

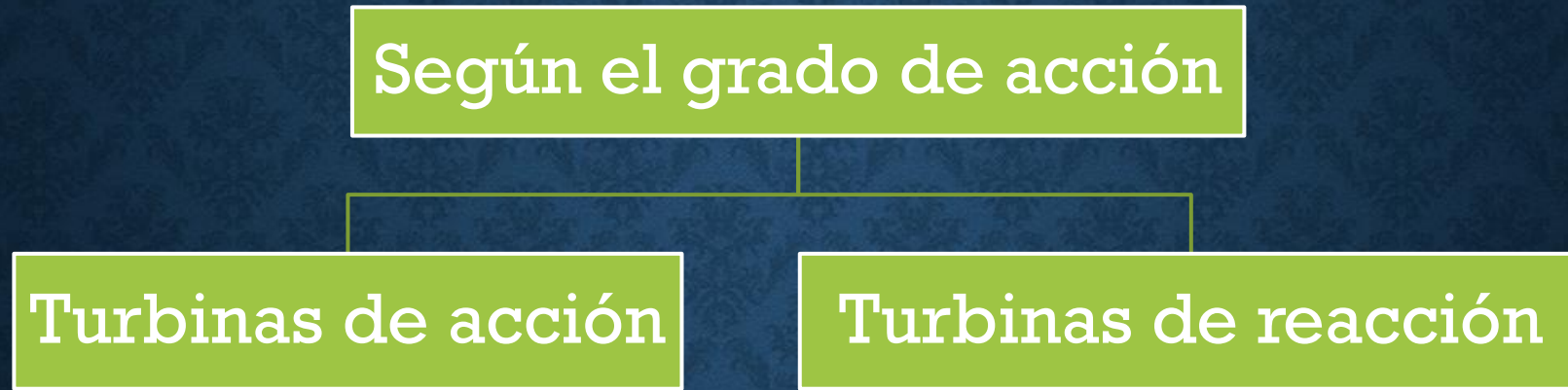
# MECÁNICA DE LOS FLUIDOS Y MÁQUINAS

UNIDAD N°11: Turbomáquinas hidráulicas: Turbinas hidráulicas

Docentes:

- Ing. RODRIGUEZ, Carlos
- Ing. CORREA, Gustavo
- Ing. POLISCZUK, Dario

# CLASIFICACIÓN



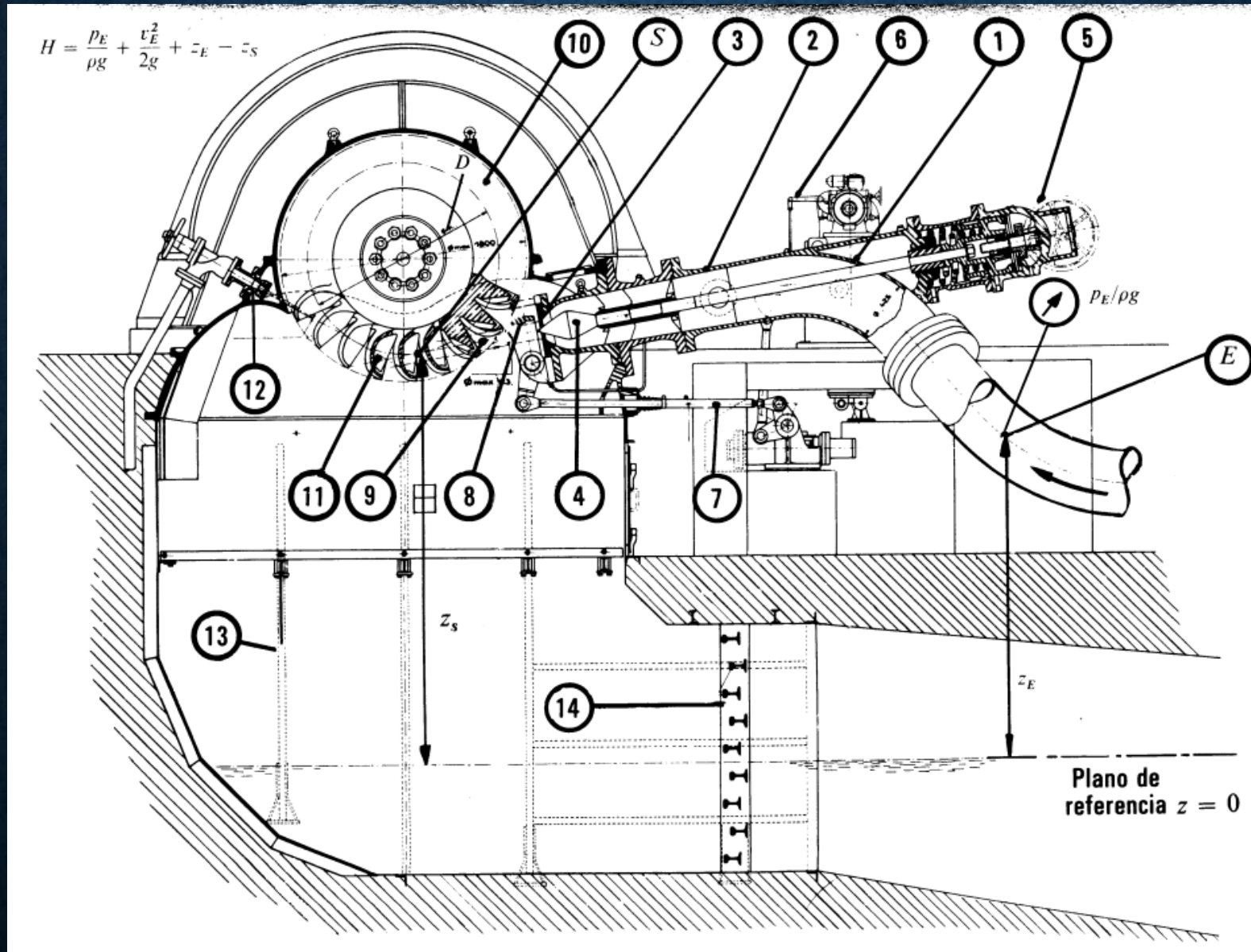
*El grado de acción de una turbina:*

$$\varepsilon_T = \frac{\text{altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{altura total absorbida por el rodete}}$$

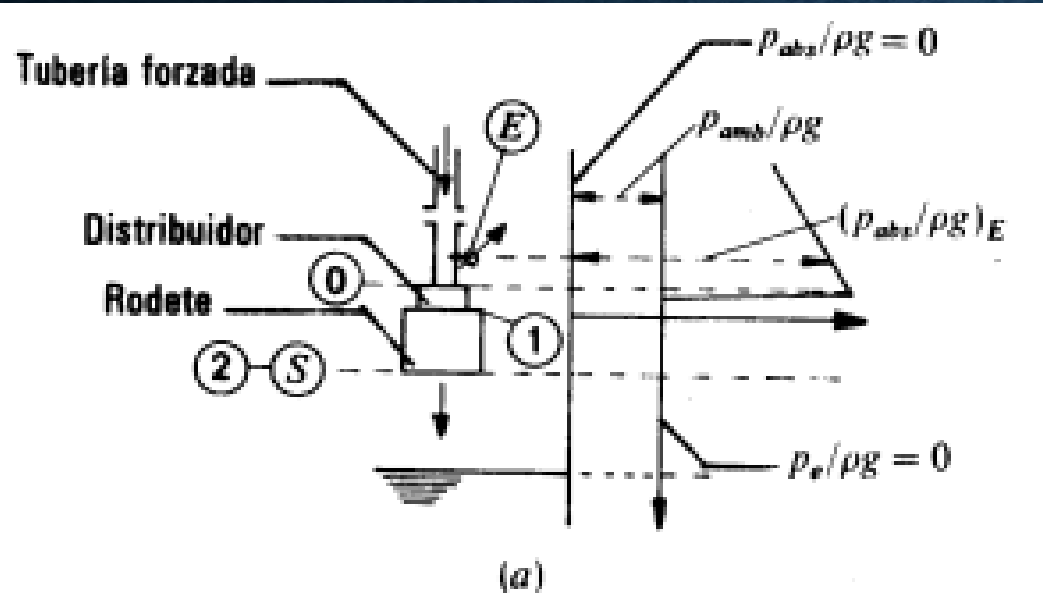
*Las turbinas de acción son de admisión parcial . La presión del agua no varía en los álabes. El rodete no esta inundado. Se encuentra a presión atmosférica.*

*Las turbinas de reacción son de admisión total. En la turbina de reacción la presión a la entrada del rodete es superior a la atmosférica y a la salida inferior. El rodete esta inundado.*

# TURBINA DE ACCIÓN



# TURBINA DE ACCIÓN



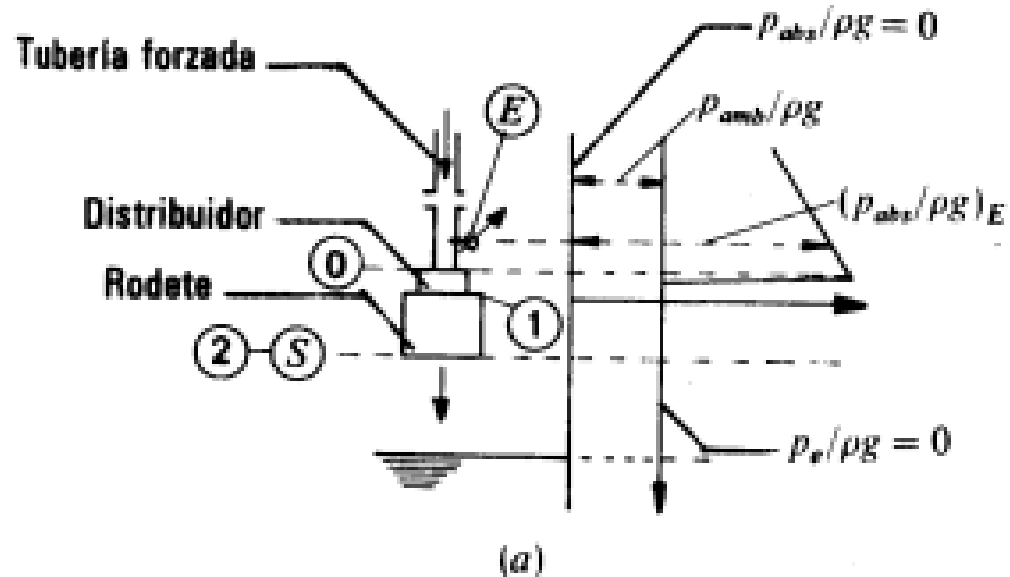
*En las turbinas de acción el rodete trabaja a presión constante, luego  $p_1 = p_2$ . Además esta turbina no tiene tubo de aspiración: la salida del rodete (2) coincide con la salida de la turbina (S). Luego  $p_1 = p_2 = p_S = p_{amb}$ .*

*Curva de altura de presión:*

*Tubería forzada: la altura de presión aumenta a costa de la altura geodésica, que disminuye. La altura de velocidad permanece constante, si la sección de la tubería es constante.*

- E* — entrada de la turbina
- 0* — entrada del distribuidor
- 1* — entrada del rodete
- 2* — salida del rodete
- S* — salida de la turbina

# TURBINA DE ACCIÓN

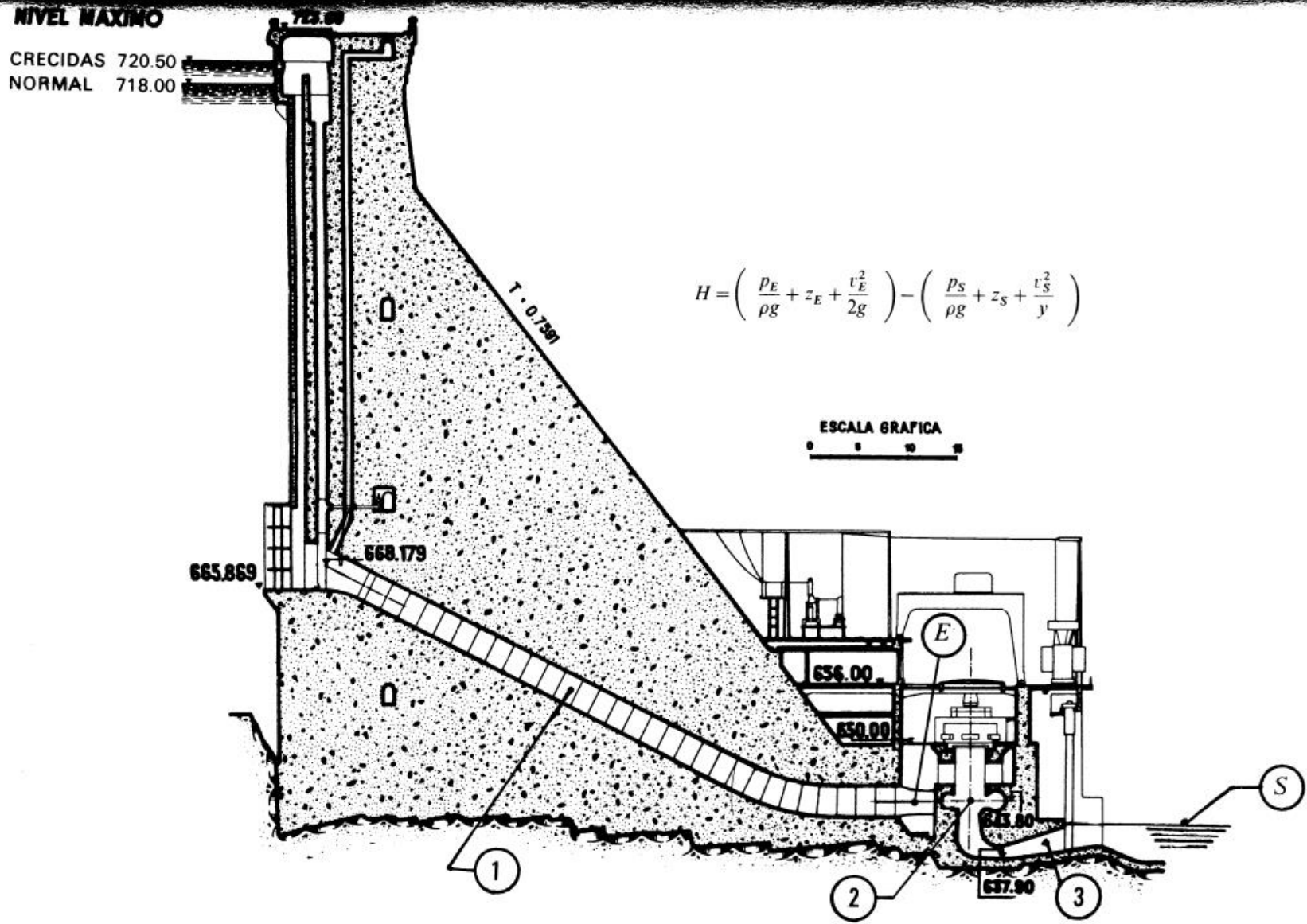


Distribuidor: la altura de presión baja a cero (presión relativa) o sea a la altura de presión ambiente (presión absoluta). La altura de velocidad aumenta porque el distribuidor transforma la energía de presión en energía cinética. El aumento de esta última es un poco menor que la disminución de la primera por las pérdidas.

Rodete: la altura de presión permanece constante. Todo el rodete se encuentra a presión atmosférica. La altura de velocidad disminuye, porque la energía cinética del chorro se va transformando en energía útil en el eje. En estas turbinas no hay tubo de aspiración

- $E$  — entrada de la turbina
- $0$  — entrada del distribuidor
- $1$  — entrada del rodete
- $2$  — salida del rodete
- $S$  — salida de la turbina

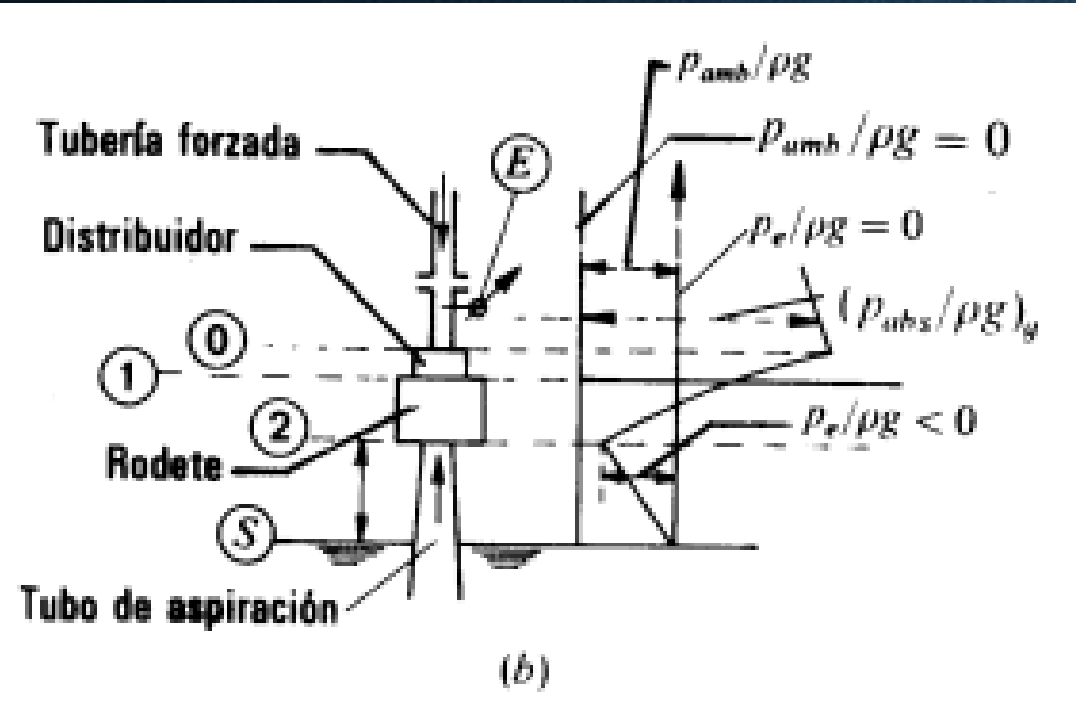
# TURBINA DE REACCIÓN



- 1- Canal de llegada o tubería forzada.
- 2- Caja espiral.
  - Distribuidor.
  - Rodete.
- 3- Tubo de aspiración.

*E* — entrada de la turbina  
*0* — entrada del distribuidor  
*1* — entrada del rodete  
*2* — salida del rodete  
*S* — salida de la turbina

# TURBINA DE REACCIÓN



En una turbina de reacción  $p_1 > p_2$ . La salida de la turbina se encuentra en el nivel de aguas abajo. Además, gracias al tubo de aspiración, que realiza como veremos, la succión  $p_2 < p_{amb}$ . Finalmente, a la salida  $p_S = p_{amb}$ .

*Curva de altura de presión:*

Tubería forzada: igual que en las turbinas de acción. Si no hay tubería forzada, sino que el agua llega a la turbina por un canal en lámina libre, la altura de presión permanece constante (presión atmosférica).

$E$  — entrada de la turbina  
 $0$  — entrada del distribuidor  
 $1$  — entrada del rodete  
 $2$  — salida del rodete  
 $S$  — salida de la turbina

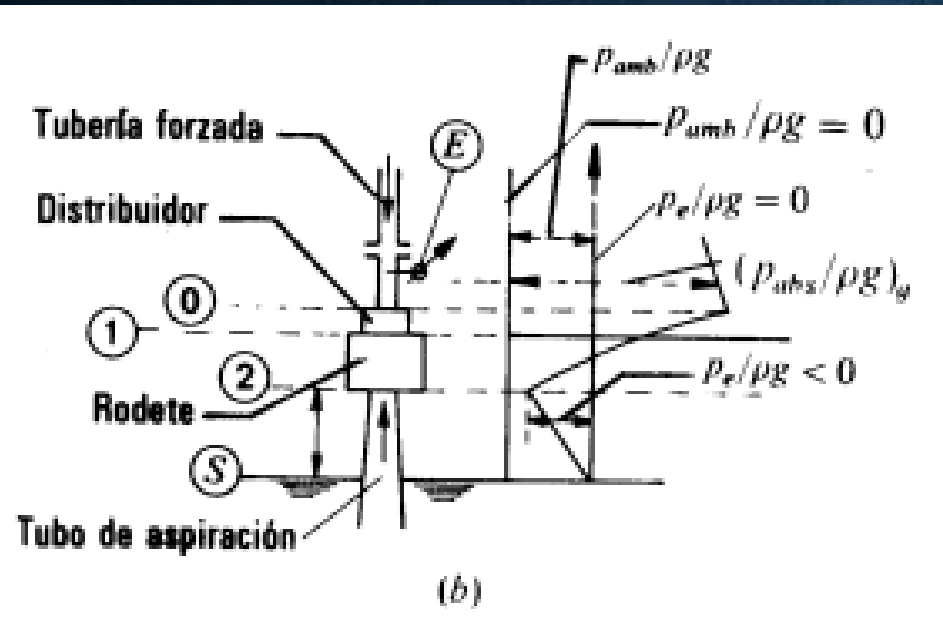
# TURBINA DE REACCIÓN

Distribuidor: la altura de presión disminuye; pero no tanto como en las turbinas de acción:  $\frac{p_1}{\rho g} > \frac{p_{amb}}{\rho g}$ . La velocidad aumenta.

Rodete: la altura de presión sigue disminuyendo hasta un valor menor que en las turbinas de acción  $\frac{p_2}{\rho g} <$

$\frac{p_{amb}}{\rho g}$  (presión relativa a la salida del rodete, negativa). La altura de velocidad disminuye también: el rodete transforma energía de presión y cinética en energía útil en el eje.

Tubo de aspiración: la energía de presión aumenta desde un valor negativo hasta 0 (presión barométrica). Gracias al tubo de aspiración el salto de presión en el rodete ha sido mayor.



- $E$  — entrada de la turbina
- $0$  — entrada del distribuidor
- $1$  — entrada del rodete
- $2$  — salida del rodete
- $S$  — salida de la turbina



# CLASIFICACIÓN

TURBINAS

Acción

Solo se construyen prácticamente de flujo tangencial y son las turbinas Pelton.

Reacción

de flujo diagonal (excepcionalmente de flujo radial).

de álabes fijos: turbinas Francis.

de álabes orientables: turbinas Dériaz (Francis de álabes orientables).

de flujo axial

de álabes fijos: turbinas hélice.  
de álabes orientables: turbinas Kaplan (hélice de álabes orientables).

# CLASIFICACIÓN

TABLA 22-1  
SALTOS, TAMAÑOS Y POTENCIAS DE LOS TIPOS ACTUALES DE TURBINAS

Tipo de turbina	Reacción		Acción. (Pelton)
	Axiales (Kaplan)	Diagonales (Francis)	
Salto neto, $H(m)$ . . . . .	2-70	2-500	40-1.700
Diámetro exterior del rodete (m). . . . .	1,0-10,5	0,35-7,65	0,36-5,2
Potencia en el eje (MW) . . . . .	Hasta 250	Hasta 750	Hasta 400

*La clasificación más precisa de las turbinas hidráulicas es una clasificación numérica, que se hace asignando a toda la familia de turbinas geométricamente semejantes un número, a saber, el NUMERO ESPECIFICO DE REVOLUCIONES,  $n_s$  [véase Ec. (19-1) y Sec. 25.3]:*

$$n_s = \frac{n P_a^{1/2}}{H^{5/4}}$$

donde  $n$  — número de revoluciones

$H$  — altura neta (véase Sec. 22.8)

$P_a$  — potencia en el eje o potencia útil (véase Sec. 22.9)

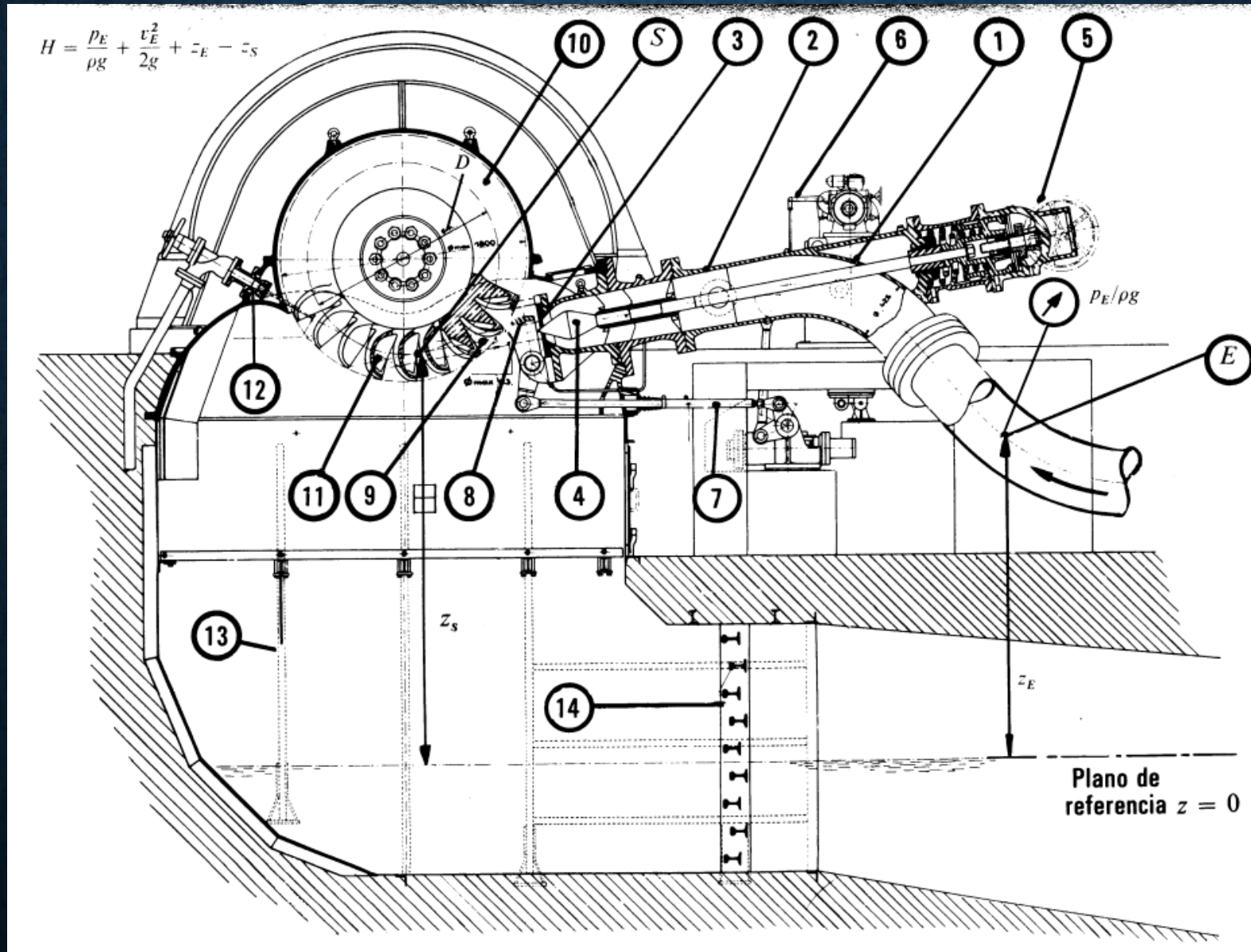
# CLASIFICACIÓN

*Sólo hay un salto brusco de forma cuando se pasa de un rodete de acción (Pelton) a un rodete de reacción. Luego todos los tipos de turbinas clasificados según  $n_s$  pueden agruparse en los dos únicos tipos mencionados en la clasificación anterior (Sec. 22.3.1): turbinas de acción y turbinas de reacción.*

En efecto, hay una *discontinuidad* en la forma, al pasar de una turbina de acción (Pelton) a una turbina de reacción (Francis) (compárense Figs. 22-2 y 22-7):

- Las turbinas Pelton no tienen *caja espiral*; las de reacción, sí.
- El distribuidor de las turbinas Pelton se llama *inyector*, y consta de tobera y válvula de aguja, y su forma no se parece en nada a la del *distribuidor* Fink de las turbinas de reacción (compárense Figs. 22-2 y 22-8), aunque desempeña el mismo papel (reducción de la altura de presión y aumento de altura cinética).
- Los álabes de las turbinas Pelton se llaman *cucharas* y son de aspecto totalmente distinto a los de las turbinas de reacción (compárense Figs. 22-5 y 22-9).

# TURBINAS DE ACCIÓN: TURBINAS PELTON



# TURBINAS DE ACCIÓN: TURBINAS PELTON

- 1 — *Codo de entrada.*
- 2 — *Inyector.* Es el distribuidor de las turbinas Pelton. Transforma la energía de presión del fluido en energía cinética. La velocidad del chorro a la salida del inyector en algunas instalaciones llega a 150 m/s y aún más. Consta de tobera y válvula de aguja.
- 3 — *Tobera.*
- 4 — *Válvula de aguja.* Se desplaza longitudinalmente. Tanto la boquilla como la aguja del inyector suelen construirse de acero muy duro. A pesar de esto si el agua contiene arena al cabo de cuatro mil horas de servicio estas piezas ya no producen un cierre estanco y deben reemplazarse.
- 5 — *Servomotor.* Desplaza mediante presión de aceite la aguja del inyector, como se verá al estudiar la regulación de la turbina en la Sec. 29.6.
- 6 — *Regulador* (véase Sec. 29.6).
- 7 — *Mando del deflector.*
- 8 — *Deflector o pantalla deflectora.* Sirve para evitar el golpe de ariete y el embalamiento de la turbina (véanse Secs. 22.10.2 y 29.6).
- 9 — *Chorro.* En la turbina de la Fig. 22-2 el diámetro máximo,  $d$ , del chorro a plena carga es de 123 mm.

# TURBINAS DE ACCIÓN: TURBINAS PELTON

- 10 — *Rodete* (véanse Figs. 22-3 *a* y *b*).
- 11 — *Alabes o cucharas* (véanse Figs. 22-5 y 22-6).
- 12 — *Freno de la turbina* por chorro de agua. El pequeño chorro, de 25 mm de diámetro en este caso, actúa sobre el dorso de los álabes y frena el rodete. Sin él, el rodete seguiría girando por inercia cada vez más lentamente, con perjuicio de la lubricación y deterioro de los cojinetes.
- 13 — *Blindaje*. Protege la infraestructura contra el efecto destructor del chorro desviado. A veces se utilizan con el mismo fin bloques de granito.
- 14 — *Destructor de energía*. Evita también las erosiones en la infraestructura.

# TURBINAS DE ACCIÓN: TRIÁNGULO DE VELOCIDADES

- La trayectoria de una partícula de agua en la cuchara es tangencial, de manera que en las turbinas Pelton se verifica siempre:

$$u_1 = u_2 = u \quad (22-1)$$

- Si no hay rozamiento al ser el flujo en la cuchara de lámina libre idealmente:

$$w_1 = w_2 \quad (22-2)$$

La velocidad real  $w_2$  es algo menor que  $w_1$ .

- Si no hay pérdidas en el inyector el chorro sale del inyector a la atmósfera con una velocidad,  $c_1$ , que, según la ecuación de Torricelli [Ec. (6-1)], idealmente será:

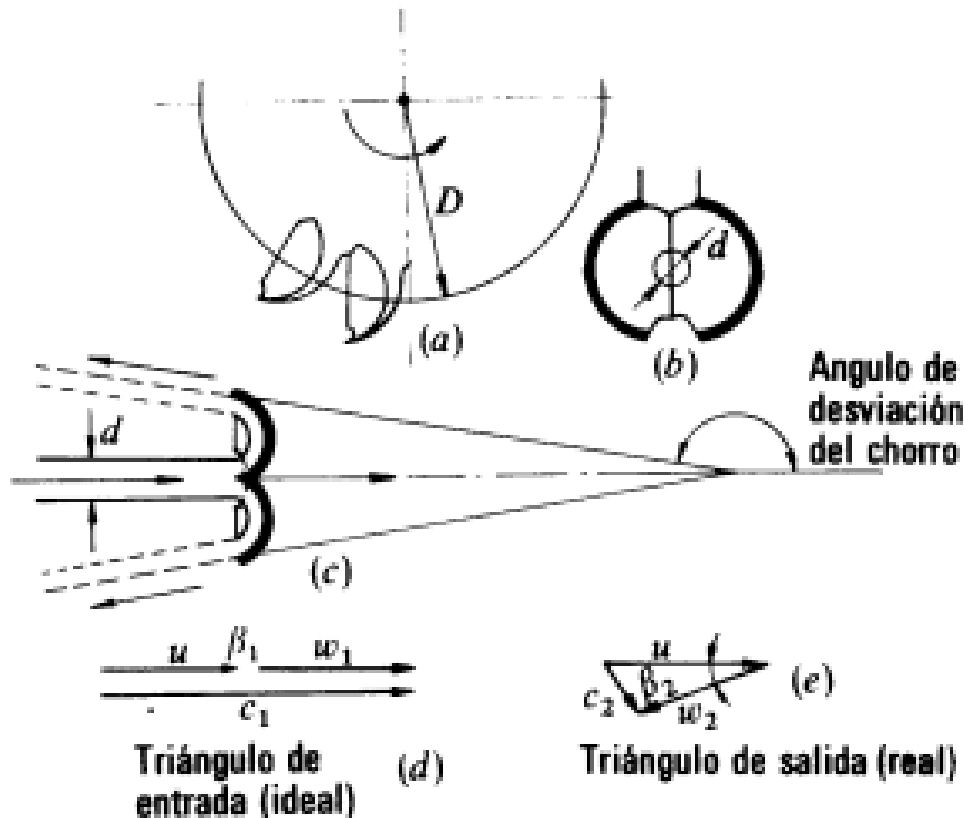
$$c_1 = \sqrt{2gH}$$

Prácticamente, la velocidad real es algo más pequeña y aproximadamente:

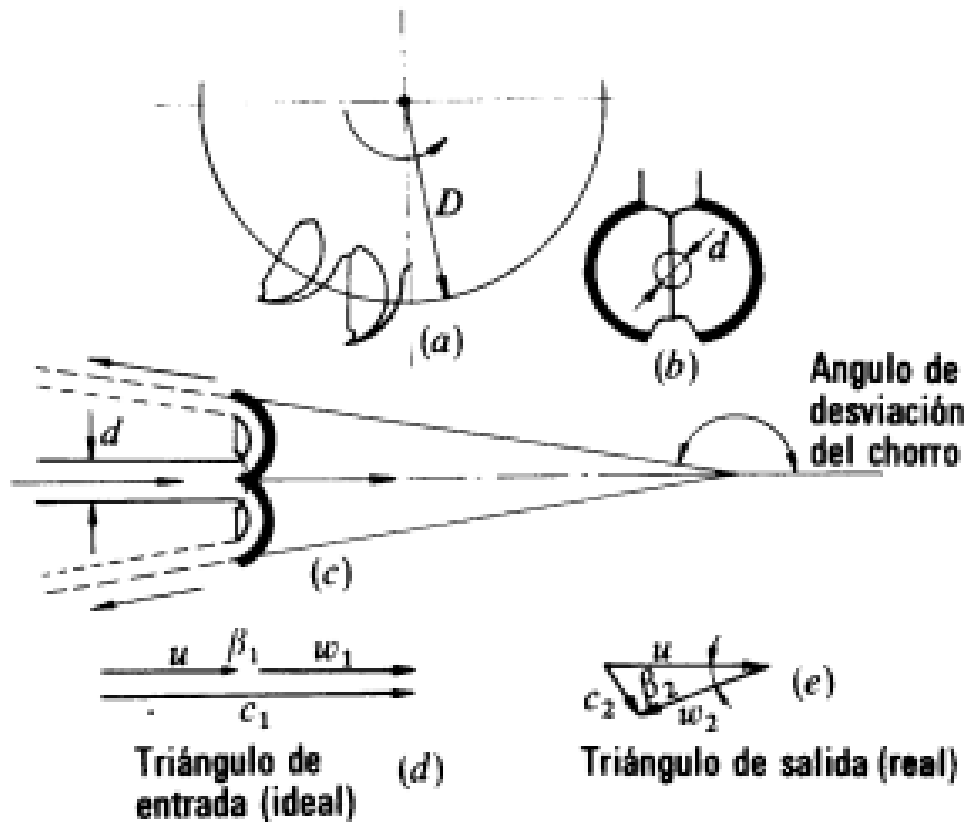
$$c_1 = 0,97 \sqrt{2gH} \quad (22-3)$$

- Idealmente se demuestra que la turbina Pelton alcanza su rendimiento óptimo cuando  $u_1 = 1/2 c_1$ . Prácticamente, el rendimiento óptimo suele alcanzarse para una velocidad un poco más baja, aproximadamente

$$u_1 = 0,45 \sqrt{2gH} \quad (3) \quad (22-4)$$



# TURBINAS DE ACCIÓN: TRIÁNGULO DE VELOCIDADES



- *Idealmente*, el ángulo  $\alpha_1 = 0^\circ$  y el ángulo  $\beta_1 = 180^\circ$  (véase Fig. 22-6 d). *Prácticamente*, el ángulo  $\alpha_1$  suele ser algo mayor, aunque siempre muy pequeño (aproximadamente  $17^\circ$ ).
- La turbina Pelton no tiene tubo de aspiración. Como consecuencia no puede aprovecharse la velocidad de salida (véase Sec. 22.10). Por tanto, como la energía cinética a la salida del álabe se pierde es conveniente que sea 0, de esta manera el álabe habrá aprovechado toda la energía, es decir, *idealmente*  $c_2 = 0$ . *Prácticamente*,  $c_2$  es muy pequeña.



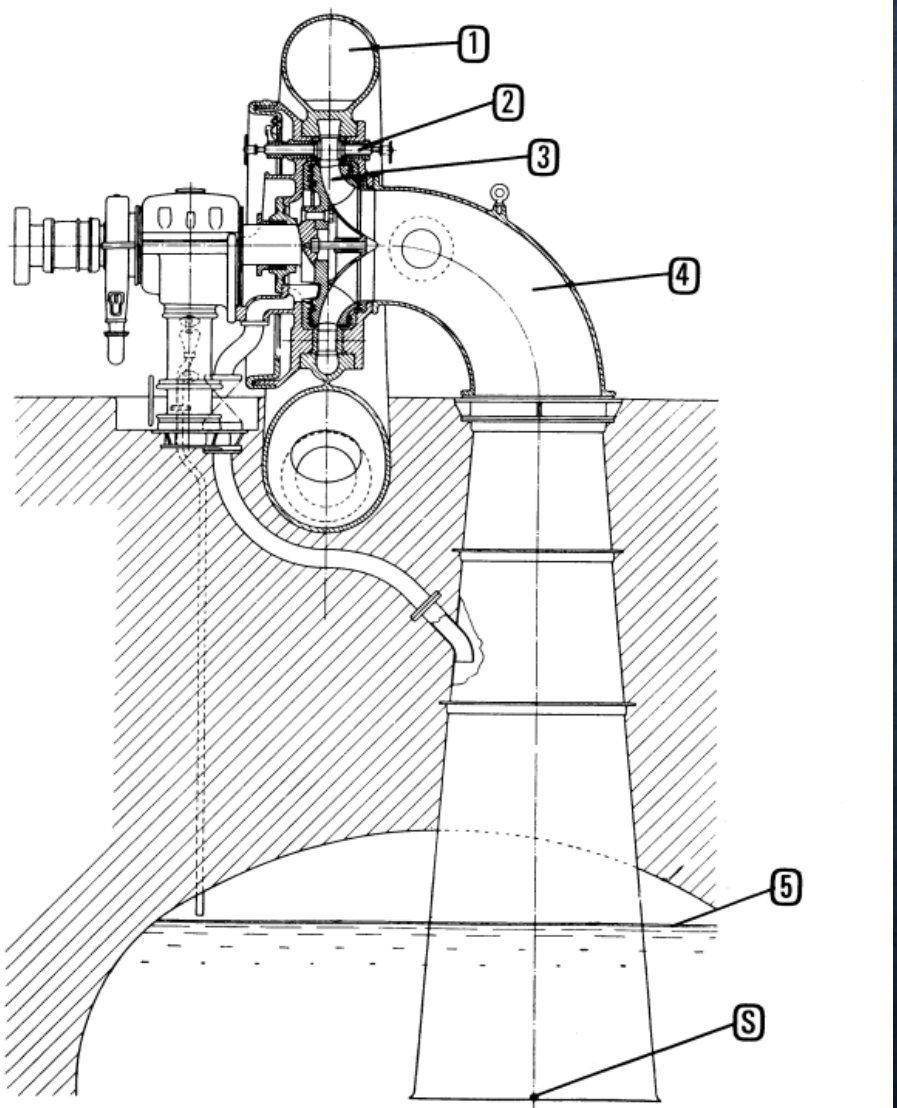
# CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS PELTON SEGÚN EL NÚMERO DE REVOLUCIONES

$$n_s = n P_a^{1/2} H^{-5/4}$$

donde  $n$ ,  $P_a$  y  $H$  — respectivamente, *rpm*, *potencia útil* y *salto neto* en el punto nominal de funcionamiento o punto para el que la turbina alcanza el rendimiento óptimo.

- 1) *giran a velocidad relativamente más baja* que las turbinas rápidas (y en particular las Pelton lentas en comparación con las Pelton rápidas), porque, colocadas en el mismo salto y absorbiendo el mismo caudal, la turbina de menor  $n_s$  girará también a menor  $n$ .
- 2) *absorben relativamente menos caudal*, porque girando al mismo número de revoluciones e instaladas en el mismo salto neto, la turbina de menor  $n_s$  absorberá menos caudal.
- 3) *se destinan a saltos relativamente más elevados*, porque girando al mismo número de revoluciones y absorbiendo el mismo caudal, la turbina de menor  $n_s$  requerirá un salto más elevado (5).

# TURBINAS DE REACCIÓN: FRANCIS Y HÉLICE (ÁLABES FIJOS)



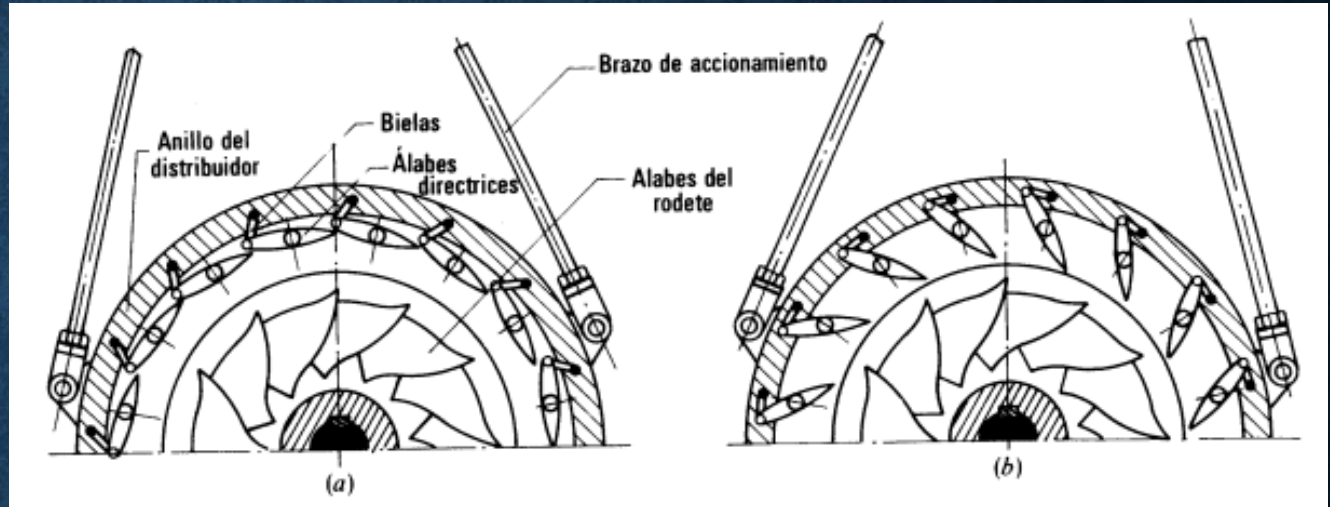
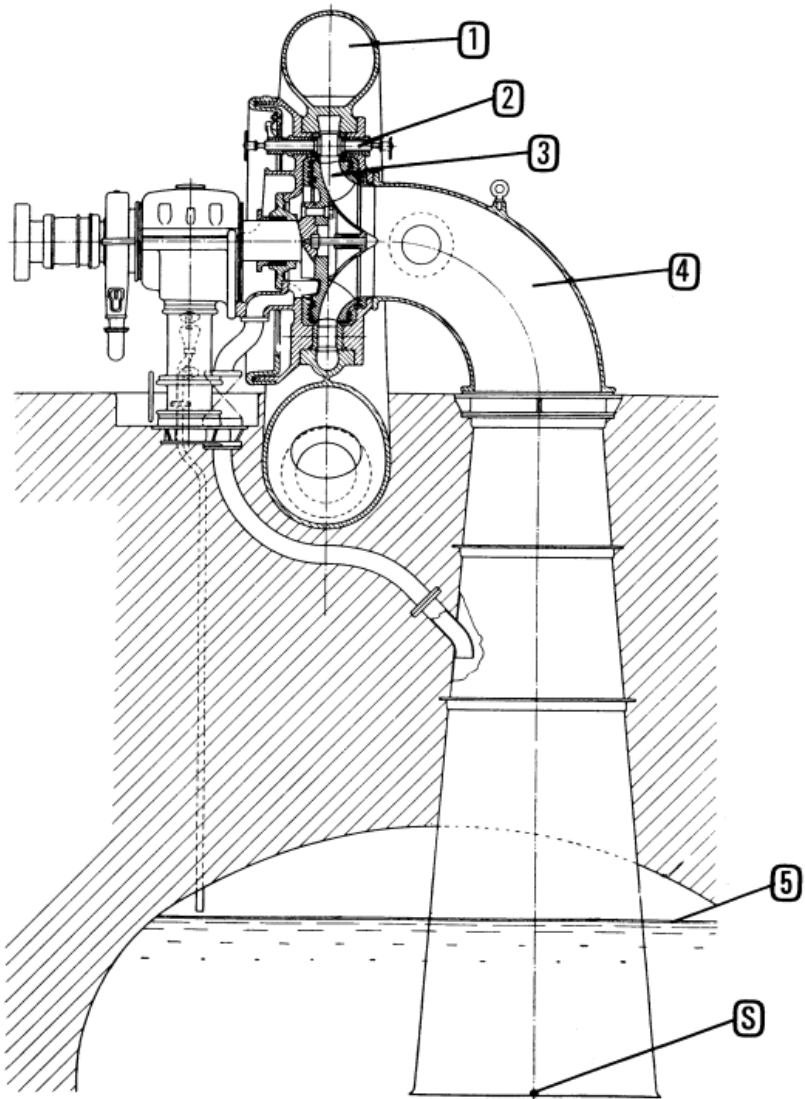
- 1 — *Caja espiral*. Según las dimensiones de la turbina se construye de acero colado, fundición, chapa roblonada o soldada u hormigón armado (solo o blindado con chapa para evitar fugas).
- 2 — *Distribuidor* (véase Fig. 22-8). La caja espiral y el distribuidor dirigen el agua al rodete con un mínimo de pérdidas, y transforman parte de la energía de presión (no toda como sucedía en las turbinas de acción; compárense Figs. 22-1 a y 22-1 b) en energía cinética. El distribuidor es de *álabes orientables* y sirve también para reducir el caudal cuando

la carga de la turbina disminuye, conservando el mejor rendimiento posible, es decir, reduciendo a un mínimo las pérdidas hidráulicas por fricción y choque.

El *distribuidor* Fink es el distribuidor corriente de todas las turbinas de reacción (Francis, hélice, Kaplan y Dériaz). Este distribuidor puede verse en posición cerrada en la Fig. 22-8 a y en posición abierta en la Fig. 22-8 b. Consta de dos bielas o brazos robustos, movidos por uno o varios servomotores de aceite (6) (en las pequeñas turbinas raras veces a mano) que hacen girar al anillo donde pivota un extremo de las pequeñas bielas, las cuales a su vez hacen girar a los álabes de perfil aerodinámico, que pivotan en torno a un eje fijo.

El distribuidor Fink sustituye al inyector de las turbinas Pelton. Algunas veces las turbinas de reacción si no interesa regular el caudal se instalan sin distribuidor y otras también con distribuidor de álabes fijos.

# TURBINAS DE REACCIÓN: FRANCIS Y HÉLICE (ÁLABES FIJOS)

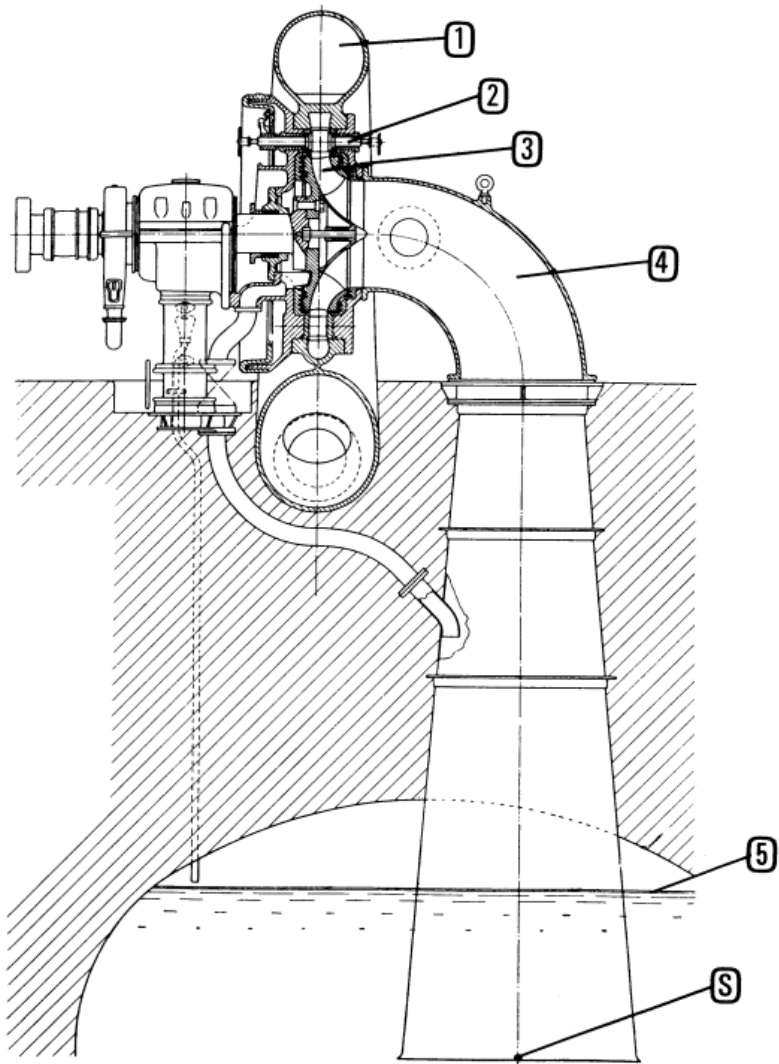


3 — *Rodete*. La Fig. 22-9 es una foto del rodete de una turbina Francis construida por la casa Voith, de 5,38 m de diámetro,  $P_a = 66.200$  kW,  $H = 40$  m, para la central de Managua, Venezuela.

4 — *Codo de entrada en el tubo de aspiración*. El tubo de aspiración crea una depresión a la salida del rodete (véase Fig. 22-1 b). En efecto, despreciando las pérdidas en el tubo de aspiración de la Fig. 22-7, la presión según la ecuación de Bernoulli va aumentando desde la salida del rodete hasta la salida de la turbina, sección S, donde la presión es atmosférica, por dos causas:

- 1.<sup>a</sup> Porque la energía geodésica disminuye en el sentido del flujo:  $s_S < z_2$  (2 — salida del rodete).
- 2.<sup>a</sup> Porque la energía cinética disminuye (el tubo de la figura es tronco-cónico),  $c_S^2/2g < c_2^2/2g$ .

# TURBINAS DE REACCIÓN: FRANCIS Y HÉLICE (ÁLABES FIJOS)



*tubo de aspiración:*

- crea una depresión, o *aspiración*, a la salida del rodete. De esta manera el salto de presión en él es mayor;
- tiene dos funciones:

- 1.<sup>a</sup> *recuperar la energía cinética* que tiene el agua a la salida del rodete; a costa de ella se crea en parte la depresión mencionada (difusor);
- 2.<sup>a</sup> *recuperar la energía geodésica* que tiene el agua a la salida del rodete, porque éste se ha de colocar elevado para proteger el grupo contra una posible inundación; a costa de ella se crea en parte la depresión mencionada.

— La 1.<sup>a</sup> función exige que la sección del tubo crezca en la dirección del flujo (por ejemplo, tubo de aspiración troncocónico); la 2.<sup>a</sup>, no (tubo de aspiración cilíndrico).

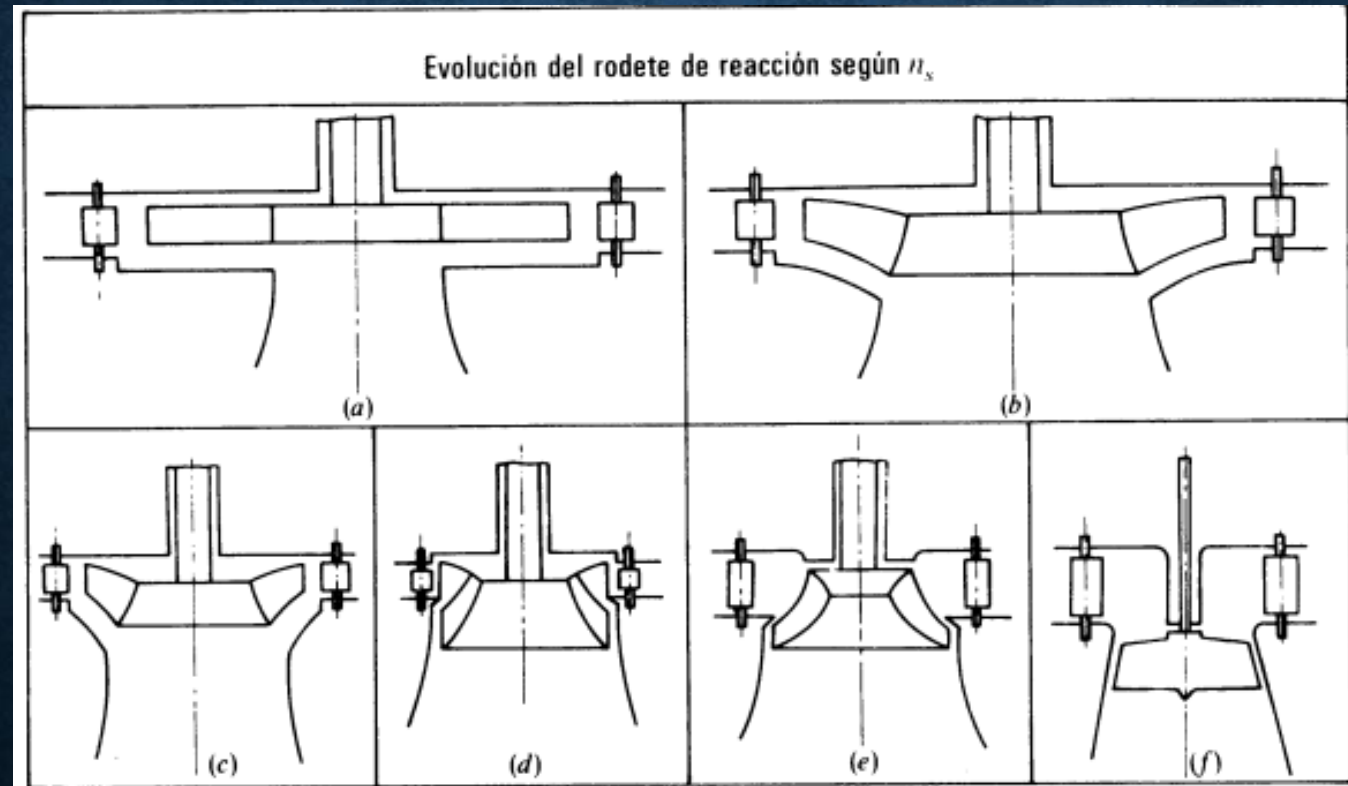
— En las turbinas rápidas suele ser preponderante la 1.<sup>a</sup> función y en las lentas la 2.<sup>a</sup> (los términos «lenta» y «rápida» se refieren al número específico de revoluciones).

S — Sección de salida de la turbina. Esta sección sirve para definir la altura neta,  $H$ , según las normas internacionales (véase Sec. 22.8.1).

5 — Nivel inferior ( $NI$ ) del salto.

# CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS DE REACCIÓN SEGÚN EL NÚMERO DE REVOLUCIONES

$$n_s = n P_a^{1/2} H^{-5/4}$$



# CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS DE REACCIÓN SEGÚN EL NÚMERO DE REVOLUCIONES

$$n_s = n P_a^{1/2} H^{-5/4}$$

El rodete *a* es de flujo radial. El flujo es radioaxial, y cada vez más axial que radial, en *b*, *c*, *d* y *e*. En el rodete *f* el flujo es puramente axial. Así la evolución de la forma es continua; pero cuando la máquina es totalmente axial, el rodete ha adquirido ya la forma de *hélice*.

Por tanto,

- la turbina *a* se llama *radial*. Se construye muy poco (la bomba radial en cambio es muy frecuente);
- las turbinas *b*, *c*, *d* y *e* se llaman Francis. Son de flujo *radioaxial*;
- la turbina *f* se llama turbina *hélice*: es de flujo *axial*.

# TURBINAS DE REACCIÓN: TURBINAS KAPLAN Y DERIAZ: ORIENTACIÓN DE ÁLABES

- la curva *a*, a una turbina *Pelton* de  $n_s = 20$ , aproximadamente;
- la curva *b*, a una turbina *Kaplan* de  $n_s = 500$  como las que vamos a estudiar en esta sección;
- la curva *c*, a una turbina *Francis* normal,  $n_s = 250$ ;
- la curva *d*, a una turbina *Francis* rápida,  $n_s = 500$ ;
- la curva *e*, a una turbina *hélice*,  $n_s = 650$ ;
- la curva *f*, a una turbina *hélice* muy rápida,  $n_s = 1.050$ .

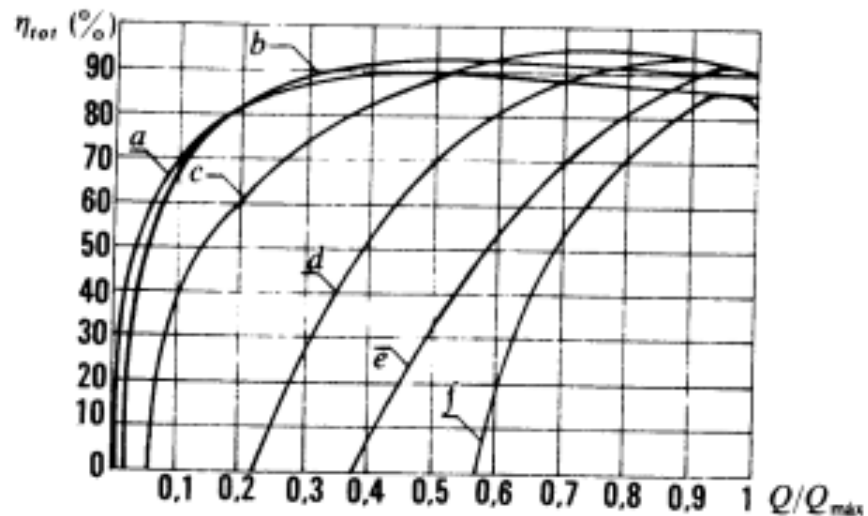


FIG. 22-11. Curvas de rendimientos de los diversos tipos de turbinas en función del caudal: *a*, turbina *Pelton*; *b*, *Kaplan*; *c*, *d*, *Francis*; *e*, *f*, *hélice*. Las curvas *a* y *b* se llaman *planas* y las curvas *e* y *f*, en *gancho*; las *c* y *d* son *intermedias*.

# TURBINAS DE REACCIÓN: TURBINAS KAPLAN Y DERIAZ: ORIENTACIÓN DE ÁLABES

*La turbina Dériaz es como una turbina Francis de álabes orientables.*

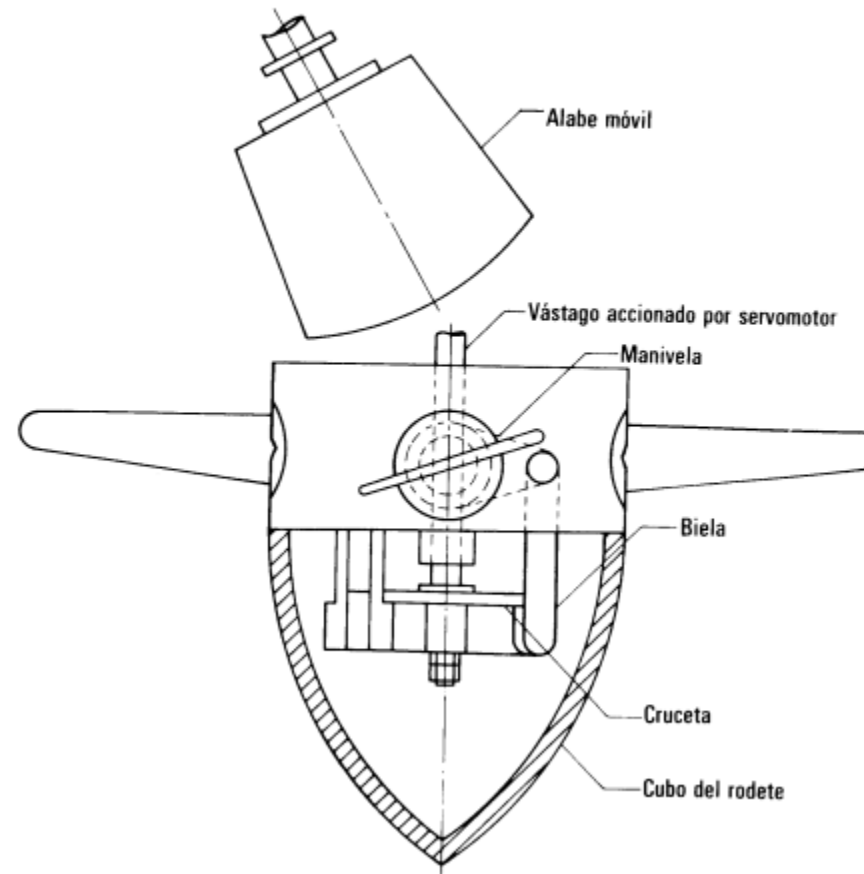
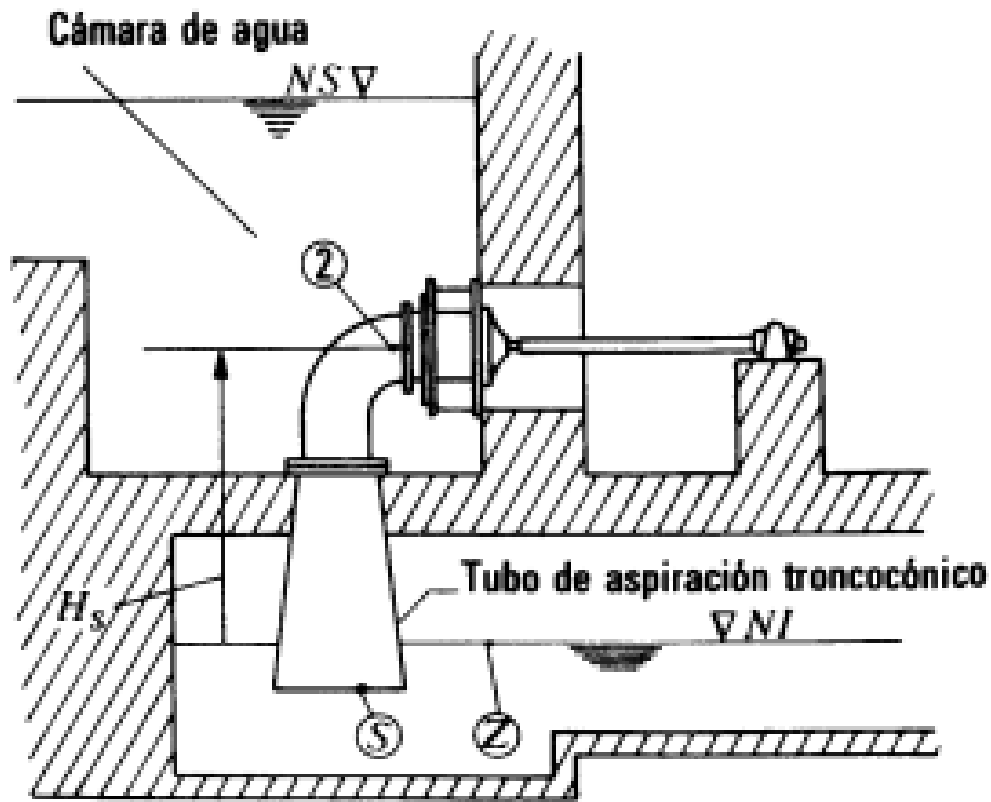


FIG. 22-13. El mecanismo de orientación de los álabes de un rodete Kaplan consta esencialmente de un vástago que al moverse con simple movimiento de traslación hace subir o bajar la cruceta, la cual hace girar simultáneamente a todos los álabes al transmitirse su movimiento por las bielas y manivelas.



**TAREA: ANALIZAR ALTURA NETA Y POTENCIAS,  
PÉRDIDAS Y RENDIMIENTOS Y COMPARARLOS  
CON LOS DE LAS BOMBAS**

# ECUACIÓN DEL TUBO DE ASPIRACIÓN



Escribamos la ecuación de Bernoulli entre la salida del rodete (punto 2) y el nivel inferior del salto (punto Z):

$$\frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{c_2^2}{2g} - H_{ra} = \frac{p_Z}{\rho g} + z_Z + \frac{c_Z^2}{2g}$$

$H_{ra}$  — pérdidas en el tubo de aspiración, incluyendo las pérdidas por velocidad de salida del mismo  $c_S^2/2g$ )

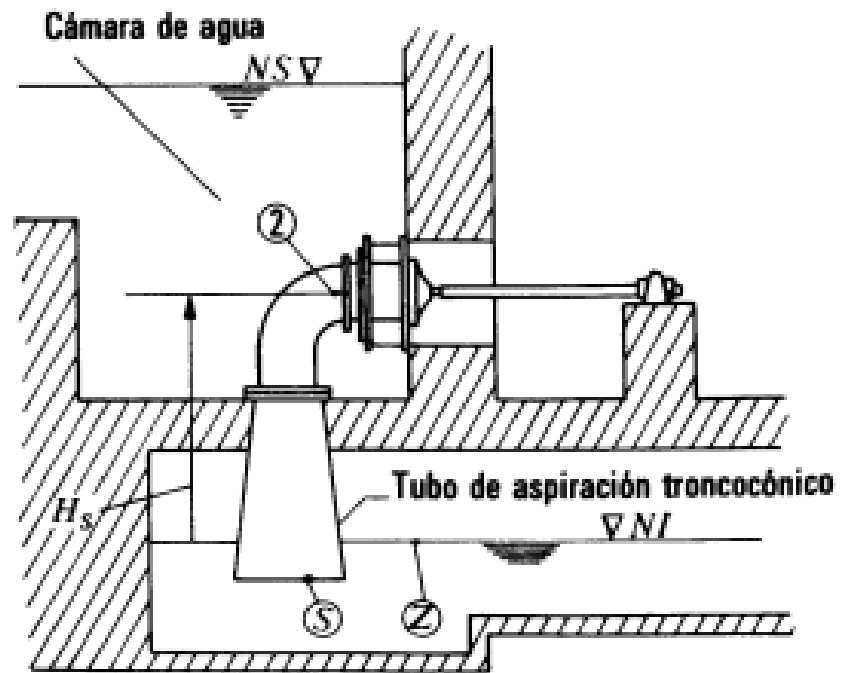
$z_2 - z_Z = H_s$  (véase figura) — altura de suspensión o altura de aspiración (cota del eje de la bomba con respecto al nivel inferior,  $NI$ )

$$\frac{p_Z}{\rho g} = 0 \quad , \quad \frac{c_Z^2}{2g} \approx 0$$

Por tanto,

$$\frac{p_2}{\rho g} = - \left( H_s + \frac{c_2^2}{2g} \right) + H_{ra} \quad (22-29)$$

# ECUACIÓN DEL TUBO DE ASPIRACIÓN



$$\frac{p_2}{\rho g} = - \left( H_s + \frac{c_2^2}{2g} \right) + H_{ra}$$

La Ec. (22-29) pone en evidencia las funciones que desempeña el tubo de aspiración:

- Recupera la altura de suspensión de la turbina, creando una depresión a la salida del rodete (*función aspiradora*).
- Recupera la energía cinética a la salida del rodete, creando también una depresión a la salida del mismo (*función difusora*).

# CAVITACIÓN

El coeficiente de cavitación de Thoma  $\sigma$  se define para las turbinas hidráulicas de manera análoga que para las bombas:

$$\sigma = \frac{(p_{amb} - p_s)/\rho g - H_{s \text{ máx}}}{H} \quad (22-30)$$

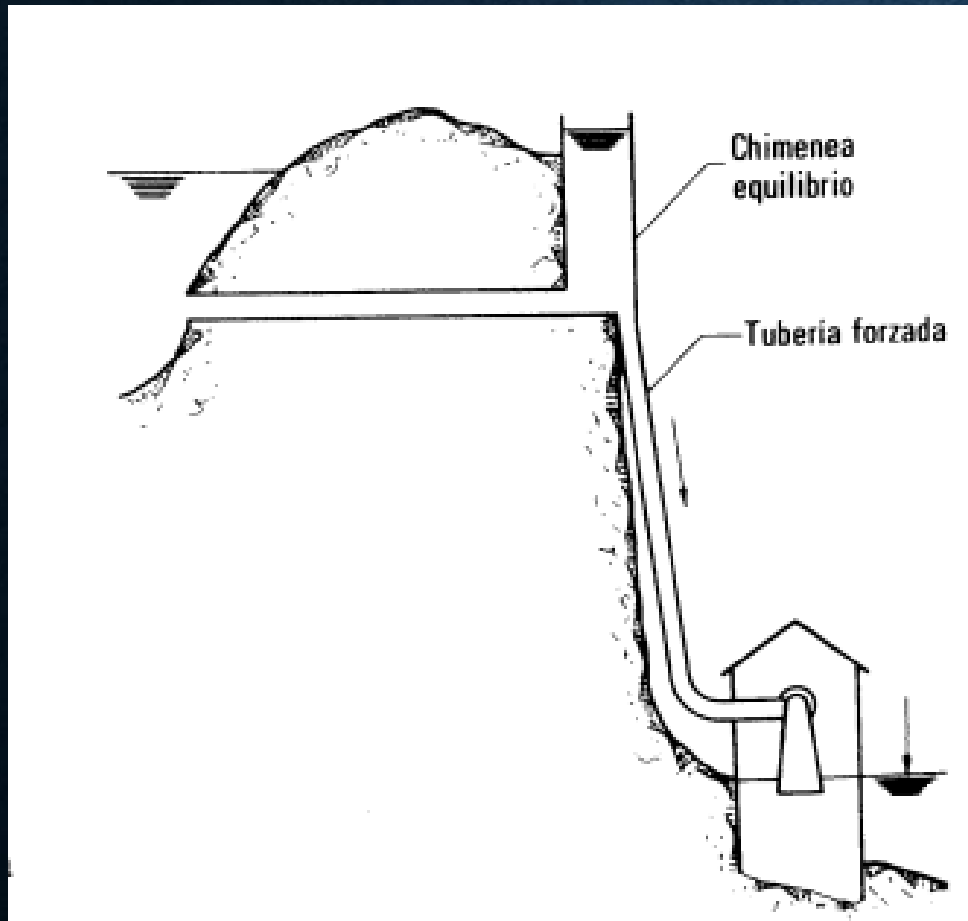
donde  $p_{amb}$  — presión atmosférica indicada por el barómetro

$p_s$  — presión de saturación del vapor; como las turbinas hidráulicas

trabajan con agua fría,  $\frac{p_s}{\rho g} \simeq 0$  (véase Tabla 15-1).

$H_{s \text{ máx}}$  — (véase Fig. 22-20) valor máximo que  $H_s$  alcanza cuando tiene lugar la cavitación (12).

# GOLPE DE ARIETE: PANTALLA DEFLECTORA, CHIMENEA DE EQUILIBRIO Y ORIFICIO COMPENSADOR



Según la Ec. 15-15, la *sobrepresión* que se produce al cerrar una válvula, en nuestro caso al cerrar el distribuidor de una turbina:

- está *en razón directa de la longitud de la tubería forzada*: luego el *golpe de ariete* se presentará más en los saltos de grande y mediana altura, en que la tubería forzada tiene mayor longitud;
- está *en razón inversa del tiempo de cierre*.