trabajo es que:

- La cavitación a la entrada (“*inlet cavitation*”) puede ser detectada en prototipos midiendo las vibraciones de alta frecuencia en diferentes condiciones de funcionamiento de la máquina.

(*) *Características turbina Kaplan: Caudal de 225 m³ / s para un salto de 34 m. Potencia de 73 MW. Rodete equipado con 6 álabes y 24 directrices.*

(**) *Características turbina Francis: Caudal de 28 m³ / s, para salvar un desnivel de 51 m. Potencia máxima de 11 MW. Rodete con 15 álabes y 24 directrices.*

5.4.4. Artículo IV: “Cavitation erosion prediction on Francis turbines. Part 2. Model tests and flow analysis”

Autores: Dupont, Bourdon, Dorey, Laperrousaz, Couston.

Una nueva tanda de resultados –fruto de diversas medidas en un modelo a escala reducida- son presentados, comentados y comparados con los del prototipo, que es una turbina Francis de 266 MW. Tal comparación conduce a la estandarización de una serie de tests a efectuar para la predicción de cavitación erosiva en el modelo para su extrapolación al prototipo.



En este estudio se ponen de manifiesto las diferencias entre el modelo y el prototipo debidas a los efectos de escala entre ambos.

Para la realización de los ensayos se instrumenta uno de los álabes más dañados con el objetivo de estudiar su comportamiento en el laboratorio, prestando especial atención a las fluctuaciones de presión en los álabes achacables a la cavitación.

Durante los ensayos se realiza el seguimiento de dos puntos de funcionamiento: los correspondientes al 78% y al 90% del máximo de apertura de las directrices.

En ambos casos, el índice de cavitación revela una fuerte discrepancia en lo referente a la repercusión del efecto cavitativo sobre una superficie, según se trate del modelo o del prototipo. En otras palabras, hay una desviación entre los tests de dañado para prototipo y modelo.

También se llega a determinar junto a qué transductor se producen mayor número de colapsos, delimitando así la zona más sensible a la cavitación erosiva y pudiéndola extrapolar al prototipo.

Resumiendo: la dificultad para comparar cavitación erosiva entre modelo y prototipo se ve incrementada por la dificultad de evaluarla en el modelo. Una de las metas de este estudio era testear diferentes técnicas de medición que fuesen utilizables en el modelo para predecir la erosión del prototipo, similar objetivo que el perseguido en el presente proyecto (“detección de cavitación en turbina Francis”). Por ejemplo, mientras el análisis de las vibraciones resulta satisfactorio de cara a detectar cavitación desarrollada, no parece lo suficientemente sensible para detectar la cavitación incipiente.

Por lo tanto, queda claro que todavía hay mucho trabajo por hacer.

5.5. Comentario a la bibliografía

De lo leído –tanto en los artículos anteriores como en otras fuentes bibliográficas- se extraen una serie de conclusiones de partida que pueden arrojar luz sobre las motivaciones e intenciones del presente proyecto. Estas son algunas de las carencias y/o lagunas que subrayan la mayoría de los autores:

- Son pocos los tipos de cavitación estudiados sobre modelos de máquinas hidráulicas y en prototipos las aproximaciones comentadas se centran básicamente en la problemática asociada a la cavitación de entrada.



- Así mismo, se echa de menos un mayor número de pruebas de laboratorio para validar los resultados en máquina real y las técnicas probadas han de ser ensayadas sobre el mayor número posible de máquinas.

Este proyecto, pues, hace suya tal necesidad e intenta aportar su granito de arena en el caso concreto de la detección de cavitación en turbina Francis, extendiendo la problemática a un total de cuatro tipos de cavitación: de burbuja, von Karman, entrada y salida.



6. Adquisición experimental de datos

Llevar a cabo una investigación experimental en grupos instalados en operación es siempre complicado. Para planificar los ensayos hay que adaptarse a factores tales como las horas en que los grupos pueden dejar de suministrar energía eléctrica a la red (que acostumbran a ser bastante intempestivas). [4]

A eso hay que sumar el transporte del equipo de registro de señales desde el laboratorio a la central, el ruido experimental asociado a campos magnéticos fuertes, humedades, suciedades...

Para el monitoreo y diagnóstico de una máquina –en condiciones normales- se emplean transductores piezoeléctricos con una frecuencia de resonancia relativamente alta. Las condiciones de trabajo distarán mucho de los asépticos protocolos de laboratorio: se precisa instrumental robusto. A esto hay que sumarle que el método de montaje no será siempre el adecuado (ideado en primera instancia), pues numerosas veces deben ser instalados en lugares de complicado acceso.

Por ello, la estrategia que planteamos consiste en ensayar en el modelo a escala reducida en laboratorio. Esta opción nos ofrece la posibilidad de realizar medidas en puntos de funcionamiento y condiciones muy favorables, difíciles de obtener en máquina real.

6.1. Descripción del instrumental empleado

Para tomar las medidas se ha dispuesto de seis captadores (2 de aceleración y 4 de presión).

Los acelerómetros utilizados poseen las características siguientes:

- **VIBRACIONES RADIALES (A1):**
- **Situación:** en cojinete de la turbina.
- **Tipo:** acelerómetro piezoeléctrico 8702B25M1
- **Sensibilidad:** 202 mV / g
- **Marca:** Kistler



- **VIBRACIONES AXIALES (A2):**
- **Situación:** en cojinete de la turbina.
- **Tipo:** acelerómetro piezoeléctrico 8702B25M1
- **Sensibilidad:** 203 mV / g
- **Marca:** Kistler

Los captadores de presión empleados poseen las características siguientes:

- **PRESIÓN AGUAS ARRIBA (P1):**
- **Situación:** en cámara espiral.
- **Tipo:** captador piezoeléctrico de presión dinámica 2MIPAA100
- **Sensibilidad:** 88.19 mV / bar
- **Marca:** Keller

- **PRESIÓN AGUAS ARRIBA (P2):**
- **Situación:** en cámara espiral.
- **Tipo:** captador piezoeléctrico de presión dinámica 2MIPAA100
- **Sensibilidad:** 104.4 mV / bar
- **Marca:** Keller

- **PRESIÓN AGUAS ABAJO (P3):**
- **Situación:** en tubería forzada.
- **Tipo:** captador piezoeléctrico de presión dinámica 701
- **Sensibilidad:** -82 μ C / bar
- **Marca:** Kistler



- PRESIÓN AGUAS ABAJO (P4):

- **Situación:** en tubería forzada.

- **Tipo:** captador piezoeléctrico de presión dinámica 701

- **Sensibilidad:** -78 pC / bar

- **Marca:** Kistler

Para condicionar las señales se ha empleado un filtro pasa-bajos con frecuencia de corte a 20 kHz del tipo Chebyshev de 5 polos.

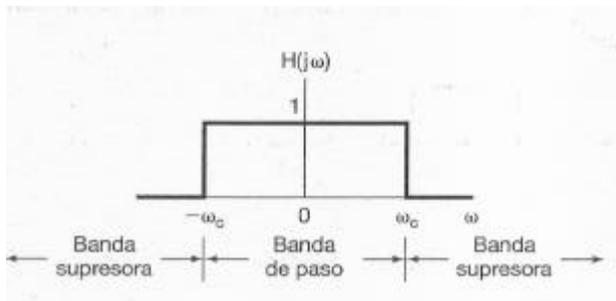


Figura 13: respuesta en frecuencia de un filtro pasa bajos ideal.

Varios tipos de filtros básicos se usan ampliamente y se les han dado nombres para indicar su función. Por ejemplo –y en nuestro caso–, un filtro pasa bajos es aquel que deja pasar bajas frecuencias y atenúa o elimina las frecuencias más altas, por encima de ω_c . Con todo (y como se desprende del apartado 6.3) el tratamiento ensayado en el presente proyecto es enteramente digital.

6.2. Medidas

Como ya ha quedado dicho, se dispone de cinco puntos de funcionamiento. Se han tomado 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. En total, pues, contaremos con 300 resultados evaluables.



6.3. Acerca de Lab_View

El análisis y el procesado de los datos se ha efectuado de forma digital con el programa informático LabVIEW, distribuido por National Instruments.

Las ventajas que ofrece LabVIEW son numerosas, aunque las principales razones por la que ha sido elegido este software fueron su simplicidad y robustez: al utilizar un lenguaje de programación de carácter gráfico permite al usuario compilar rutinas relativamente complicadas sin necesidad de que este posea unos conocimientos informáticos profundos.

Los programas que incorpora LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (VI) porque tanto en su apariencia como en su funcionamiento imitan a instrumentos físicos comunes en laboratorios o bancos de pruebas: osciloscopios, multímetros...

Así pues, implementando una serie de instrucciones –y modificando otras pre-existentes cuando ha sido menester- hemos podido simular procesos vía PC (procesos que, en condiciones normales, hubiesen requerido de un instrumental que, o bien no estaba a nuestro alcance o su posible incorporación haría exceder en mucho nuestro presupuesto).

Descrito sucintamente, al ejecutar LabVIEW aparecen dos pantallas superpuestas [ver figura 14]: el panel de control (captura sobre fondo gris) y el diagrama (captura sobre fondo blanco). El usuario trabaja directamente sobre el panel de control, creando variables de entrada o salida para los datos. Las variables en LabVIEW pueden ser de dos tipos: indicadores (información no modificable por tener un valor asignado directamente por la aplicación) y controles (*interface* que habilita la introducción de datos por parte del usuario). Unos y otros (controles e indicadores) aparecen por duplicado en el panel frontal y en el diagrama, lugar –este último- donde se puede modificar su valor, realizar un seguimiento de las operaciones efectuadas por la aplicación o listar sus características. No en vano el diagrama es –valga la redundancia- un diagrama de bloques más o menos complicado por el que circula el flujo de información.

Estas rutinas nos han permitido tratar los resultados conforme a las técnicas enunciadas en el capítulo 8 del presente proyecto.



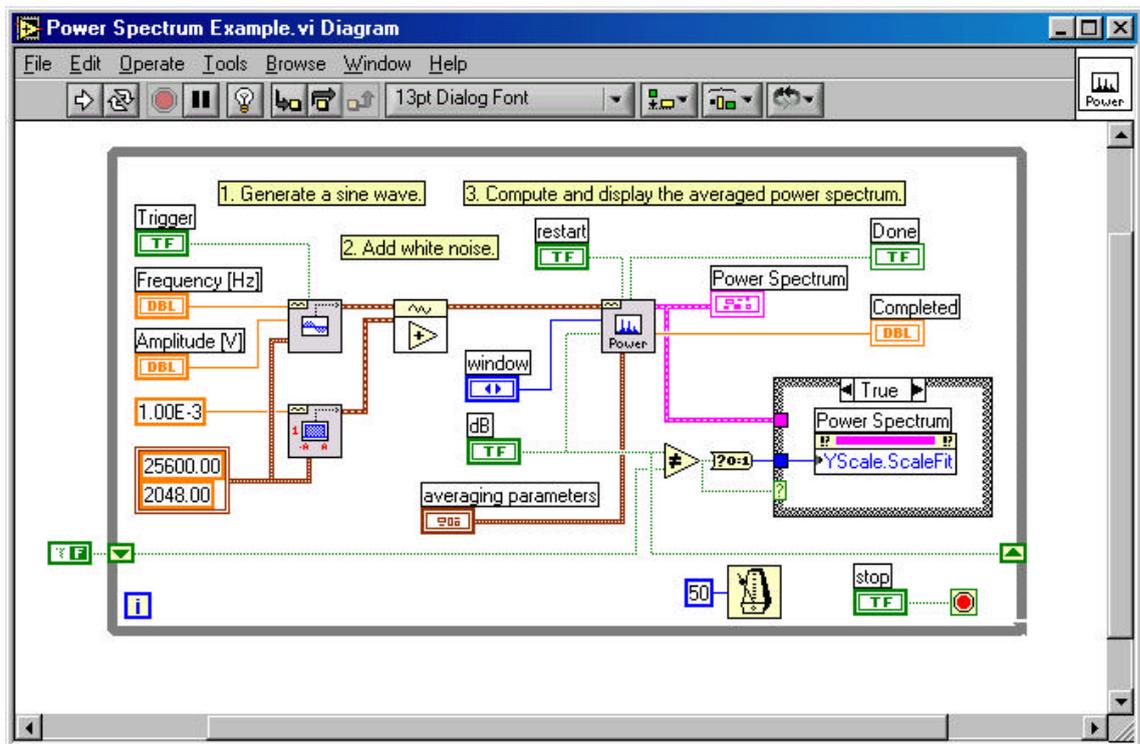
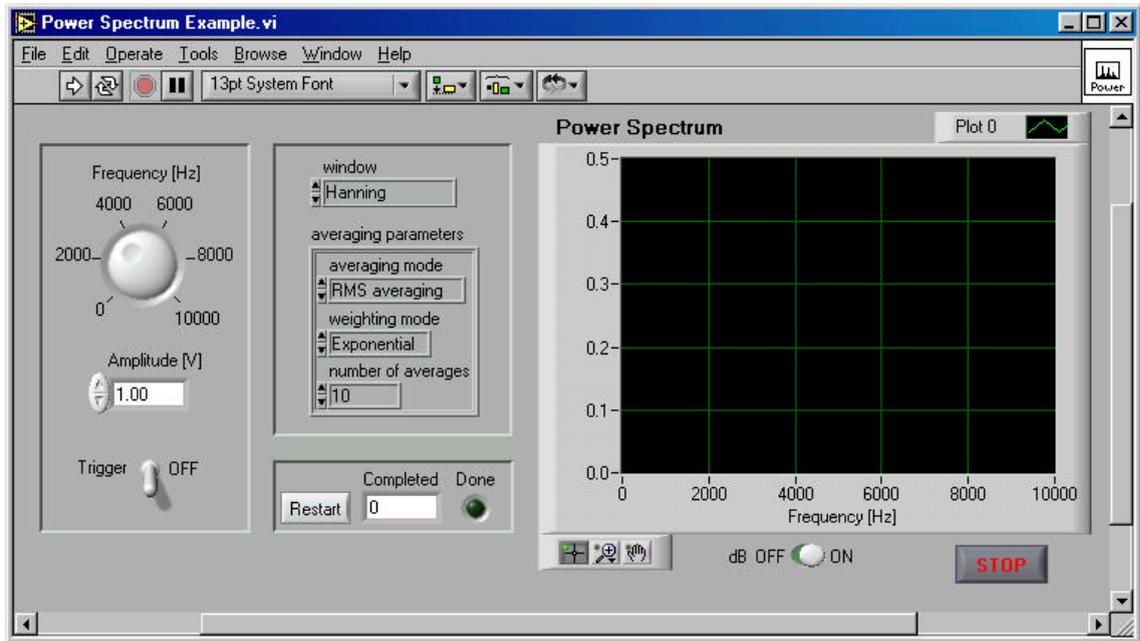


Figura 14: vista del panel de control y diagrama de un VI. Como se adivina en este último, la complejidad del sistema entretejido puede llegar a ser extraordinaria.



6.4. Ubicación de los captadores de presión y aceleración

Los captadores que se han instalado medirán:

- Vibraciones radiales (A1) en el cojinete de la turbina.
- Vibraciones axiales (A2) en el cojinete de la turbina.
- Presiones aguas arriba (P1, P2) en la cámara espiral.
- Presiones aguas abajo (P3, P4) en la tubería forzada.

6.5. Justificación regímenes de funcionamiento ensayados.

Se 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 nos permitirá un contraste más efectivo respecto a los otros cuatro, que sí presentan alguno de los tipos más habituales de cavitación.

Los ensayos se inician con el régimen que no presenta cavitación, para pasar a continuación por un espectro lo más representativo posible de las diversas manifestaciones cavitantes. Siguiendo este orden ascendente, estos han sido los regímenes:

Nomenclatura del punto de funcionamiento	á (grado de apertura directrices)	ó (coeficiente de cavitación)	Caudal (m ³ / s)
158, 163	34	0.2547	0.6564
159, 164	38	0.2531	0.709
160, 167	41	0.2537	0.746
161, 165	48	0.2537	0.826
162, 166	28	0.2211	0.6076

Tabla I: puntos de funcionamiento y características principales asociadas.



Para determinar el tipo de cavitación asociado a cada uno de estos puntos, se llevaron a cabo observaciones visuales (a través de un cono difusor transparente) con el concurso del estroboscopio, llegando a las siguientes conclusiones previas, de las cuales se tomó nota:

158, 163: ausencia de cavitación.

159, 164: cavitación intermitente y débil a la salida del álabe, antorcha de sobrecarga.

160, 167: cavitación a la salida del álabe y cavitación de Von Karman (intermitente), antorcha de sobrecarga.

161, 165: cavitación de burbuja fuerte, antorcha de sobrecarga.

162, 166: cavitación extradós (a la entrada), pulsaciones, antorcha de carga baja.

Tras esta primera asignación –repito: basada en observaciones directas- estamos en condiciones de aplicar, con intención de validarlas, diversas técnicas de análisis de señales.

Pero antes de todo, describamos el modelo de turbina empleado.





7. Descripción del modelo

7.1. Características del modelo empleado

Las características principales del modelo de turbina Francis ensayado en el *Laboratoire de Machines Hydrauliques (LMH) del IMHEF*, son:

- Salto máximo: 100 m.
- Caudal máximo: $1,4 \text{ m}^3 / \text{s}$
- Potencia: 1000kW
- Número de álabes (Z_b) = 19
- Número de directrices (Z_v) = 20
- Velocidad de rotación ($\dot{\omega}_{\text{rodete}}$) = 874 r.p.m.
- Frecuencia fundamental ($f_f = \dot{\omega} / 60$) = 14,566 Hz.
- Período de giro del rodete (T_{rodete}) = 0,006865 s.
- Frecuencia de paso de álabes ($f_b = f_f \times Z_b$) = 276,83 Hz.
- Frecuencia de paso de directrices ($f_v = f_f \times z_v$) = 291,4 Hz.



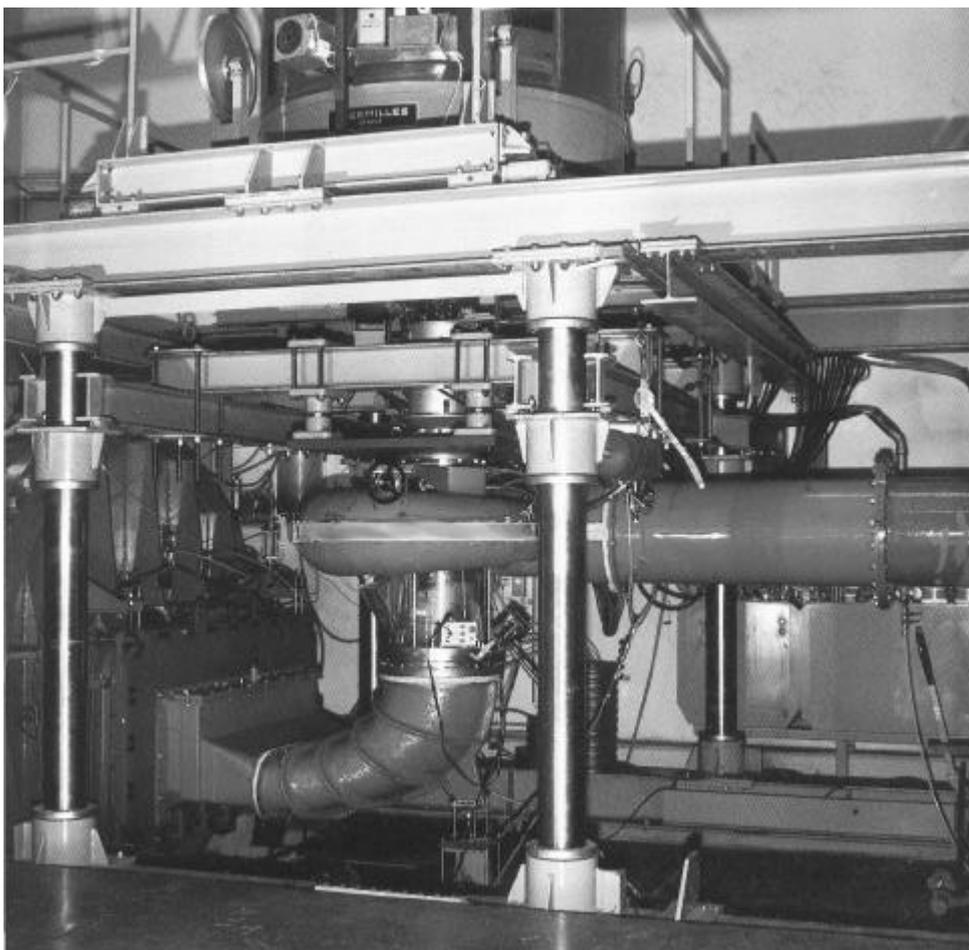


Foto 8: perfil de nuestra instalación de ensayo.

Las características del prototipo (máquina real) correspondiente al modelo ensayado:

- $H_{\text{máx}} = 35.50 \text{ m.}$
- $H_{\text{nom}} = 33.80 \text{ m.}$
- $H_{\text{mín}} = 30.25 \text{ m.}$
- Potencia máxima = 51.6 MW
- Caudal máximo = $173.9 \text{ m}^3 / \text{s}$
- Velocidad de rotación = 105.9 r.p.m.



8. Descripción de las técnicas utilizadas

8.1. Espectro de potencia (*power spectrum*)

Esta técnica se utiliza para determinar la energía de la vibración resultante en función de la frecuencia.

El espectro de potencia se ha calculado a partir de la señal temporal (X), usando la fórmula:

$$\frac{FFT^*(señalX) \times FFT(señalX)}{N^2}$$

Donde FFT es la transformada rápida de Fourier, FFT* su conjugada y N el número de puntos de la señal.

8.2. La técnica de demodulación en amplitud

Esta técnica se fundamenta 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: se busca el “ritmo” con el que se produce u oscila la cavitación.

Uno de los escenarios por antonomasia en los que la técnica de demodulación en amplitud es particularmente útil es en el análisis de señales localizadas en las altas frecuencias y con comportamiento cercano a la periodicidad. Esto se debe a que en la máquina la cavitación está influida por el flujo no estacionario y las pulsaciones de presión existentes, por lo que la excitación nos viene modulada a ciertas frecuencias.

La señal original deberá de tratarse hasta obtener un producto más manejable, susceptible ya de proporcionarnos alguna información de interés de cara a nuestro objetivo primordial; objetivo que no es otro –no lo olvidemos- que detectar la cavitación.



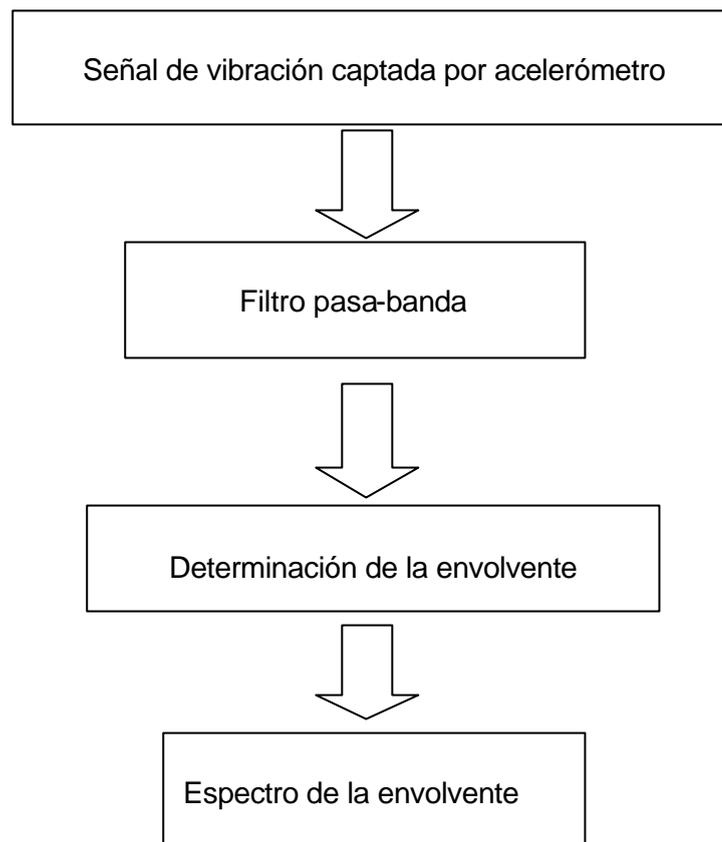


Figura 15: resumen de la técnica de demodulación.

El proceso para demodular la señal vibratoria comienza con el filtrado de la misma en el dominio temporal. Normalmente se trata de un filtro pasa banda en la zona de altas frecuencias (es esencial eliminar las ondas generadas por bajas frecuencias, pues acostumbran a enmascarar las vibraciones causadas por la cavitación, razón de ser de nuestro estudio.)

Vaya por delante que el resultado de esta operación no nos da un producto achacable exclusivamente a la cavitación (existen otras muchas fuentes de frecuencias elevadas). Por ello, una vez filtrada, se determina su envolvente mediante el uso de la transformada de Hilbert.

La transformada de Hilbert de una función $x(t)$ se define como:

$$h(t) = H\{x(t)\} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t)}{t - \tau} d\tau$$



Por último –y con esta envolvente– se determina la presencia de frecuencias fundamentales a partir de su espectro de potencia. El espectro de la envolvente nos dotará de un material de trabajo sólido, con picos de diferentes amplitudes que nos permitirán determinar la existencia de cavitación y cuantificar su importancia.

8.3. La función de transferencia y la coherencia

8.3.1. Función de transferencia

La función de transferencia representa la relación existente entre salidas y entradas a nuestro sistema de estudio en el dominio frecuencial.

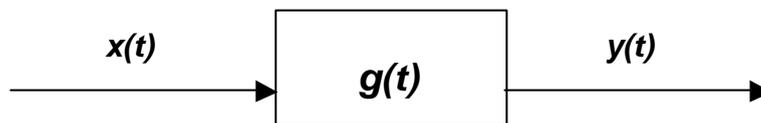


Figura 16: relación básica entre inputs-outputs para un sistema lineal (representación en diagrama de bloques).

Un sistema cualquiera queda caracterizado por su respuesta a un impulso dado (lo que denominaremos $g(t)$) y la señal de salida propiamente dicha (en lo que sigue, $y(t)$). Estos dos parámetros quedan relacionados entre sí a través de:

$$y(t) = x(t) * g(t)$$

donde $x(t)$ es la señal de entrada.

Por el teorema de la convolución llegamos sin grandes dificultades a establecer que:

$$Y(f) = X(f) * G(f)$$

Donde $G(f)$ es la transformada de Fourier de la original $g(t)$. Operando:

$$G(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

Y $G(f)$ es lo que llamaremos función de transferencia.



8.3.2. Coherencia

La coherencia es una función que evalúa el grado de correlación lineal existente entre dos señales, en función de la frecuencia correspondiente.

Se calcula mediante la fórmula:

$$\frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f) * S_{yy}(f)}$$

donde $S_{xy}(f) = X^*(f) Y(f)$, $S_{xx}(f) = X^*(f) X(f)$ y $S_{yy}(f) = Y^*(f) Y(f)$, siendo $X^*(f)$ e $Y^*(f)$ las señales conjugadas de x e y respectivamente.

Si la coherencia diese como resultado 1, delataría una relación lineal perfecta entre las dos señales. Por el contrario, si el resultado fuese próximo a 0, no existiría relación alguna entre ambas.

Esta técnica permite identificar frecuencias asociables a un fenómeno común -como por ejemplo la cavitación- al comparar señales captadas de diferentes posiciones.

8.4. Tiempo-frecuencia

La representación de las señales en el dominio tiempo-frecuencia se ha comprobado que mejora los resultados de los métodos espectrales y temporales clásicos al ser capaz de reflejar cambios en frecuencia con respecto al tiempo (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.

