

LECCIÓN 6. CAVITACIÓN.

- 6.1. Concepto y características de la cavitación.
- 6.2. La cavitación en las bombas.
- 6.3. La cavitación en las turbinas.

6.1. CONCEPTO Y CARACTERÍSTICAS DE LA CAVITACIÓN.

En este apartado se definen las características generales de la cavitación como fenómeno físico y se sientan las bases para particularizar dicho fenómeno a las máquinas de fluidos.

6.1.1 Descripción del fenómeno de la cavitación.

Introducción:

La cavitación es un fenómeno típico de bombas y turbinas hidráulicas (flujo incompresible, de agua o de otro líquido), pero no excluyente de dichas máquinas. También las hélices marinas presentan serios problemas de cavitación.

La cavitación afecta a los álabes tanto de bombas como de turbinas hidráulicas y, pese a que sus causas y efectos han sido estudiados ampliamente a lo largo de los años, todavía hoy dan lugar a serios problemas de funcionamiento.

Los estudios sobre cavitación en hélices de barcos se iniciaron a través de los trabajos de Euler (1754), pero su importancia en la industria marina no fue considerada hasta mediados del siglo XIX (1873) cuando Reynolds investigó sus efectos sobre las hélices (en la figura 6.1 se muestra un túnel de cavitación para ensayo de hélices).

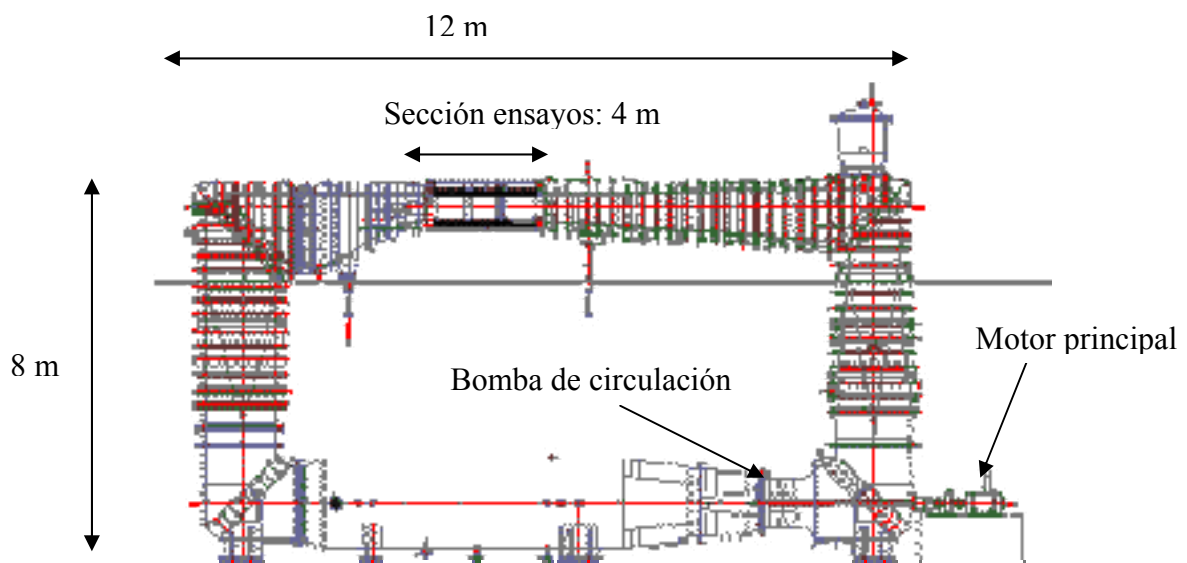


Figura 6.1.- Túnel de cavitación con dimensiones típicas.

En cualquier caso, la cavitación tiene efectos muy negativos para el normal funcionamiento de las turbomáquinas de flujo con líquidos.

Mecánica de las burbujas:

La cavitación puede definirse como la formación y posterior colapso (implosión) de burbujas de gas (cavidades) en el seno de un líquido. El gas puede ser aire, vapor del propio líquido u otro gas disuelto en el líquido considerado.

Se define la presión de vapor como la presión de la fase vapor en equilibrio con la superficie libre de un líquido (equilibrio evaporación-condensación). Esta variable depende básicamente del estado termodinámico considerado, así, para un líquido dependerá sólo de la temperatura (en la figura 6.2 se muestra la evolución de esa presión para el agua).

Presión de vapor (kPa)	0.689	6.894	13.79	27.58	55.15	101.3	110.3
Temperatura (°C)	1.6	38.72	52.58	67.22	83.83	100.0	102.4

Figura 6.2.- Presión de saturación del agua en función de la temperatura.

Cuando la presión en un líquido baja hasta un valor cercano a la presión de vapor para las condiciones termodinámicas existentes (temperatura) se produce la formación de microburbujas en el seno del líquido. Básicamente se trata de un proceso de ebullición. Por ejemplo, se sabe que el agua hierve a 100°C. Sin embargo, esto es cierto sólo parcialmente, dado que, según lo señalado, existe la posibilidad de “ebullición fría” a menor temperatura, siempre que la presión existente sea también menor que la atmosférica. Así, el agua hierve a 100° C sólo a presión atmosférica, es decir, en torno a 1 bar (así, es también bastante conocido el hecho de que los alpinistas pueden hervir su comida a temperaturas bastante inferiores a 100° C). En la tabla 1 se expone cuantitativamente lo expuesto en este párrafo.

La cavitación puede aparecer en líquidos en reposo o en movimiento, siendo la única condición necesaria el alcanzar el estado de equilibrio líquido-vapor. En líquidos en reposo, se puede lograr por medio de un aumento en la temperatura por transferencia de calor. Para líquidos en movimiento se puede lograr por medio de una disminución local de presión por aumento de la velocidad, y las burbuja generadas son transportadas aguas abajo por la corriente hasta zonas donde la presión es más alta, dando lugar al brusco *colapso* de las mismas.

En la práctica, la cavitación se puede producir en cualquier punto de un circuito hidráulico como en tubos de venturi, huecos, protuberancias, cuerpos sumergidos, vórtices, o en máquinas hidráulicas (bombas o turbinas, ver figura 6.3), propulsores marinos (ver figura 6.4), transitorios en golpe de ariete y cojinetes.

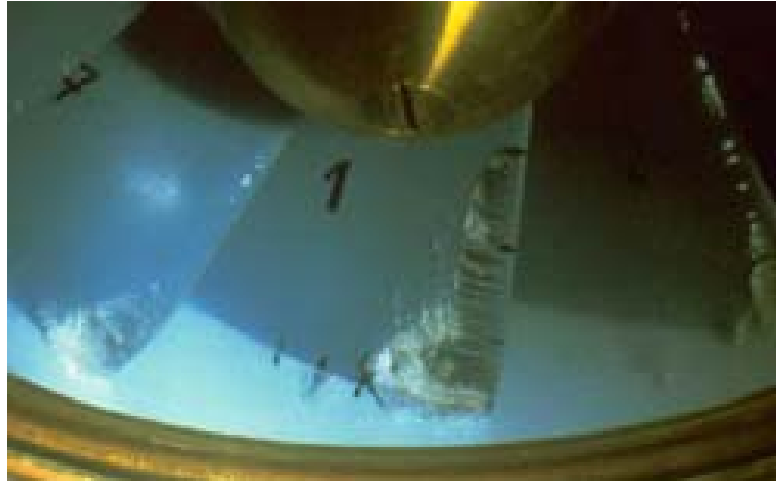


Figura 6.3.- Cavitación en una bomba axial.

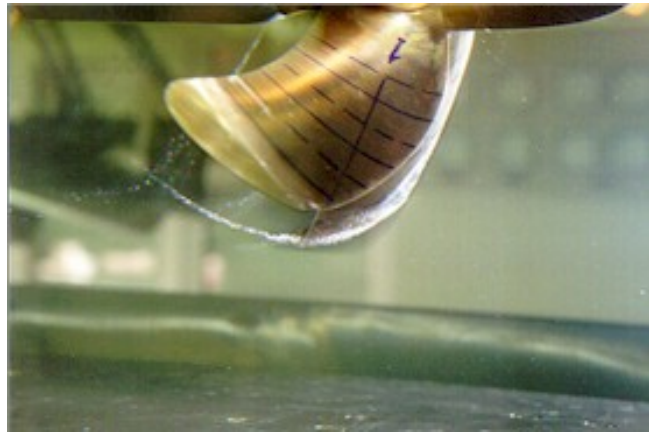


Figura 6.4.- Cavitación en una hélice marina (imagen global y detalle).

Germinación y fases:

El hecho de que generar una burbuja en el seno de un fluido requiere una gran cantidad de energía local (el gradiente de presión líquido-burbuja es proporcional al inverso del radio de la burbuja) cuestiona el fenómeno físico descrito. Sin embargo, se debe considerar que el medio fluido real presenta siempre puntos de nucleación, es decir, partículas en suspensión, suciedades u otros. Estos dan lugar a discontinuidades del medio y a superficies cóncavas que inducen la nucleación o *germinación* de las burbujas. A continuación, el crecimiento es inmediato hasta alcanzarse el equilibrio de presiones.

Tal y como se ha señalado en el apartado anterior, una vez que se ha generado la burbuja, todo proceso de cavitación presenta dos fases claramente diferenciadas: el crecimiento de las burbujas y el colapso.

El *crecimiento* aparece asociado a los puntos de germinación (discontinuidades). Puede ser lenta o rápida, según el mecanismo predominante que genere la cavitación. Si el líquido tiene un alto contenido en gas, el crecimiento es lento y se produce por difusión de vapor (*cavitación gaseosa*), mientras que si la cavitación se debe a la reducción brusca de la presión se denomina *cavitación vaporosa* y resulta ser un proceso muy rápido. Por tanto, el crecimiento es función de la formación inicial de las burbujas y de la presión exterior.

Una vez formada la burbuja, puede ocurrir que cambien las condiciones del medio que la rodea y que dicha burbuja *colapse*. El colapso de una burbuja induce una onda de presión en el medio que la rodea. Localmente, los niveles de presión no son muy elevados pero sus efectos pueden ser catastróficos por actuar normalmente sobre superficies muy reducidas. El colapso es un fenómeno catastrófico en el que la burbuja disminuye drásticamente su tamaño. Afecta, por tanto, de un modo no estacionario sobre la resistencia de los materiales donde colapse (ver figuras 6.5 y 6.6).

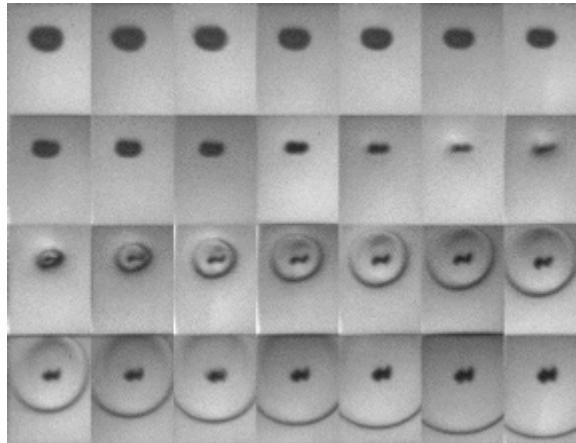


Figura 6.5.- Colapso de una burbuja en un flujo libre.

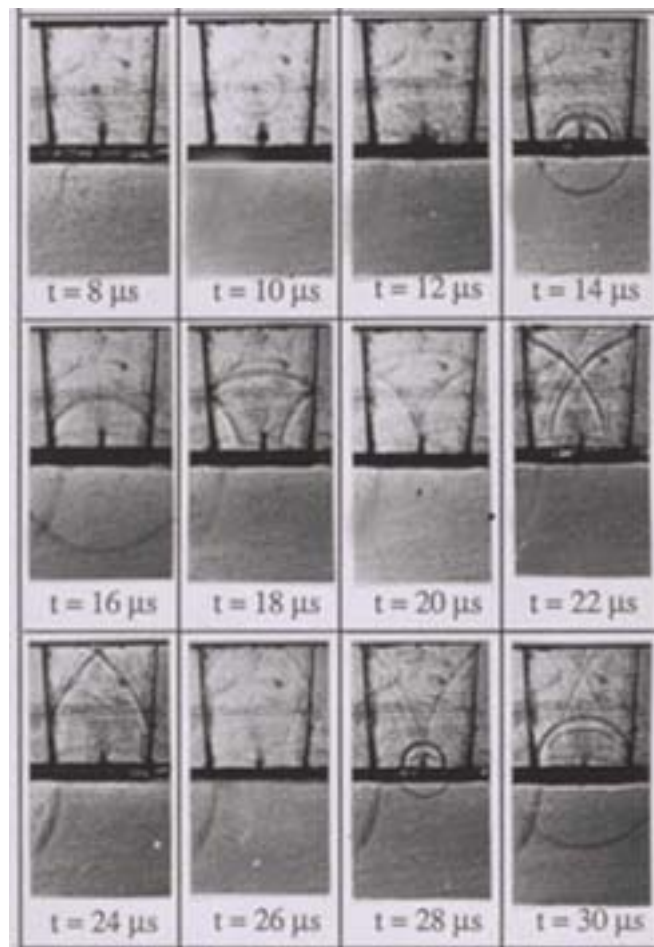


Figura 6.6.- Colapso de una burbuja en la zona de una superficie sólida.
(Se puede ver la evolución temporal del frente de presión creado).

Tipos de cavitación:

Se puede clasificar la cavitación según la forma en la que se produce, según el grado de desarrollo de la misma y según la forma de manifestarse macroscópicamente.

a) Según la forma de producirse la cavitación (apartado anterior) se distinguen los siguientes tipos:

- Cavitación de vapor: debida a la disminución local de la presión en el seno de un líquido. Puede ser **hidrodinámica**, creada por depresiones locales debidas a la aceleración del fluido, o **acústica**, debida a ondas de presión transmitidas en el fluido.

- Cavitación gaseosa: ocasionada por la introducción desde el exterior de energía en puntos del líquido (aumento de la temperatura, inducir vibración local de las partículas, etc.). Se habla entonces de cavitación **óptica** o cavitación **de partículas**.

b) Según el grado de desarrollo, se distinguen:

- Cavitación **incipiente**: es una etapa inicial de la cavitación en la que empieza a ser visible la formación de las burbujas.

- Cavitación **desarrollada**: se trata de una etapa en la que se tiene un número de burbujas lo suficientemente elevado como para producir una modificación del campo hidrodinámico.

- **Supercavitación**: cuando se tiene una superficie sólida sumergida, la cavitación se extiende ocupando en su totalidad dicha superficie. Aparece, por ejemplo, en las hélices de lanchas rápidas en las que las condiciones ante la cavitación son críticas.

- Cavitación **separada**: etapa final de la cavitación, cuando está próxima a desaparecer. Se produce normalmente en las zonas de estela y su importancia es mucho menor que las anteriores.

c) Según su manifestación macroscópica (morfología), se pueden distinguir las siguientes (ver figuras 6.7 y 6.8):

- Cavitación **de burbujas aisladas** (bubble cavitation). Cuando el número de burbujas es muy denso da lugar a la llamada cavitación **de nube** (cloud cavitation).

- Cavitación **de lámina** (sheet cavitation).

- Cavitación **de vórtice** (vortex cavitation).

- Cavitación **de estría** (streak cavitation), es un tipo de cavitación de burbujas, en la que la nucleación de las mismas se produce siguiendo una línea.

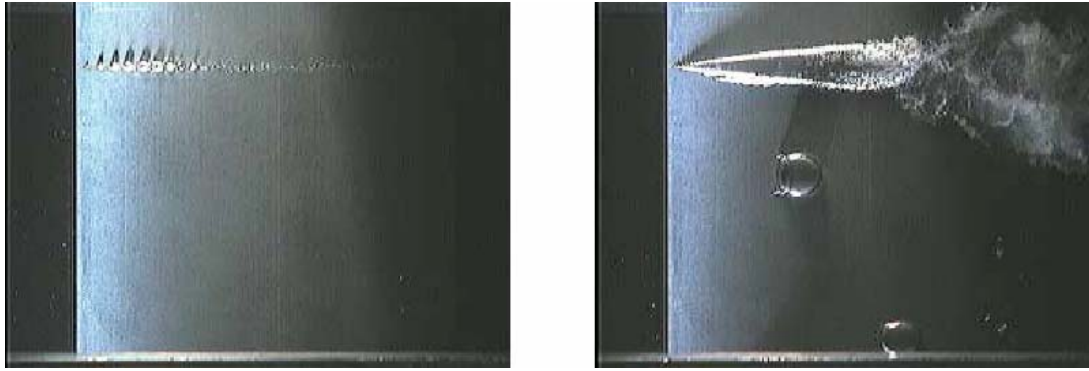


Figura 6.7.- Cavitación de burbujas y de estría.

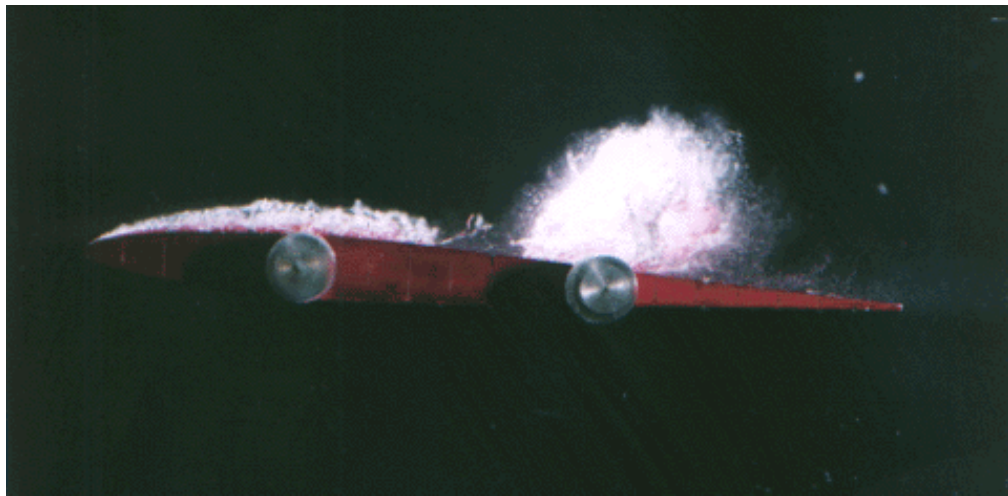


Figura 6.8.- Cavitación de lámina y de nube.

6.1.2. Efectos y consecuencias de la cavitación en las turbomáquinas.

Bloqueo. Obviamente, la aparición de burbujas (ver figura 6.9) hace que la sección de paso del flujo disminuya. Este hecho hace que el flujo se acelere y, por tanto, la presión disminuya más todavía.

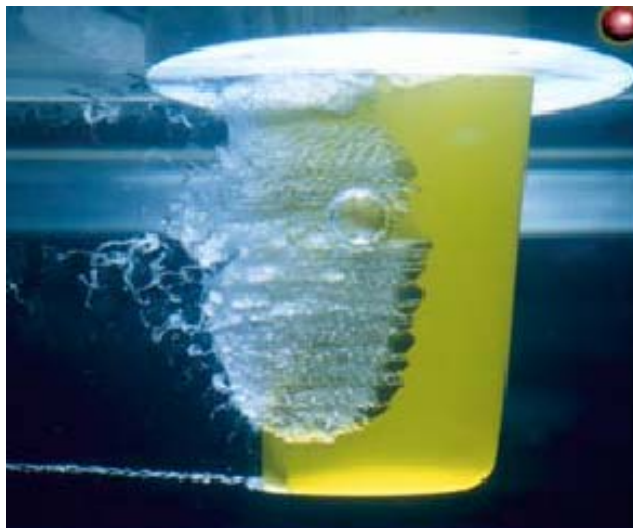


Figura 6.9.- Bloqueo de la sección de paso útil al producirse la cavitación.

Pérdida de prestaciones. Uno de los efectos estáticos más negativos de la cavitación es la pérdida de prestaciones. Por ejemplo, la curva característica de una bomba en la que aparece cavitación cae bruscamente a altos caudales (ver figura 6.10).

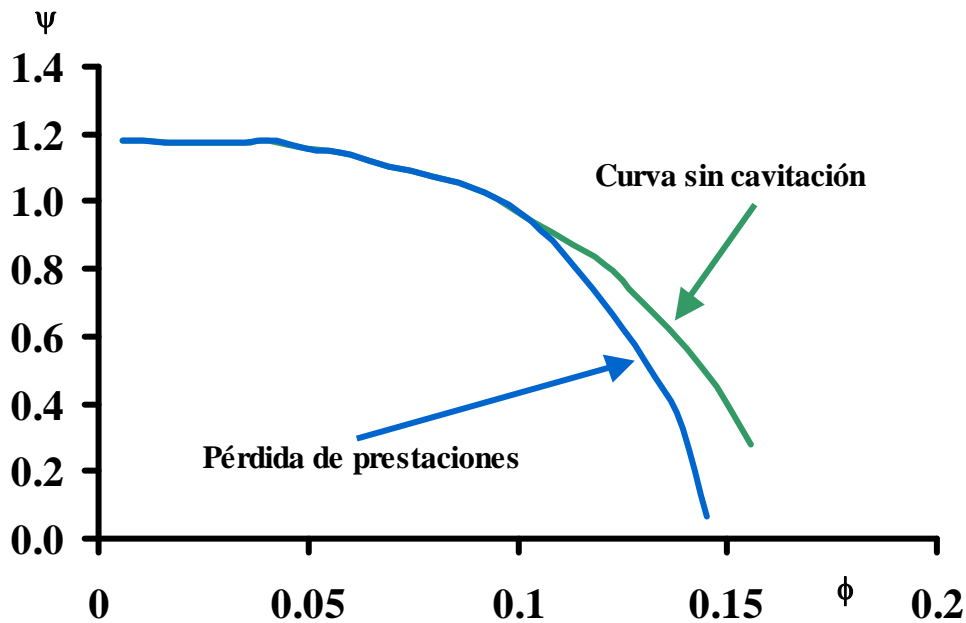


Figura 6.10.- Comparación de dos curvas características para una bomba centrífuga con y sin cavitación.

Inestabilidades (carga parcial). Cuando una bomba opera a bajos caudales aparece un fenómeno altamente no estacionario en la zona de succión de la bomba. Se produce una recirculación del flujo, con zonas sometidas a flujo reverso. Los patrones de velocidad muestran una componente axial negativa, que se denomina precisamente “funcionamiento en flujo reverso” y una componente tangencial no nula denominada “prerrotación”. La aparición de este patrón de flujo constituye un límite inferior de funcionamiento para la bomba. Si la bomba estuviera funcionando a esos caudales, su vida útil se reduciría notablemente, por la aparición de oscilaciones bruscas que acabarían dañando las partes mecánicas.

Vibraciones y ruido. El continuo colapso de las burbujas de cavitación produce un fenómeno vibratorio que se transmite a través de los conductos o estructura y produce molestas oscilaciones y ruido, especialmente peligrosos si la frecuencia asociada con el fenómeno de la cavitación entra en resonancia con alguna frecuencia propia de la estructura.

Erosión. El efecto más indeseado de la cavitación es precisamente éste. Los álabes de las máquinas, sometidos a un continuo proceso de colapso de las burbujas en su proximidad, acaban teniendo problemas serios de desgaste, que pueden terminar con el álabe y, por tanto, con las prestaciones de la máquina.

En la figura 6.11 se muestra un ejemplo del estado de un álabe de turbina tras pocas horas de funcionamiento.



Figura 6.11.- Daño en un álabo debido a la cavitación de nube.

6.1.3. Lugares de posible aparición de la cavitación.

La cavitación aparece en cualquier posición de una turbomáquina de flujo incompresible donde la presión disminuya por debajo de la presión de vapor.

Si se trata de bombas, los lugares más susceptibles para la aparición de la cavitación son la entrada (baja presión, ver figura 6.12) y la zona de la lengüeta (si se trata de una bomba centrífuga, figura 6.13). El que se produzca en una zona o en otra depende, básicamente, del punto de funcionamiento (caudal). El estudio particular para cavitación en bombas se desarrolla en la lección 9.

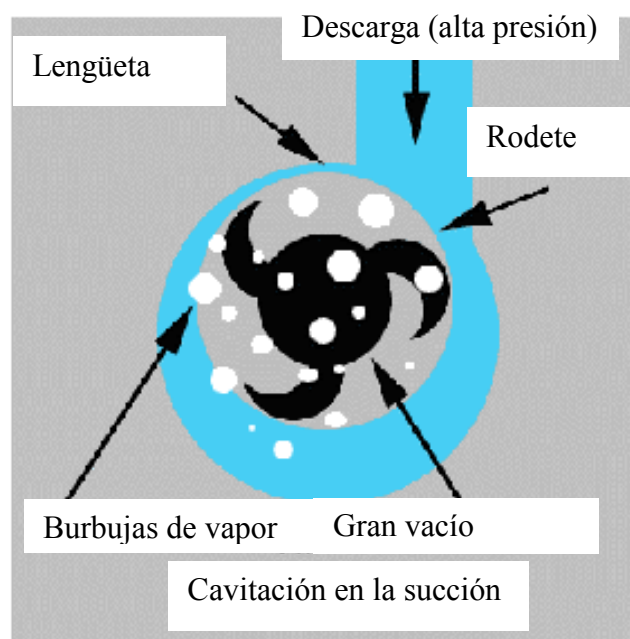


Figura 6.12.- Formación de cavitación en la zona de entrada.

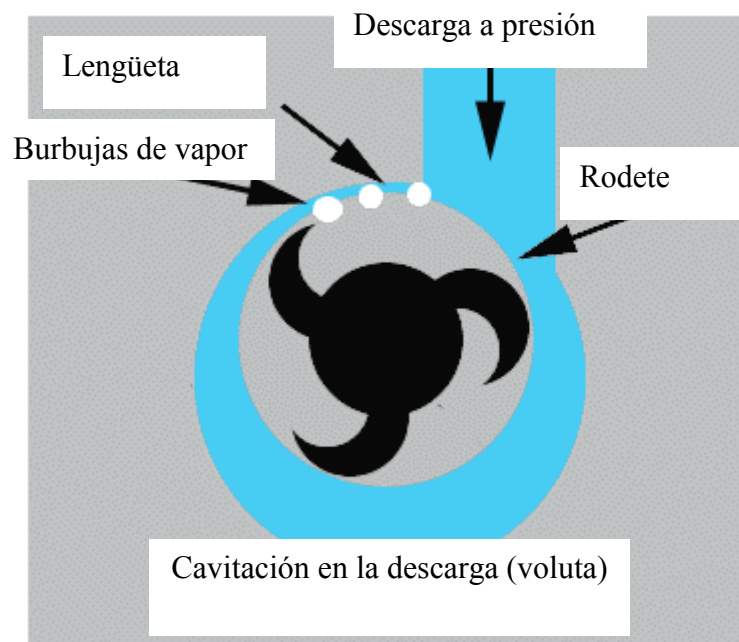


Figura 6.13.- Cavitación en la zona de la lengüeta.

En el caso de turbinas, la zona crítica para aparición de la cavitación será la de la salida. La cavitación en turbinas se analiza en la lección 10.

6.1.4. Técnicas de detección de la cavitación.

Dadas las características del fenómeno, se puede comprobar fácilmente la aparición de cavitación. Las vibraciones y el ruido generados alertan a cualquiera sobre la presencia del fenómeno. Sin embargo, se busca definir el punto exacto de aparición del problema. Para ello, se pueden seguir dos métodos: el de la caída en las prestaciones y el de la medición del ruido generado.

Observando las prestaciones de una determinada máquina, se puede inferir la aparición de cavitación cuando estas prestaciones varíen un determinado porcentaje sin modificar el punto de funcionamiento de la misma. En concreto, en la figura 6.14 se muestra la detección de la cavitación para una bomba, aplicando el criterio habitual del 3%. Se usan también los criterios del 1% y del 5%. El 1% está en el límite de la precisión de los sistemas de medida habituales y el 5% o superiores darían lugar a deterioro de los álabes funcionando con esa condición de cavitación. Por lo tanto, el criterio del 3% es el más extendido en las medidas para la determinación del inicio de cavitación.

Por medio de mediciones acústicas (figura 6.15) se puede también detectar la aparición de cavitación por el brusco incremento en los niveles de ruido que se obtienen. En dicha figura se muestran las mediciones realizadas en la aspiración de una bomba.

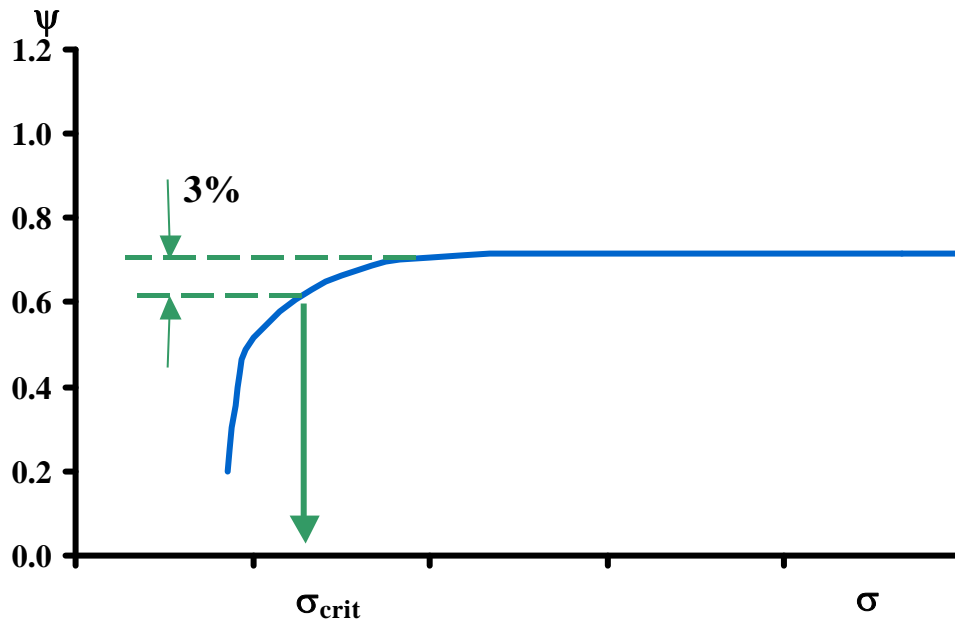


Figura 6.14.- Detección de la cavitación a partir de la pérdida de prestaciones.

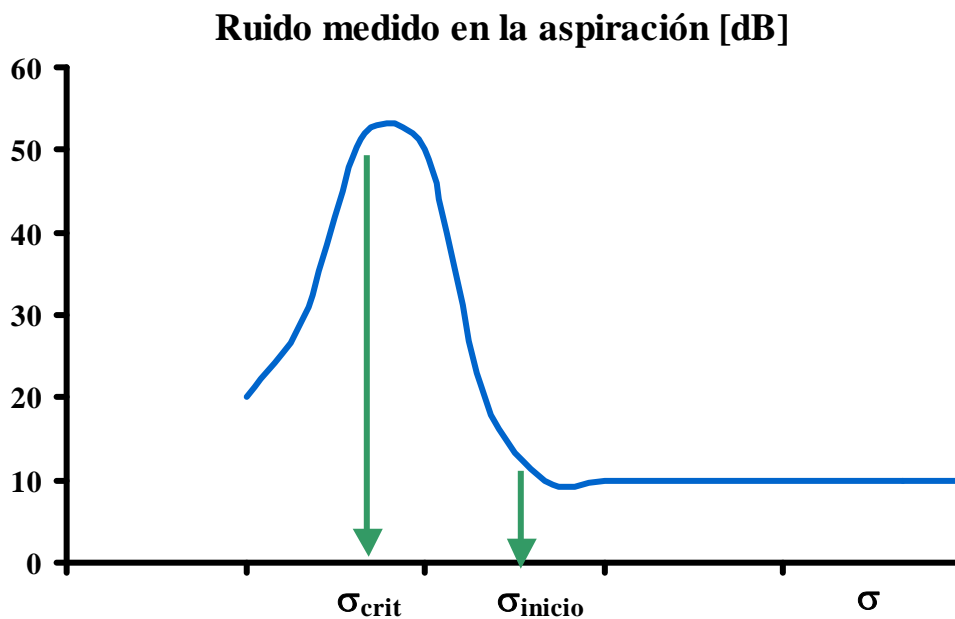


Figura 6.15.- Detección de la cavitación por medio de medidas de ruido.

6.2. LA CAVITACIÓN EN LAS BOMBAS.

Se detallan en este apartado las condiciones de funcionamiento de las bombas en las que puede aparecer cavitación. En particular, se estructura este apartado en los siguientes puntos:

- 6.2.1. Tipos de cavitación en bombas.
- 6.2.2. Definiciones de NPSH disponible y requerido. Factores que influyen en el NPSH.
- 6.2.3. Curvas altura de elevación-NPSH disponible.

6.2.4. Curvas NPSH requerido-Caudal.

6.2.5. Efectos de la cavitación en las curvas características según el tipo de bomba.

6.2.6. Índice de aspiración.

6.2.1. Tipos de cavitación en bombas.

Casi todos los tipos de cavitación mencionados en la lección anterior pueden aparecer en el interior de una bomba. Normalmente, y por simplicidad en los análisis, se suele hablar de cavitación de superficie (burbujas o lámina) y cavitación de vórtice (principalmente de vórtice de punta en el espaciado de punta de los álabes, pero también puede ser de vórtice en la entrada como se muestra en la figura 6.16).

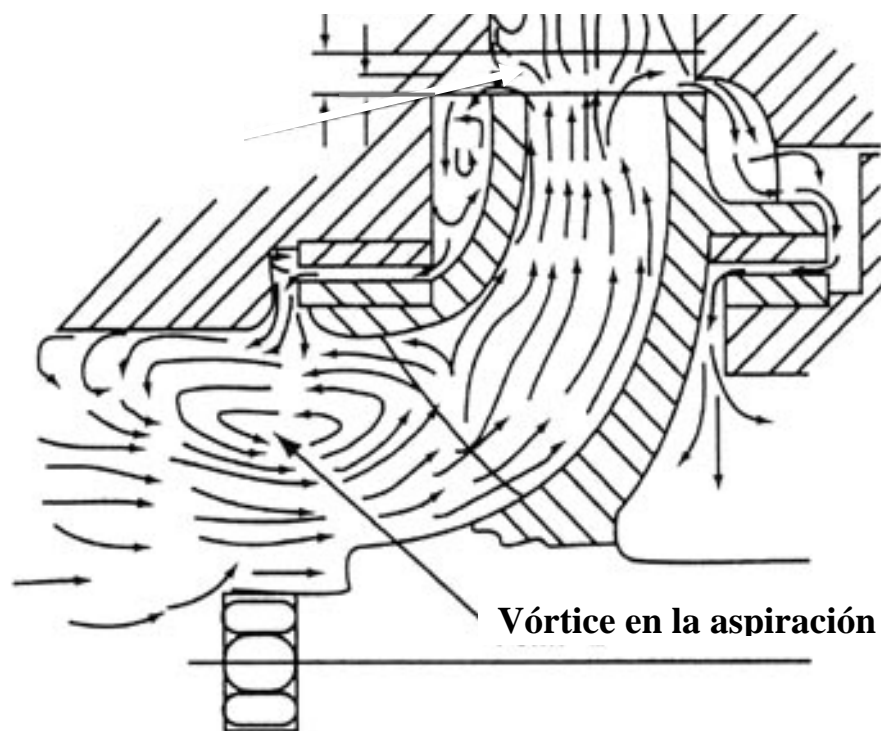


Figura 6.16.- Vórtice en la entrada a carga parcial.

La cavitación en bombas es un fenómeno que depende de las propiedades del fluido (presión de vapor, tensión superficial, contenido de aire, pureza, etc.) y de la geometría de la bomba (curvatura, solidez, esquinas, rugosidad superficial, etc.).

Resulta crítico el diseño de la zona de aspiración (oído) de la bomba dado que esa zona es la de menor presión y con mayor susceptibilidad de aparición de cavitación.

Precisamente, una posibilidad de diseño contra cavitación en la aspiración es la colocación de inductores en la aspiración. Estos elementos (normalmente se trata de etapas axiales colocadas antes del rodete principal, según se muestra en la figura 6.17) están diseñados de forma que operan a bajos ángulos de incidencia y con álabes muy delgados que minimizan la perturbación en el flujo y que incrementan la presión gradualmente dando lugar a una disminución del peligro de cavitación.

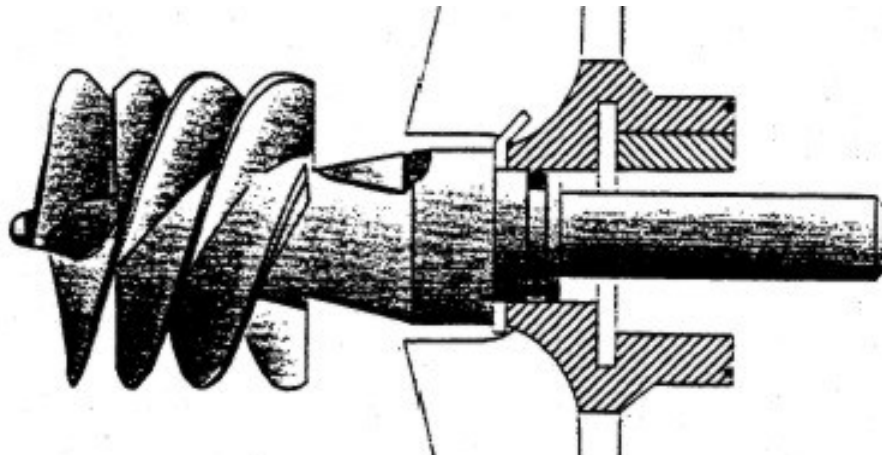


Figura 6.17.- Inductor: etapa axial colocada a la entrada de una bomba.

El ángulo de entrada del álabe también tiene gran importancia, pues la posibilidad de choque en la entrada aumenta mucho la aparición de vórtices de entrada, que pueden conducir a la cavitación.

El diámetro de entrada condiciona las velocidades en la entrada (relativa y absoluta) y, por tanto, es un parámetro de diseño muy importante. En esta lección se obtendrá un valor óptimo para este diámetro que minimice la posibilidad de cavitación.

Se debe tener en cuenta también el contenido en aire del líquido bombeado. Si este parámetro resulta crítico, se intercalan agitadores o cámaras de remanso que permitan la mayor desaparición del aire contenido en el agua antes de la etapa de bombeo.

También influye la temperatura de funcionamiento por modificar el valor de la presión de vapor, tal y como se mostró en la lección anterior.

6.2.2. Definiciones de NPSH disponible y requerido. Factores que influyen en el NPSH.

El NPSH o Net Positive Suction Head, es decir, altura neta positiva en la aspiración constituye una medida de la energía (o altura, por tratarse de flujo incompresible) disponible en la aspiración de la bomba por encima de la energía (altura) que daría lugar a la aparición de cavitación.

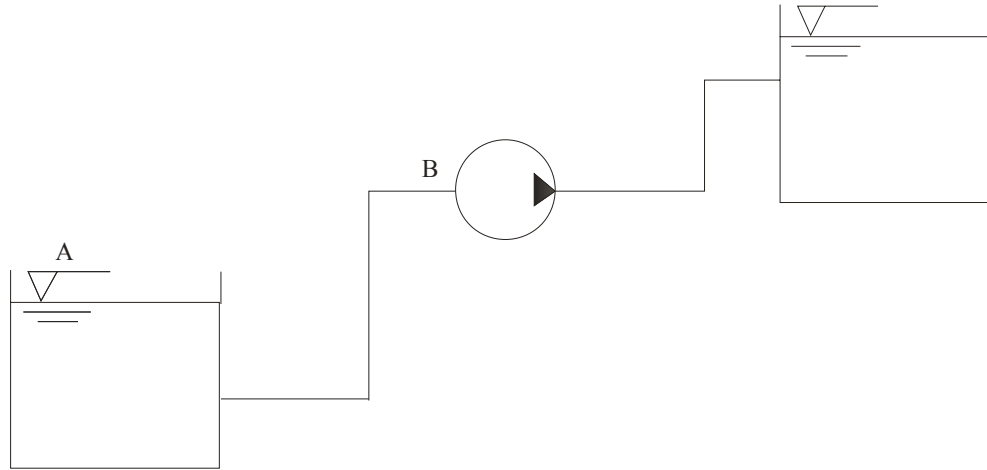


Figura 6.18- Disposición típica de elementos en un circuito de bombeo.

Para el circuito de la figura 6.18 en régimen estacionario y siendo el fluido incompresible, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli, teniendo en cuenta las pérdidas en el conducto de aspiración (h_{pA-B}), es decir:

$$\frac{P_B}{\rho g} = \frac{P_A}{\rho g} - (Z_B - Z_A) - \frac{V_B^2}{2g} - h_{pA-B} \quad (6.1)$$

A la entrada de la bomba hay una caída de presión que normalmente se relaciona con la velocidad absoluta y relativa en el rodete, según expresiones experimentales del tipo:

$$\Delta P = \lambda_1 \frac{W_1^2}{2g} + \lambda_3 \frac{V_1^2}{2g} \quad (6.2)$$

Si ahora introducimos esta expresión en la ecuación deducida anteriormente, se tiene que la presión mínima en la entrada de los álabes (aspiración) es:

$$\frac{(P_B)_{\min}}{\rho g} = \frac{(P_B - \Delta P) - P_V}{\rho g} = \frac{P_A}{\rho g} - \left[(Z_B - Z_A) + \frac{P_V}{\rho g} + h_{pA-B} \right] - \lambda_1 \frac{W_1^2}{2g} - (\lambda_3 + 1) \frac{V_1^2}{2g} \quad (6.3)$$

$$\underbrace{\frac{P_A}{\rho g} - \left[(Z_B - Z_A) + \frac{P_V}{\rho g} + h_{pA-B} \right]}_{\text{Función del circuito (NPSHdisponible)}} \geq \underbrace{\lambda_1 \frac{W_1^2}{2g} + \lambda_2 \frac{V_1^2}{2g}}_{\text{Función de la geometría (NPSHrequerido)}} \quad (6.4)$$

Otras veces, se establece esta relación en función de la variable caudal, según la expresión:

$$\text{NPSHr} = \lambda_4 \cdot Q^2 \quad (6.5)$$

Por tanto, la condición se resume en la siguiente desigualdad:

$$\text{NPSHd} \geq \text{NPSHr} \quad (6.6)$$

Los factores que afectan al NPSH son básicamente:

- Parámetros físicos: ρ , P_a y P_v
- Parámetros geométricos: ΔZ , h_p ,
- Parámetros de la aspiración.

La bomba se debe diseñar de forma que las velocidades sean lo menores posibles, y de forma que la estanqueidad sea lo mayor posible (evitar la entrada de aire, que aceleraría el crecimiento de las burbujas). Para ello se suele prestar especial atención al diseño de la aspiración (variación suave de las geometrías en esa zona) de forma que se disminuyan las pérdidas por posibles choques y por fricción.

6.2.3. Curvas altura de elevación-NPSH disponible.

Uno de los efectos de la cavitación es su efecto sobre las prestaciones hidráulicas estacionarias. Se pueden obtener entonces los valores del NPSH de forma experimental. A continuación se detalla el procedimiento seguido.

Se hace trabajar a la bomba primero con una suficiente altura de líquido por encima de la cota de la aspiración (de forma que se obtengan las prestaciones sin cavitación, figura 6.19) y se va reduciendo dicha altura (incluso haciéndola negativa).

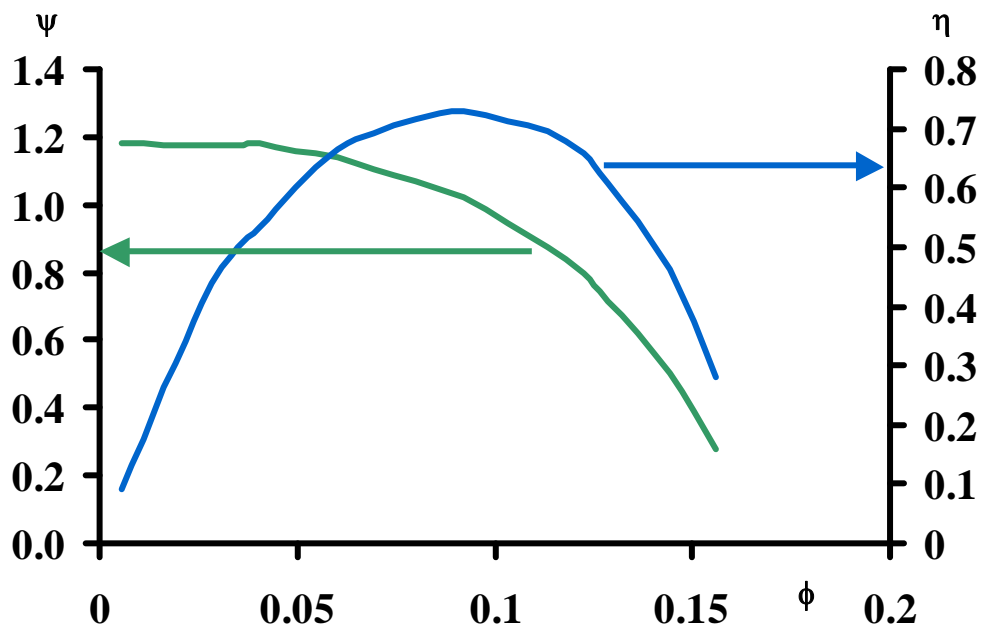


Figura 6.19.- Curva de prestaciones sin cavitación.

A partir de la expresión 6.4 es directa la relación entre el número de cavitación (definido en la lección anterior) y el NPSHr. De esta forma, experimentalmente se obtienen curvas del tipo de la mostrada en la figura 6.20, que indicarían la aparición de cavitación. Normalmente se utiliza el criterio del 3% en la caída de prestaciones, por considerarse suficientemente significativa y conservadora en cuanto a los posibles efectos negativos de la cavitación.

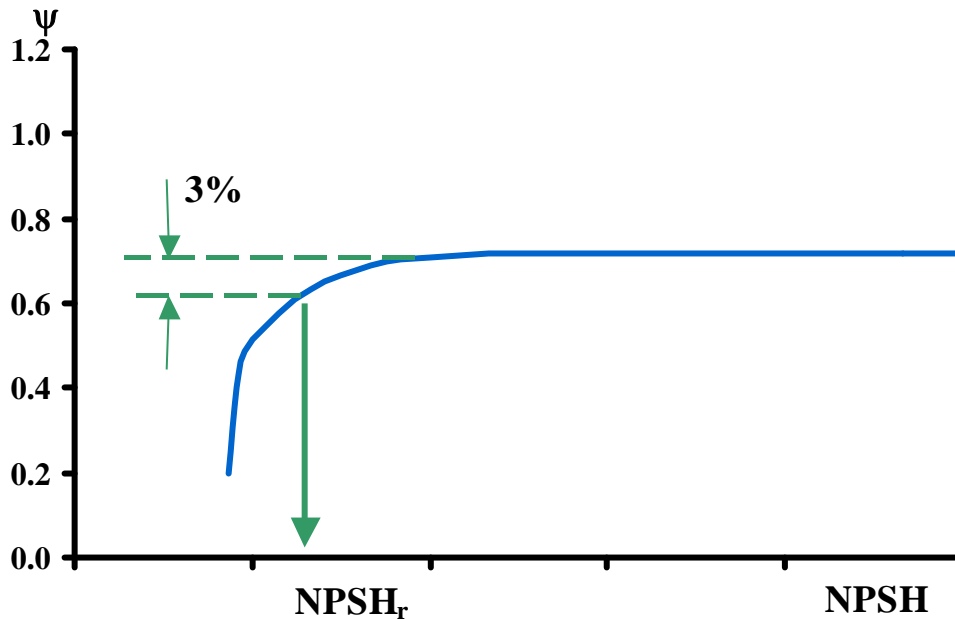


Figura 6.20.- Obtención del NPSH requerido experimentalmente.

6.2.4. Curvas NPSH requerido-Caudal.

El procedimiento detallado en el apartado anterior se realiza para todo el rango de caudales de funcionamiento de la bomba, obteniéndose experimentalmente el valor del NPSHr en función del caudal.

La forma típica de estas curvas se muestra en la figura 6.21 donde se observa un crecimiento del valor de dicho parámetro frente al caudal. El crecimiento es exponencial y se obtienen valores cercanos al de la altura de elevación sólo a caudales elevados (se ha representado el valor del NPSHr multiplicado por 3).

Por simplificar los cálculos, a veces, se aproxima dicha curva por una parábola (ecuación 6.5) en la que a partir de los datos experimentales se obtendría el valor de la constante de proporcionalidad (λ_4).

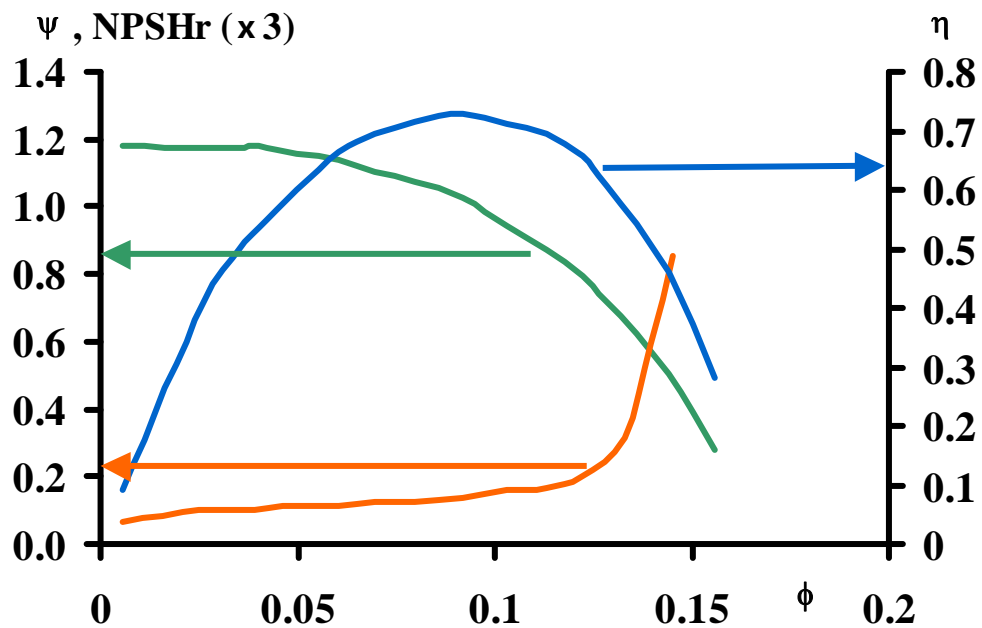


Figura 6.21.- Curva de prestaciones, rendimiento y NPSHr de una bomba.

6.2.5. Efectos de la cavitación en las curvas características según el tipo de bomba.

En ambos casos se produce una caída de las prestaciones, ruido y vibraciones, además de la lógica modificación del campo de velocidad y presión en su interior. El efecto de caída en la curva de prestaciones es mayor en el caso de bombas centrífugas que en el caso de máquinas axiales por la menor relación ancho/dimensión longitudinal. (mayor facilidad de bloqueo).

En la figura 6.22 se muestra un ejemplo de caída de prestaciones comparativa para los dos tipos de rodets.

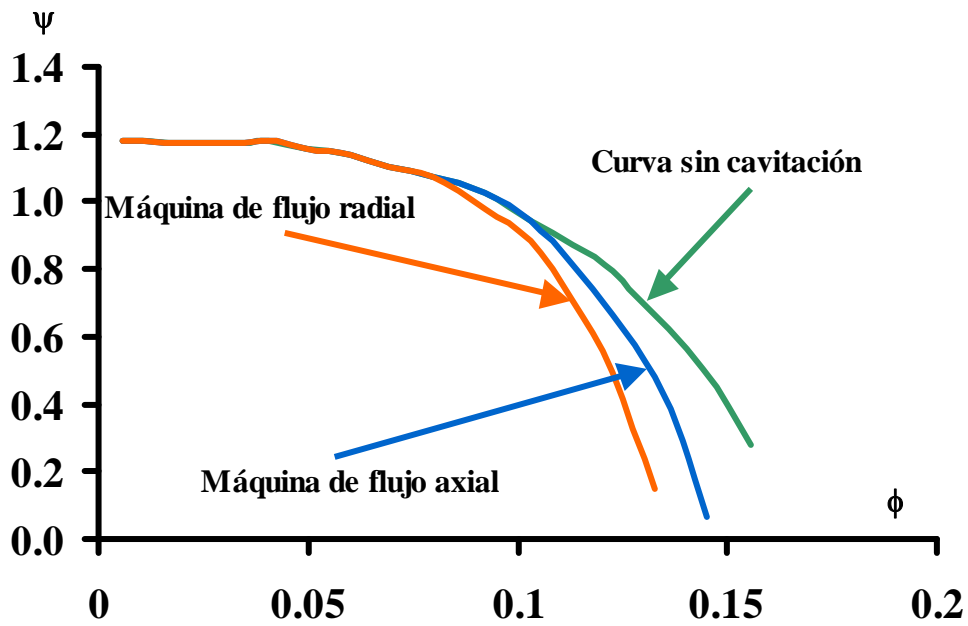


Figura 6.22.- Comparación de la pérdida de prestaciones en máquinas de flujo radial y de flujo axial.

6.2.6. Índice de aspiración.

Dado que la velocidad en la aspiración resulta ser un parámetro crítico, se ha buscado un parámetro adimensional que caracterice la cavitación en bombas. Se llegó a la definición del denominado índice de aspiración (S). Se parte del triángulo de velocidad a la entrada (ver figura 6.23):

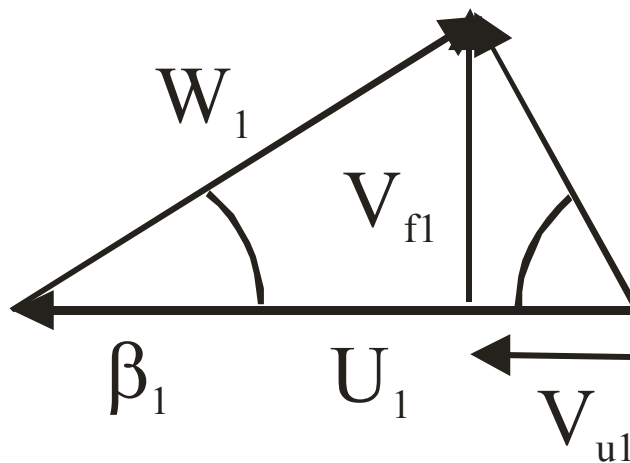


Figura 6.23.- Triángulo de velocidad a la entrada con pre-rotación.

Y se define el parámetro ξ tal que: $V_{u1} = U_1(1 - \xi)$. A partir de esta definición, se obtienen las relaciones:

$$V_{f1} = \xi U_1 \tan\beta_1 \tag{6.7}$$

$$W_1^2 = \left(\frac{\xi U_1}{\cos\beta_1} \right)^2 = \left(\frac{\xi}{\cos\beta_1} \right)^2 U_1^2 \quad (6.8)$$

y, finalmente:

$$V_1^2 = U_1^2 [\xi^2 \tan^2\beta_1 + (1-\xi)^2] \quad (6.8)$$

Por otro lado, en función del diámetro del cubo, se puede obtener una expresión para el caudal de entrada:

$$Q = \left(1 - \frac{D_C^2}{D_1^2} \right) \frac{\pi D_1^2}{4} V_{fl} = \frac{k \pi \xi}{4} U_1 D_1^2 \tan\beta_1 = \frac{A \pi \xi}{8} \omega D_1^3 \tan\beta_1 \quad (6.9)$$

Expresión de donde se puede despejar el diámetro a la entrada:

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{8 Q}{k \pi \xi \omega \tan\beta_1}} \quad (6.10)$$

Se había definido el NPSHr como: $NPSHr = \lambda_1 \frac{W_1^2}{2g} + \lambda_2 \frac{V_1^2}{2g}$. Si ahora se sustituye en esta expresión el valor de W_1 y de V_1 en función de U_1 , se obtiene:

$$NPSHr = \frac{\omega^2}{8g} \left(\frac{8 Q}{k \pi \xi \omega \tan\beta_1} \right)^{2/3} \left[\lambda_1 \frac{\xi^2}{\cos^2\beta_1} + \lambda_2 (\xi^2 \tan^2\beta_1 + (1-\xi)^2) \right] \quad (6.11)$$

Se puede despejar el siguiente parámetro adimensional:

$$\frac{\omega^2 Q}{k (g NPSHr)_2^3} = \frac{\sqrt{8} \pi \tan\beta_1}{\xi^2} \left[\lambda_1 \frac{\xi^2}{\cos^2\beta_1} + \lambda_2 (\xi^2 \tan^2\beta_1 + (1-\xi)^2) \right]^{-3/2} \quad (6.12)$$

Que es función de ξ y de β_1 . Si $\xi = 1$ (sin prerrotación) se puede representar gráficamente con una única gráfica y se puede obtener el ángulo óptimo. Más común que el parámetro definido es el índice de aspiración:

$$S = \left(\frac{n}{100} \right)^2 \frac{Q}{k (NPSHr)_2^3} = \frac{2.49 \tan\beta_1}{\xi^2} \left[\lambda_1 \frac{\xi^2}{\cos^2\beta_1} + \lambda_2 (\xi^2 \tan^2\beta_1 + (1-\xi)^2) \right]^{-3/2} \quad (6.13)$$

Que, a diferencia del número definido anteriormente, si tiene dimensiones. Este índice de aspiración es el parámetro que normalmente sirve como semejanza ante cavitación. Habitualmente, se expresa en función de la velocidad específica:

$$S = \left(\frac{9}{100 \pi^2} \right) \frac{n_s^2}{k} \left(\frac{g H}{NPSHr} \right)^{\frac{3}{2}} \tag{6.14}$$

En la figura 6.24 se representa la ecuación 6.13 con $\lambda_1 = 0.29$ y $\lambda_2 = 1.32$ (valores típicos en bombas centrífugas). Se obtiene así el ángulo óptimo para dicha configuración sin prerrotación.

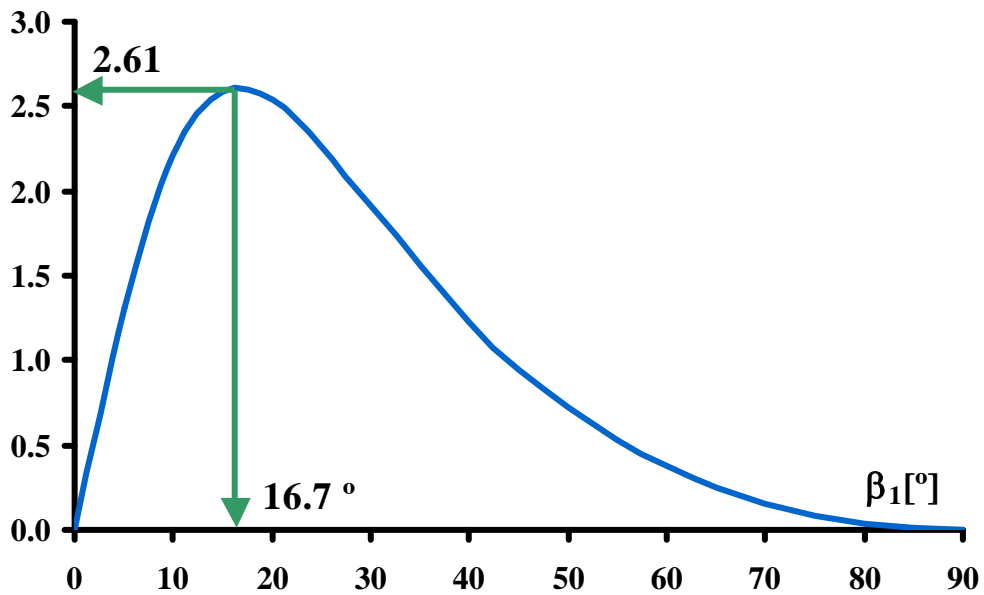


Figura 6.24.- Índice de aspiración sin pre-rotación ($\xi = 1$).

En la figura 6.25 se muestra la misma evolución del ángulo óptimo pero en función del índice de prerrotación (se obtiene calculando el máximo de S respecto a ξ). Se puede observar como una cierta prerrotación $\xi \approx 0.8$ constituye una condición óptima frente a la cavitación (mayor S) para las constantes utilizadas.

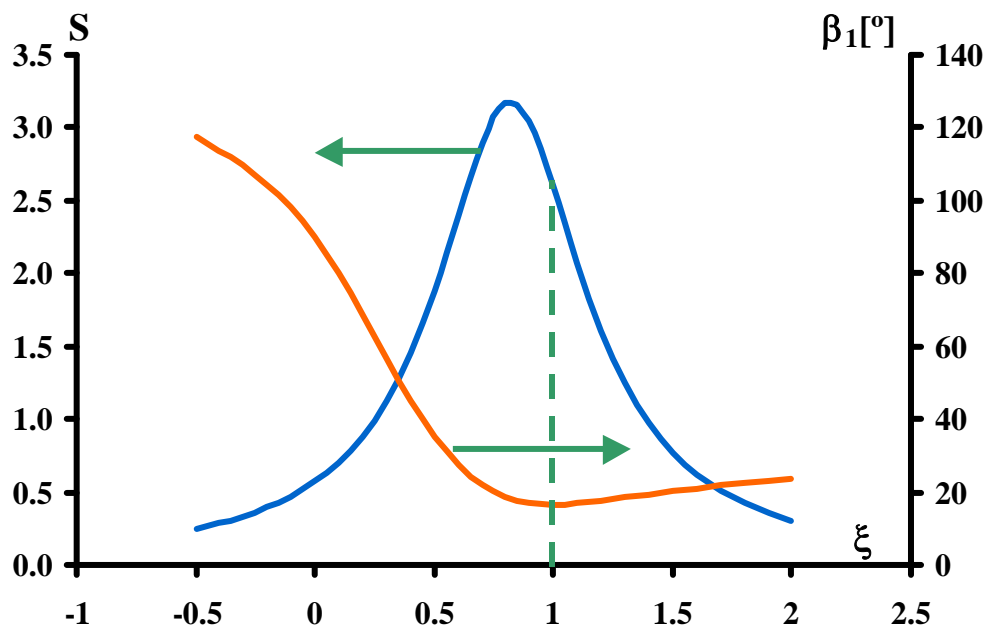


Figura 6.25.- Variación del ángulo óptimo y del índice de aspiración en función de la prerrotación.

6.3. LA CAVITACIÓN EN LAS TURBINAS.

Se muestran aquí las particularidades de la cavitación en máquinas receptoras (turbinas). Se estructura este apartado en los siguientes puntos más relevantes:

- 6.3.1. Tipos de cavitación en turbinas.
- 6.3.2. Mínima presión a la salida del rodete.
- 6.3.3. Emplazamiento de turbinas: sumergencia.
- 6.3.4. Coeficiente de cavitación de Thoma. Relación con la velocidad específica.

En paralelo a lo estudiado para las bombas, se trata de caracterizar la cavitación en las turbinas utilizando los parámetros habituales en dicha aplicación.

6.3.1. Tipos de cavitación en turbinas.

Aparte de los tipos vistos en bombas (burbujas, nube y vórtice, figura 6.26), hay posibilidad de aparición de una burbuja (cavitación de antorcha) en la sección central, que puede llegar hasta la descarga y aspirar aire (figura 6.27).

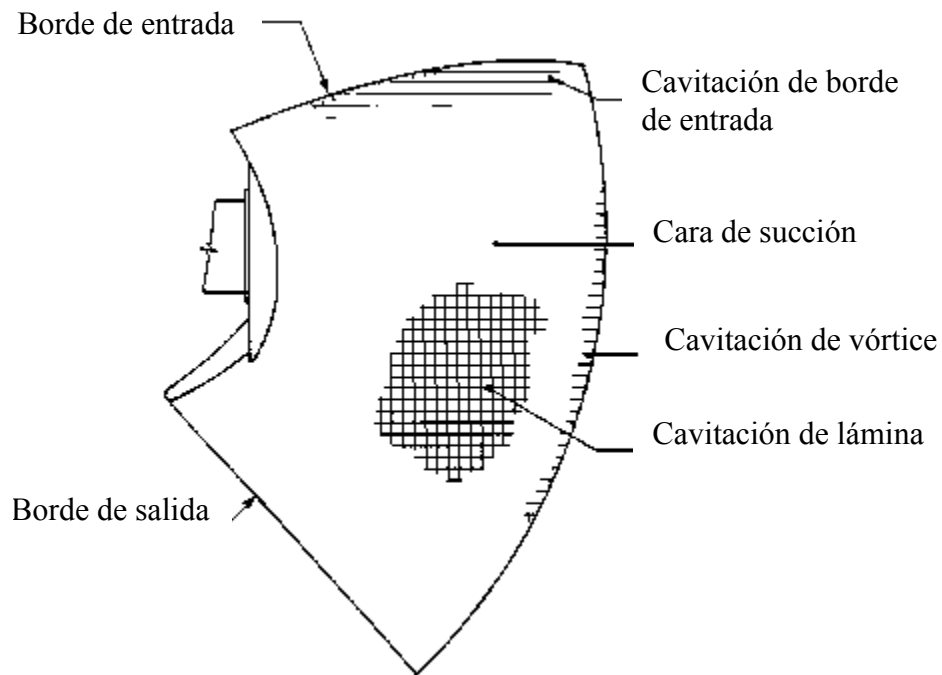


Figura 6.26.- Álabe de turbina mostrando las distintas zonas susceptibles de cavitación.



Figura 6.27.- Cavitación de antorcha en la salida de una turbina.

Las consecuencias también son similares al caso de las bombas: disminución de las prestaciones (caída del par y, por tanto, de la potencia útil), vibraciones y ruido, erosión de los álabes.

Al igual que en el caso de las bombas, se debe tener en cuenta también el contenido en aire del líquido bombeado y la temperatura de funcionamiento por modificar el valor de la presión de vapor. En este caso es crítico el diseño del conducto de descarga, que se debe diseñar de forma que las pérdidas de energía sean mínimas.

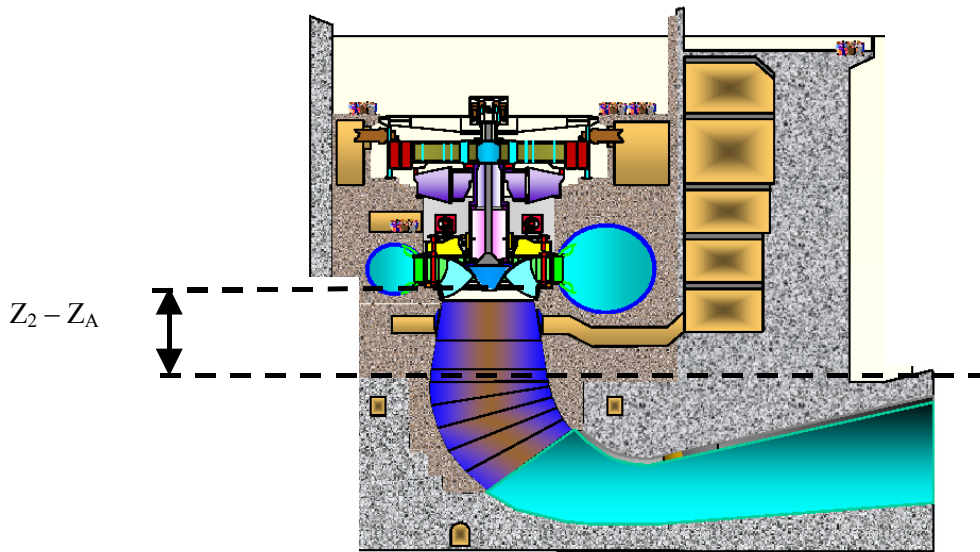


Figura 6.28.- Esquema tipo de instalación con una turbina de flujo radial (Francis).

6.3.2. Mínima presión a la salida del rodete.

La ecuación de la energía a la salida de la turbina (Bernoulli con las correspondientes pérdidas) presenta la forma (nomenclatura de las figuras 6.28 y 6.29):

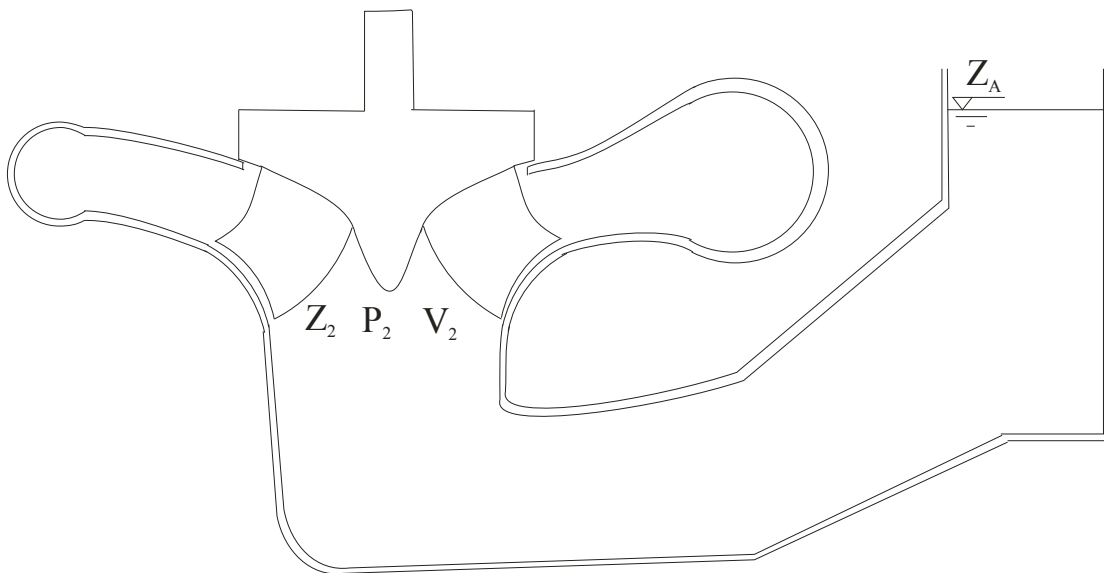


Figura 6.29.- Esquema de la salida de una turbina.

$$\frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_A}{\rho g} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} + h_{p2-A} \quad (6.15)$$

Se llega a la expresión:

$$\frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_A}{\rho g} - (Z_2 - Z_A) - \frac{V_2^2}{2g} + h_{P_{2-A}} \quad (6.16)$$

Lo habitual es que $P_A = P_{at}$. La diferencia entre la presión en la sección de salida y la presión de vapor es:

$$\frac{P_2 - P_V}{\rho g} = \frac{P_A - P_V}{\rho g} - (Z_2 - Z_A) - \frac{V_2^2}{2g} + h_{P_{2-A}} \quad (6.17)$$

de donde:

$$\frac{P_2 - P_V}{\rho g} = \frac{P_A}{\rho g} - (Z_2 - Z_A) - \left(\frac{P_V}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} - h_{P_{2-A}} \right) \quad (6.18)$$

Para un caudal de funcionamiento y una turbina dada, parece claro que si se aumenta ($Z_A - Z_2$), se aumenta el margen de cavitación.

6.3.3. Emplazamiento de turbinas: sumergencia.

Convendría, por tanto, que $(Z_2 - Z_A) \leq 0$, es decir, que la turbina estuviera más abajo del nivel del agua. A esta diferencia de cotas se le denomina *sumergencia*.

Sin embargo, hacer $(Z_2 - Z_A) \leq 0$ implica un mayor coste en las obras de instalación de la máquina (movimiento de tierras, etc.). Normalmente, las turbinas se sitúan por encima del nivel del agua aguas abajo, excepto si son máquinas de alta velocidad específica (por la razón que veremos en el apartado siguiente).

6.3.4. Coeficiente de cavitación de Thoma. Relación con la velocidad específica.

Respecto al análisis dimensional, para turbinas se define el llamado coeficiente de cavitación de Thoma (σ), utilizando los dos primeros términos de la derecha en la ecuación (6.4) y la altura de elevación consumida en la turbina, es decir:

$$\sigma = \left(\frac{\frac{P_A}{\rho g} - (Z_2 - Z_A)}{H} \right) \quad (6.19)$$

Dicho coeficiente es función de la velocidad específica (figura 6.30):

$$\sigma = f(n_S) \quad (6.20)$$

En dicha figura 6.30 se muestra como para altas velocidades específicas se requiere un mayor valor del coeficiente de cavitación de Thoma.

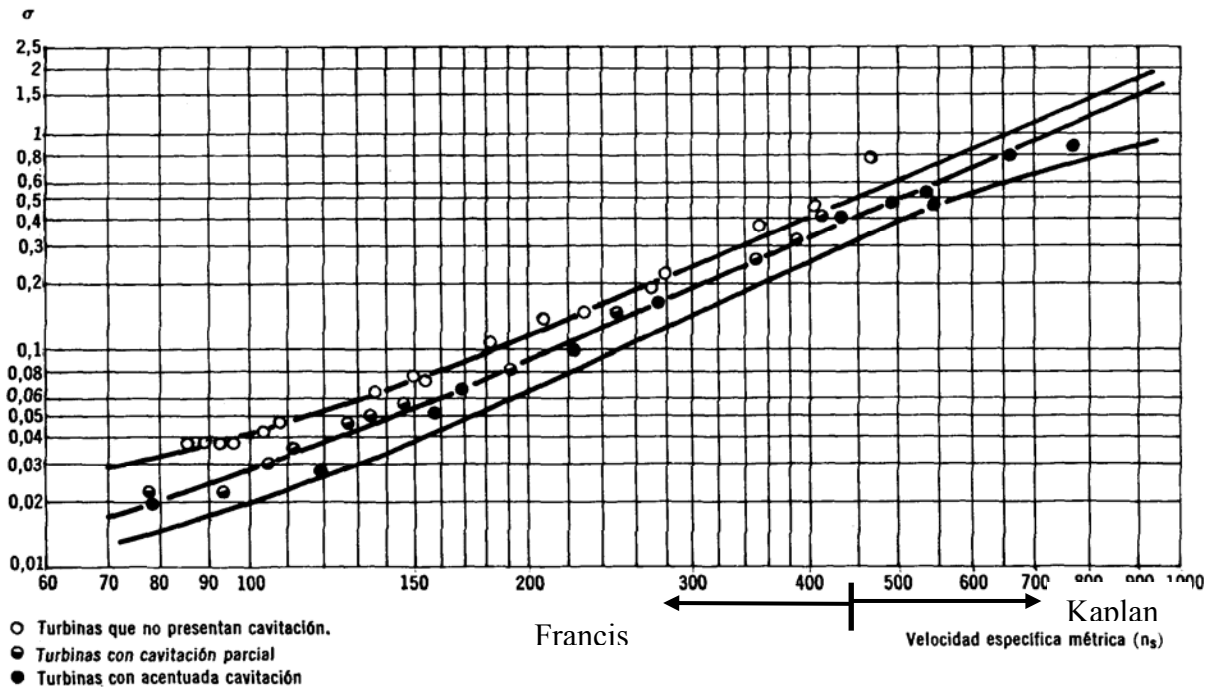


Figura 6.30.- Evolución del coeficiente de cavitación de Thoma en función de la velocidad específica de la turbina (Francis y Kaplan).

La velocidad específica para las turbinas se obtiene habitualmente siguiendo la expresión:

$$n_s = N \frac{\dot{W}^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (6.21)$$

con la particularidad de introducir la potencia \dot{W} en CV (1 CV = 735 W) y N (velocidad de giro) en rpm. Por tanto, se trata de una fórmula con dimensiones.

Se han realizado muchos esfuerzos por parte de los diseñadores para correlacionar con datos experimentales el valor de la función de la ecuación 6.21. En la figura 6.31 se muestran algunos ejemplos.

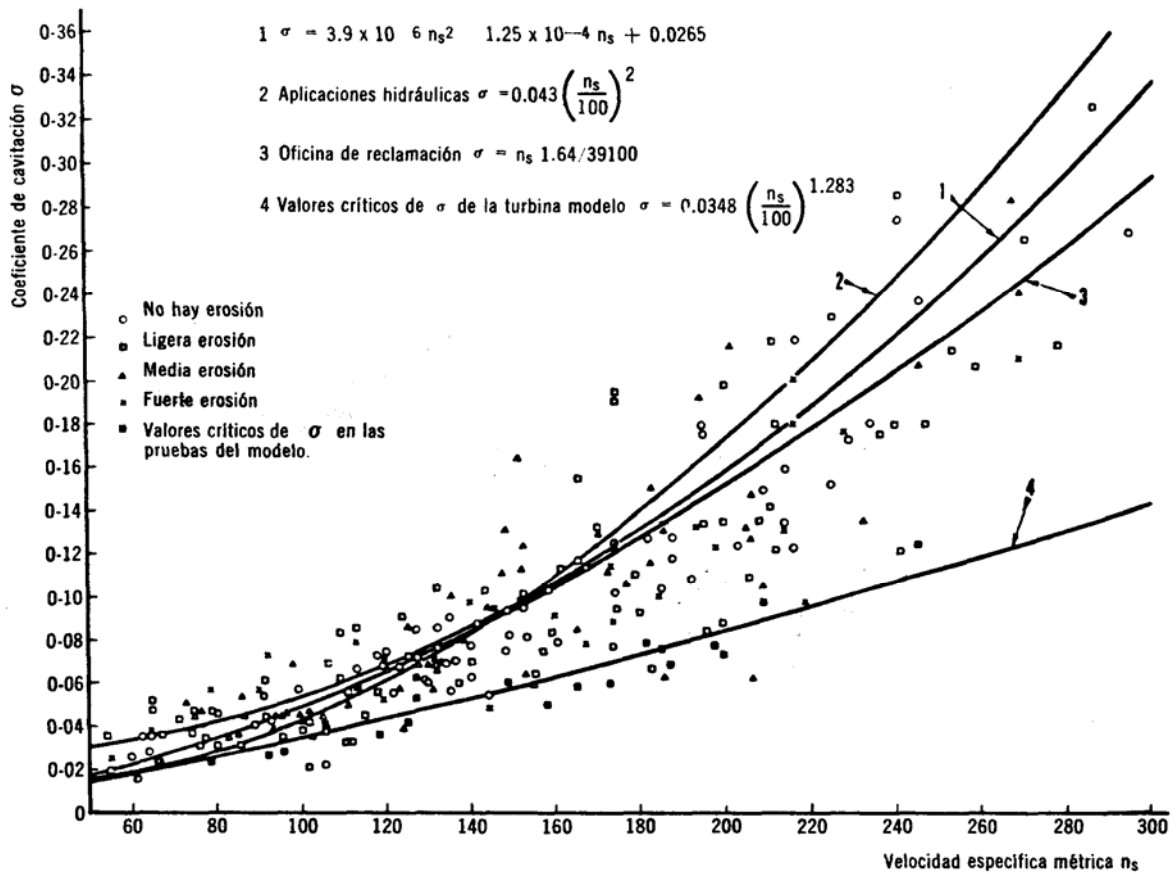


Figura 6.31.- Correlaciones experimentales para la obtención del coeficiente de cavitación en función de velocidad específica.

También a partir de los datos experimentales conocidos, se han definido límites para la velocidad específica en función del tipo de máquina y de la altura (H) en metros (figura 6.32)

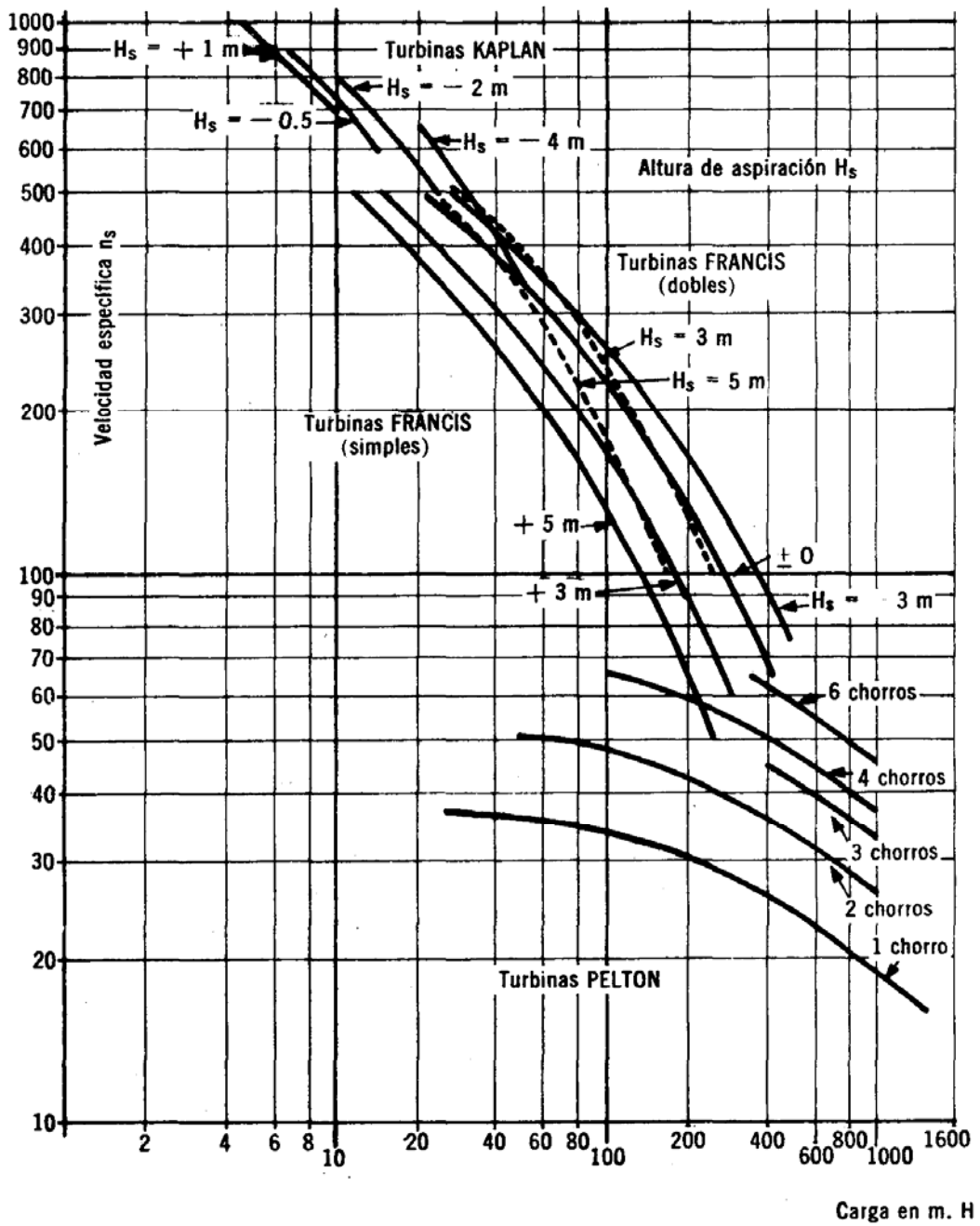


Figura 6.32.- Límite de cavitación para la velocidad específica en turbinas.