MECÁNICA DE LOS FLUIDOS Y MÁQUINAS

UNIDAD N°9: Turbomáquinas hidráulicas

Docentes:

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

MÁQUINAS DE FLUIDO

Las máquinas se clasifican en varios grupos: *máquinas de fluido*, máquinas herramientas, máquinas eléctricas, entre otros. Las *máquinas hidráulicas* pertenecen al grupo de las *máquinas de fluidos.*

Las *máquinas de fluidos* son:

- Aquellas en que el fluido, o bien proporciona la energía que absorbe la máquina (Turbinas).
- O bien aquellas en que el fluido es el receptor de energía, al que la máquina restituye la energía mecánica absorbida (Bombas).

En toda máquina de fluido hay un intercambio entre la energía de fluido y energía mecánica. Algunas aplicaciones son: la fresa neumáica de un dentista, que gira a 500000 rpm, o una turbina de vapor de 1200MW.

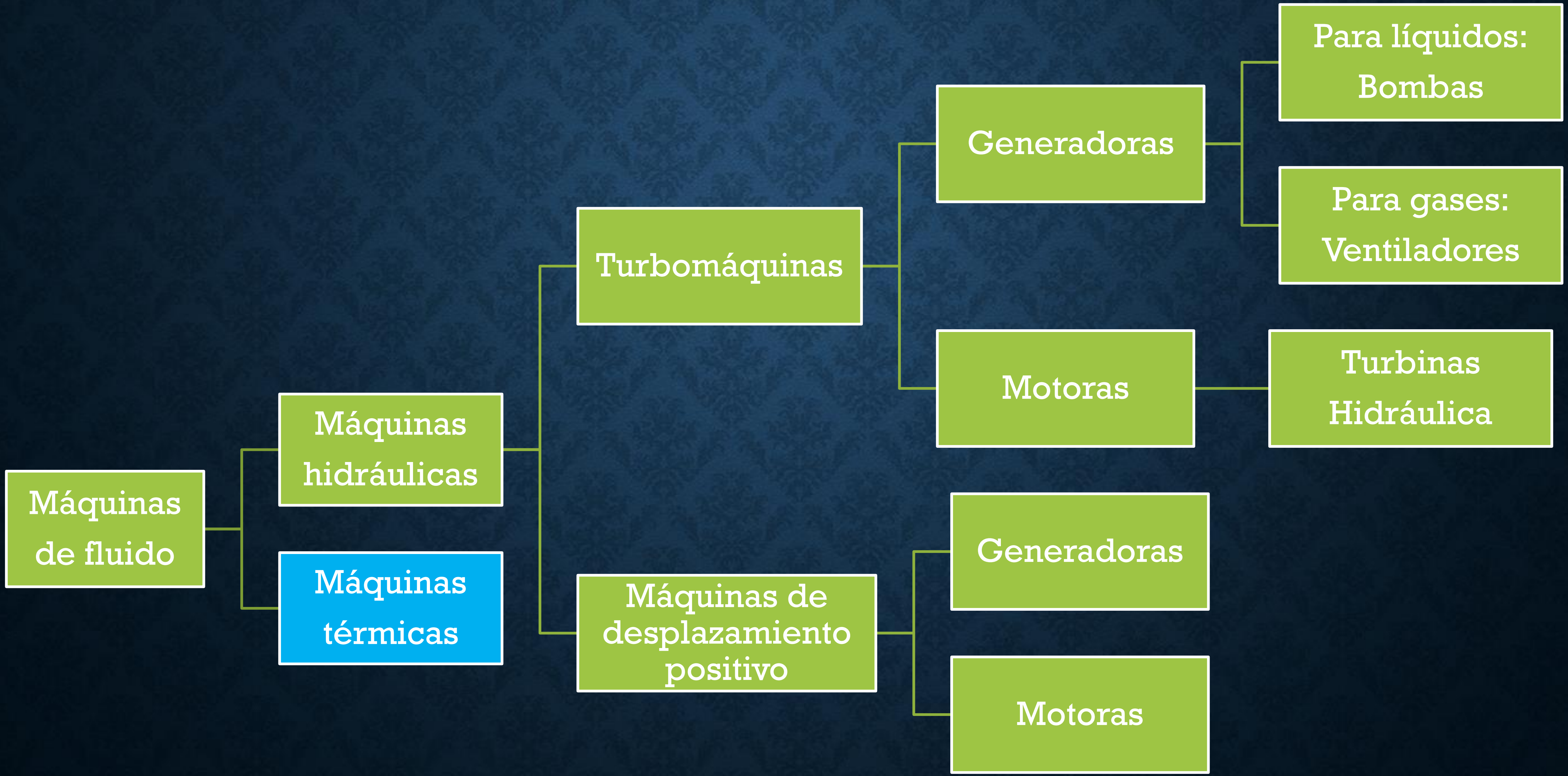
MÁQUINAS DE FLUIDO

- Máquinas de fluido
  - Máquinas hidráulicas
  - Máquinas térmicas

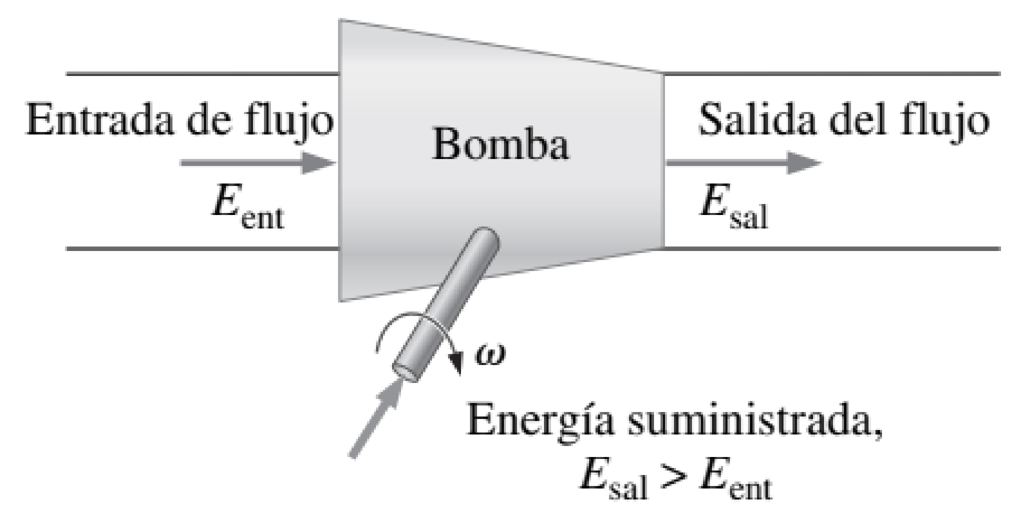
Máquina hidráulica es aquella en que el fluido que intercambia su energía no varía sensiblemente la densidad en su paso a través de la máquina, por lo cual en el diseño y estudio de la misma se hace la hipótesis de que $\rho = cte.$

Máquina térmica es aquella en que el fluido en su paso a través de la máquina varía sensiblemente la densidad y el volumen específico, el cual en el diseño y estudio de la máquina ya no puede suponerse constante.

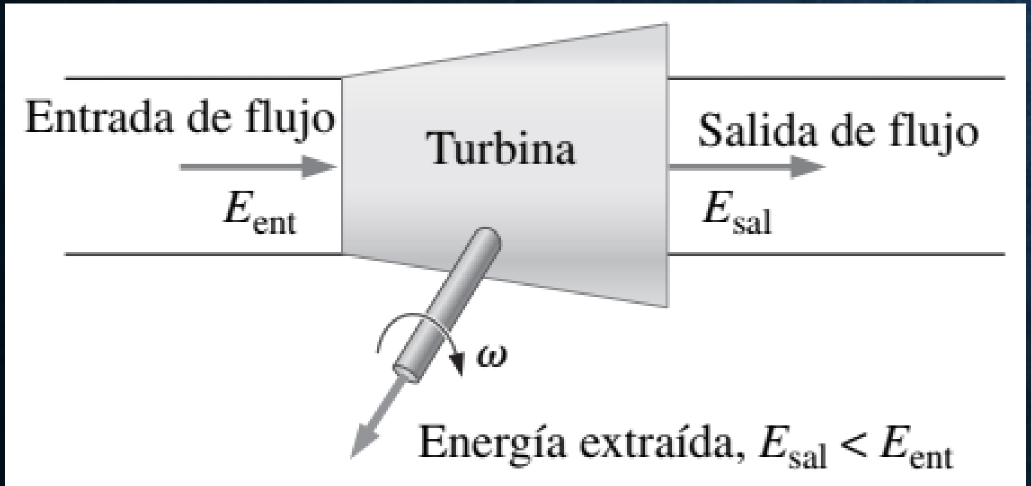
MÁQUINAS HIDRÁULICAS



TURBOMÁQUINAS: BOMBAS

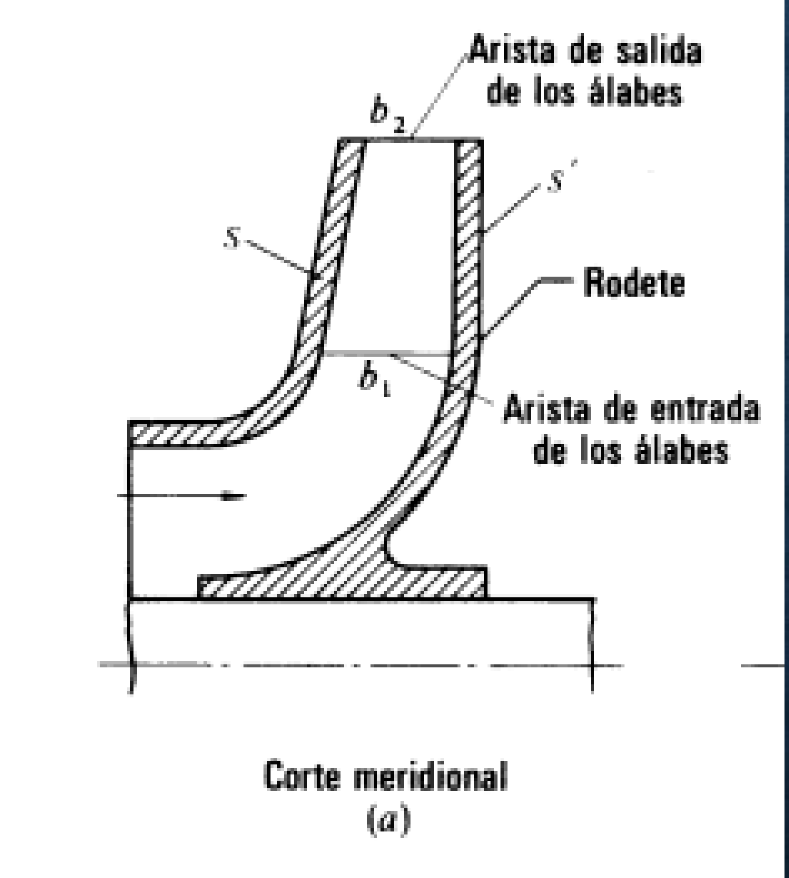


El incremento de la energía hidráulica se experimenta como un aumento en la presión del fluido.



El fluido en la descarga de la turbina experimenta una pérdida de energía, por lo general en forma de pérdida de presión.

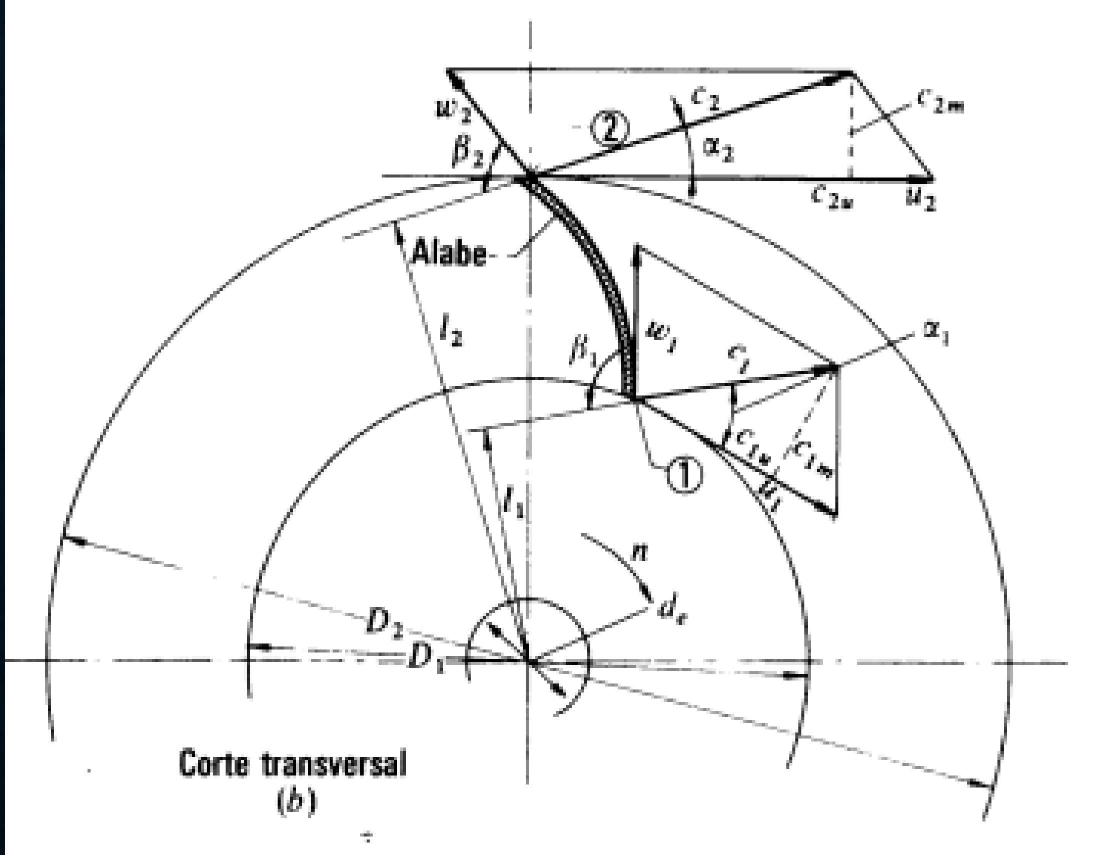
ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)



El corte por un plano que contiene al eje de la máquina, se llama *Corte meridional*, en el se representan en su verdadera forma las meridianas de las superficies de revolución de las máquina, como son las superficies interior y posterior del rodete *s* y *s'*.

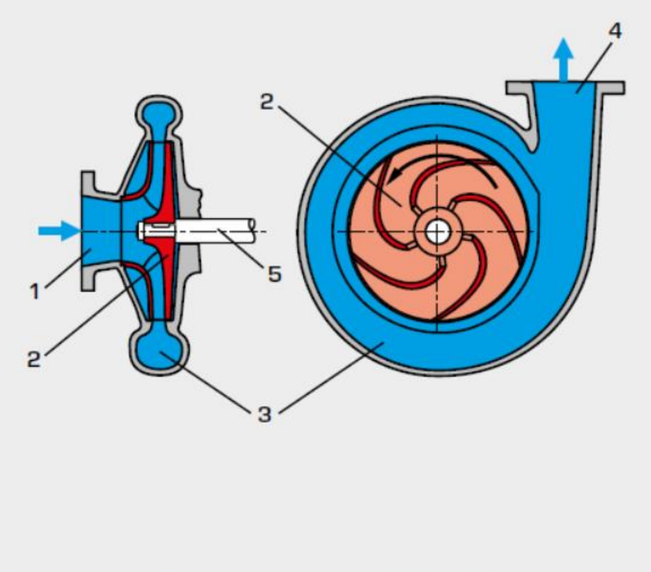
En este corte se ven también las aristas de entrada y salida de los álabes. Estas aristas de entrada y salida en nuestro caso son paralelas al eje de la máquina. Los anchos del rodete a la entrada b_1 y a la salida b_2 de los álabes se acotan también en este plano.

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)



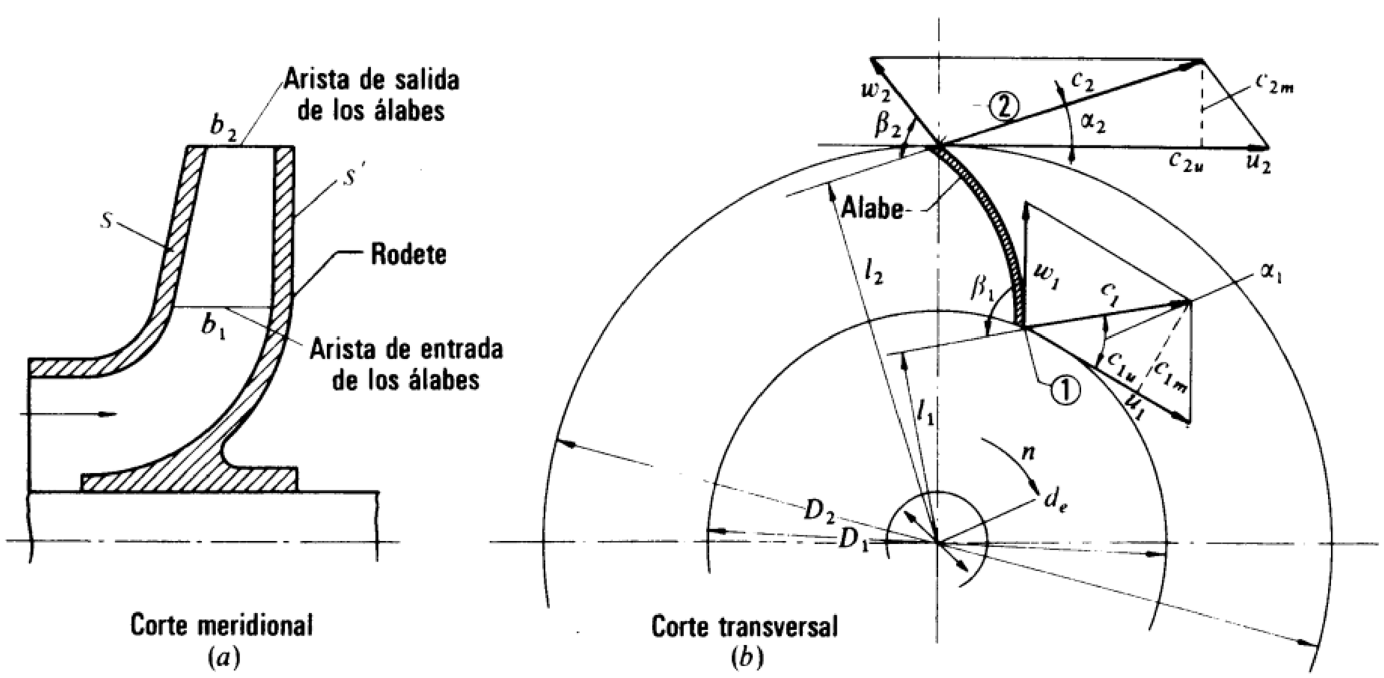
Se representa el *Corte transversal* por un plano perpendicular al eje. En el corte transversal de una bomba radial se ve el álabe del rodete en su verdadera forma: el álabe es una superficie cilíndrica con generatrices paralelas al eje de la máquina. Los diámetros de entrada y salida de los álabes D_1 y D_2 se acotan también en este plano, así como el diámetro del eje, d_e.

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)



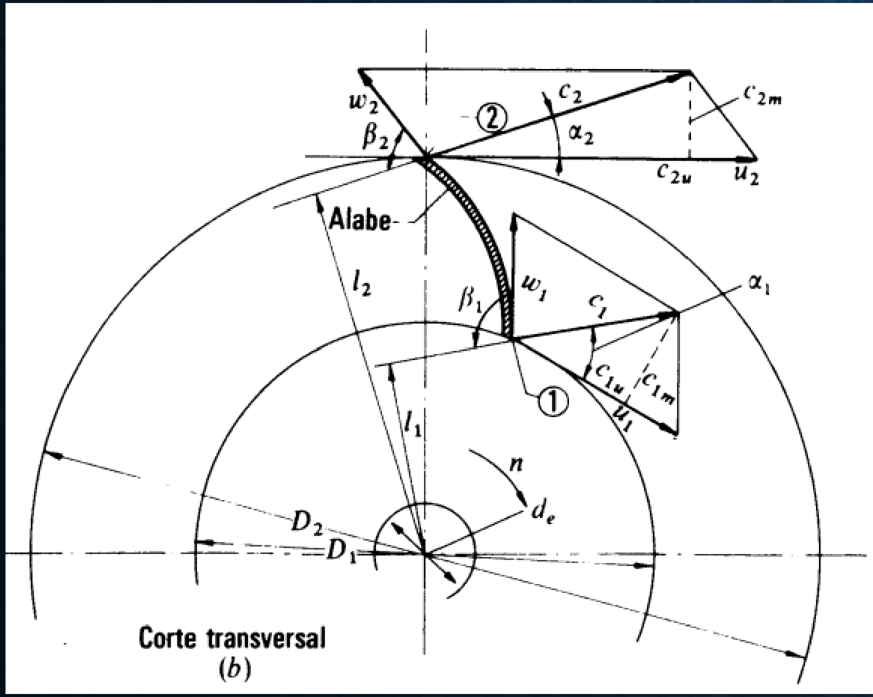
Los componentes más importantes de una bomba centrífuga

1 conducto de aspiración, 2 rodete, 3 caja espiral,
4 conducto de presión, 5 árbol de rodete



Esta deducción se realiza considerando que la figura representa el rodete de una bomba centrifuga, pero todo el razonamiento y por lo tanto la *"Ecuación de Euler"* es válida para cualquier turbomáquina.

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)

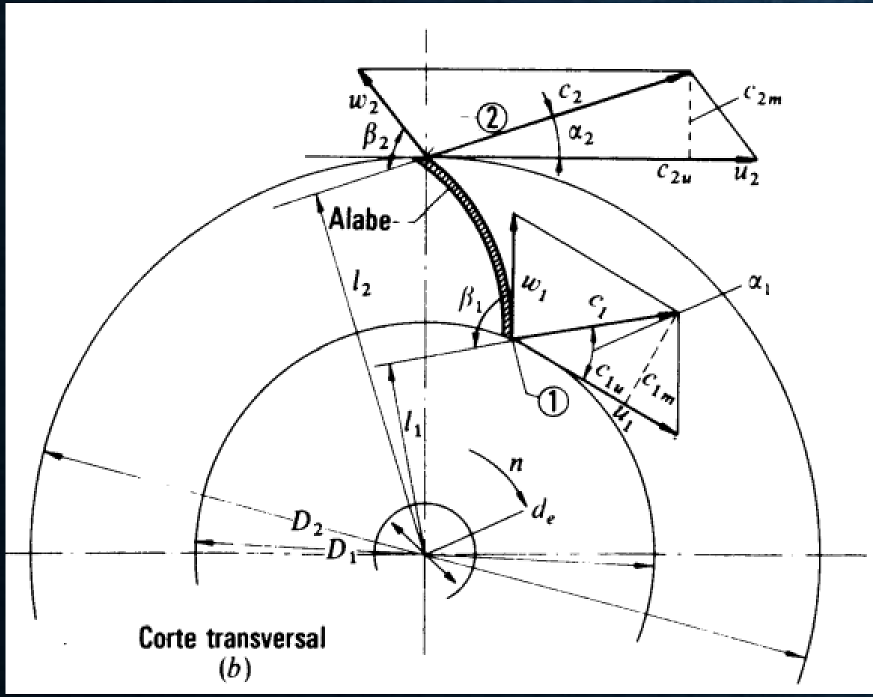


La bomba funciona en régimen permanente y al girar crea una depresión en el rodete penetrando el fluido en el interior de la bomba.

Sea c_1 la velocidad absoluta de una partícula de fluido a la entrada de un álabe. El rodete accionado por el motor de una bomba gira a una velocidad n, rpm. En el punto 1 del rodete tiene una *velocidad periférica* $u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60}$. Con relación al álabe el fluido se mueve con una velocidad w_1, llamada *velocidad relativa a la entrada*.

$$\vec{w}_1 = \vec{c}_1 - \vec{u}_1$$

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)



$$\vec{c}_2 = \vec{w}_2 + \vec{u}_2 \rightarrow Velocidad\ absoluta\ de\ una\ partícula\ de\ fluido\ a\ la\ salida.$$

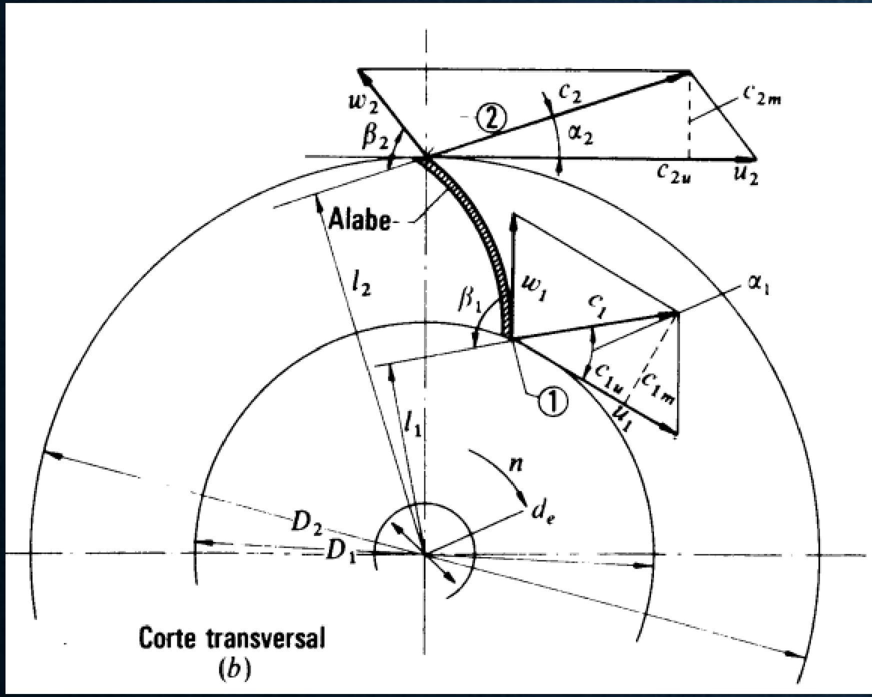
"La partícula de fluido ha sufrido, pues, en su paso por el rodete un cambio en la velocidad de $\vec{c}_1$ a $\vec{c}_2$.

Del *teorema de cantidad de movimiento* se deduce el *teorema de momento cinético*.

$$d\vec{F} = \rho dQ(\vec{c}_2 - \vec{c}_1) \rightarrow Teorema\ de\ cantidad\ de\ movimiento$$

$$dM = \rho dQ(I_2 c_2 - I_1 c_1) \rightarrow Teorema\ del\ momento\ cinético$$

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)



dM →Momento resultante con relación al eje de la máquina de todas las fuerzas que el rodete ha ejercido sobre las partículas que integran el filamento de corriente considerado para hacerle variar su momento cinético.

dQ →Caudal de filamento.

I_2, I_1 →Brazos de momentos de los c_2 y c_1 vectores respectivamente.

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)

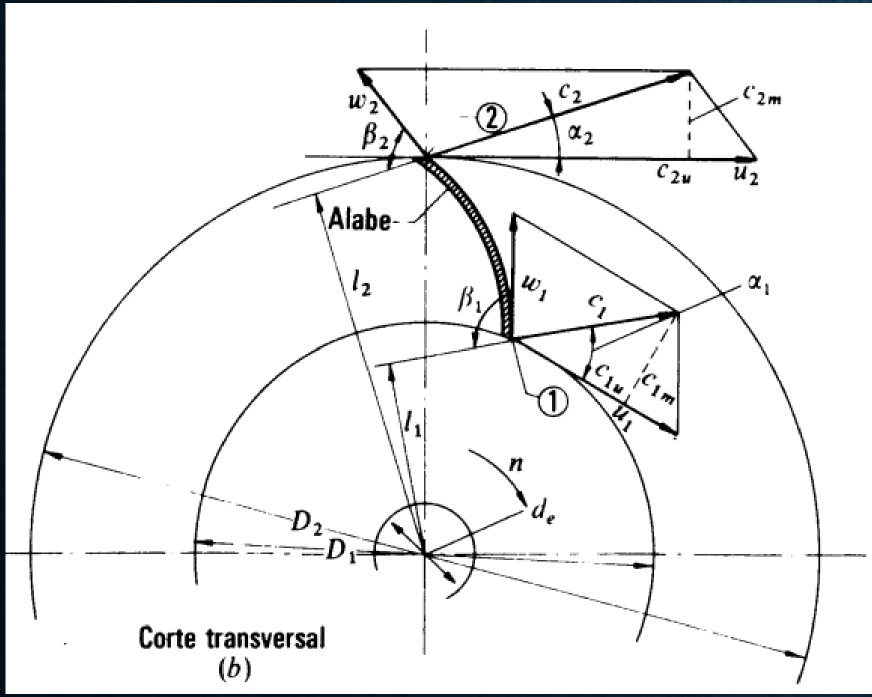
Todas las partículas de fluido entran en el rodete a un diámetro D_1 con la misma velocidad c_1, y salen a un diámetro D_2 con la misma velocidad c_2. Esto equivale a suponer que todos los filamentos de corriente sufren la misma desviación, lo cual a su vez implica que el número de álabes es infinito para que el rodete guíe al fluido perfectamente. Aplicando esta hipótesis llamada ***Teoría unidimensional***, o ***Teoría del número infinito de álabes***.

$$\boxed{M = \rho Q(l_2 c_2 - l_1 c_1)}$$

$M \rightarrow Momento\ total\ comunicado\ al\ fluido\ o\ momento\ hidráulico;$

$Q \rightarrow Caudal\ total\ de\ la\ bomba;$

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)



$$Sabiendo\ que\ \rightarrow I_1 = r_1 cos\alpha_1 \quad y \quad I_2 = r_2 cos\alpha_2$$

$$\boldsymbol{M = Q\rho(c_2 r_2 cos\alpha_2 - c_1 r_1 cos\alpha_1)}$$

$$Llamando\ velocidad\ angular\ del\ rodete\ \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\rightarrow la\ potencia\ que\ el\ rodete\ comunica\ al\ fluido\ será:$$

$$\boldsymbol{P_u = M\omega = Q\rho\omega(c_2 r_2 cos\alpha_2 - c_1 r_1 cos\alpha_1)}$$

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)

$$P_u = M\omega = Q\rho\omega(c_2 r_2 cos\alpha_2 - c_1 r_1 cos\alpha_1)$$

Si llamamos Y_u *a la energía específica intercambiada entre el rodete y el fluido y G al caudal másico que atraviesa el rodete, se tendrá:*

$$\boxed{\boldsymbol{P_u(W) = G\left(\frac{kg}{s}\right) Y_u\left(\frac{J}{kg}\right) = Q\left(\frac{m^3}{s}\right)\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) g\left(\frac{m}{s^2}\right) H_u(m)}}$$

$$\boldsymbol{G} \qquad \boldsymbol{Y_u}$$

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)

$$P_u = Q\rho Y_u = Q\rho\omega(c_2 r_2 cos\alpha_2 - c_1 r_1 cos\alpha_1)$$

$$r_1\omega = u_1 \qquad r_2\omega = u_2$$

$$c_1 cos\alpha_1 = c_{1u} \qquad c_2 cos\alpha_2 = c_{2u}$$

$Donde\ c_{1u}, c_{2u}\ -\ proyecciones\ de\ c_1\ y\ c_2\ sobre\ u_1\ y\ u_2, o\ componentes\ periféricas\ de\ las\ velocidades\ absolutas\ a\ la\ entrada\ y\ a\ la\ salida\ de\ los\ álabes.$

$$\boxed{\boldsymbol{Y_u = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}}$$

$(Ecuación\ de\ Euler: bombas, ventiladores\ y\ turbocompresores)$

$Las\ bombas, ventiladores\ y\ compresores\ (estos\ últimos\ dos\ son\ máquinas\ térmicas)\ son\ máquinas\ generadoras: el\ rodete\ imparte\ energía\ al\ fluido.$

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)

$$\boxed{Y_u = u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}}$$

(Ecuación de Euler: turbinas hidráulicas, turbinas de vapor y turbinas de gas)

Las turbinas hidráulicas, turbinas de vapor y turbinas de gas (estos últimos dos son máquinas térmicas) son máquinas motoras: el fluido imparte energía al rodete.

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS TURBOMÁQUINAS O ECUACIÓN DE EULER (PRIMERA FORMA)

$$\boldsymbol{Y_u = \pm(u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}) \rightarrow Expresión\ energética}$$

$$\boldsymbol{H_u = \pm\frac{(u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u})}{g} \rightarrow Expresión\ en\ alturas}$$

$(Ecuación\ de\ Euler, primera\ forma: bombas, ventiladores, turbocompresores, turbinas\ hidráulicas, turbinas\ de\ vapor\ y\ turbinas\ de\ gas: signo\ +\ máquinas\ motoras\ y\ signo\ -\ máquinas\ generadoras; unidades\ \frac{m^2}{s^2}\ SI)$

NOTAS DE LA ECUACIÓN DE EULER

1) *La ecuación de Euler es la ecuación fundamental de las turbomáquinas.*

2) *La altura Hu se denomina altura hidráulica.*

3) *La ecuación* $\vec{w}_1 = \vec{c}_1 - \vec{u}_1$ *empleada para deducir la ecuación de Euler, tanto el vector* $\vec{c}_1$ *como el vector* $\vec{c}_2$ *se encuentran en el plano del dibujo (plano transversal). Esto solo sucede en las máquinas radiales. En general, en una turbomáquina la velocidad de cada punto puede tener tres componentes, según los ejes r, u y a, que tienen la dirección del radio en dicho punto, la tangente y el eje de la máquina.*
   Sin embargo, al plantear la ecuación del momento cinético se llegaría a la misma ecuación $M = \rho Q(l_2 c_2 - l_1 c_1)$, *porque el momento de la componente axial* C_a *con relación al eje es nulo por ser paralela a él y el momento de la componente según el eje r* C_r *también, porque su dirección corta al eje, quedando solo el momento de* C_u, *igual a* $C_{1u} r_1$ *y* $C_{2u} r_2$ *a la entrada y salida, respectivamente.*

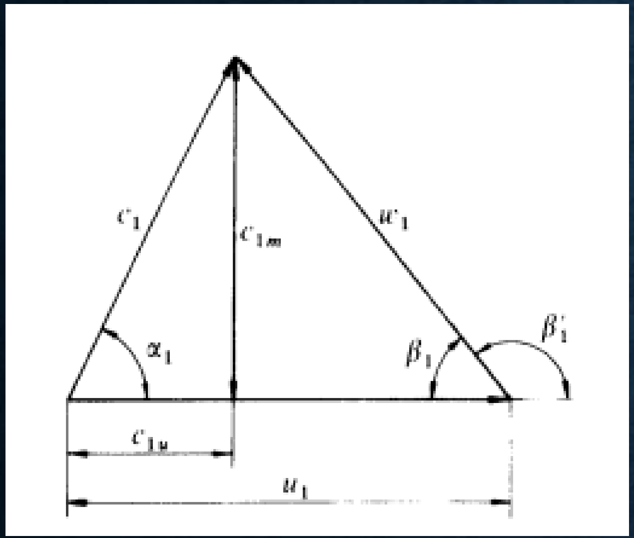
NOTAS DE LA ECUACIÓN DE EULER

4) $Y_u(H_u)$ *representa:*

- *En las bombas, ventiladores y compresores (turbomáquinas generadoras): la energía (altura) teórica comunicada al fluido;*
- *En las turbinas hidráulicas, de vapor y de gas (turbomáquinas motoras): la energía (altura) útil aprovechada por el rodete;*
- *En todas las turbomáquinas: la energía (altura) intercambiada en el rodete.*

5) *En el diseño de las turbomáquinas, a la atura* $H_u = \pm \frac{(u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u})}{g}$ *en la hipótesis de la teoría unidimensional o número infinito de álabes se denomina* $H_{u\infty}$ *y a la altura intercambiada en un rodete con número finito de álabes se denomina* H_u*. En las turbinas hidráulicas ambas alturas son prácticamente iguales, no así en las bombas.*

TRIÁNGULO DE VELOCIDADES



Triángulo de entrada

$$\vec{c}_1 = \vec{u}_1 + \vec{w}_1$$

$u_1 \rightarrow$ *velocidad absoluta del álabe a la entrada o velocidad periférica a la entrada.*

$c_1 \rightarrow$ *velocidad absoluta del fluido a la entrada.*

$w_1 \rightarrow$ *velocidad relativa a la entrada (del fluido con respecto al álabe).*

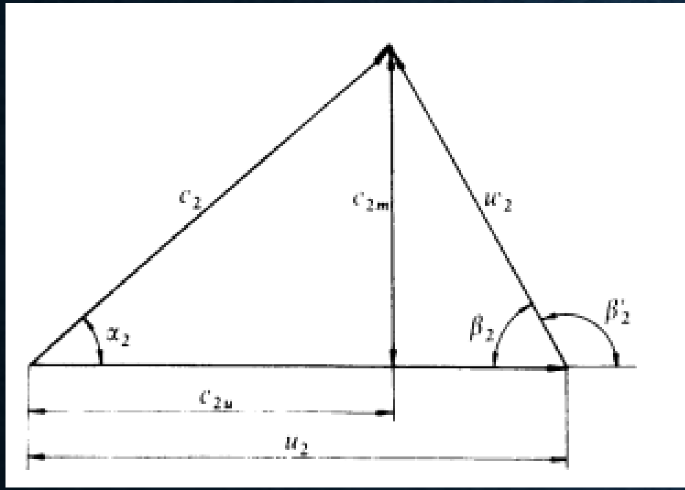
$c_{1m} \rightarrow$ *componente meridional de la velocidad absoluta del fluido a la entrada.*

$c_{1u} \rightarrow$ *componente periférica de la velocidad absoluta del fluido a la entrada.*

$\alpha_1 \rightarrow$ *ángulo que forman las dos velocidades* c_1 *y* u_1.

$\beta_1 \rightarrow$ *ángulo que forma* w_1 *con* $(-u_1)$.

TRIÁNGULO DE VELOCIDADES



$Triángulo\ de\ salida$

$$\vec{c}_2 = \vec{u}_2 + \vec{w}_2$$

$u_2 \rightarrow velocidad\ absoluta\ del\ álabe\ a\ la\ entrada\ o\ velocidad\ periférica\ a\ la\ salida.$

$c_2 \rightarrow velocidad\ absoluta\ del\ fluido\ a\ la\ salida.$

$w_2 \rightarrow velocidad\ relativa\ a\ la\ salida\ (del\ fluido\ con\ respecto\ al\ álabe).$

$c_{2m} \rightarrow componente\ meridional\ de\ la\ velocidad\ absoluta\ del\ fluido\ a\ la\ salida.$

$c_{2u} \rightarrow componente\ periférica\ de\ la\ velocidad\ absoluta\ del\ fluido\ a\ la\ salida.$

$\alpha_2 \rightarrow ángulo\ que\ forman\ las\ dos\ velocidades\ c_2\ y\ u_2.$

$\beta_2 \rightarrow ángulo\ que\ forma\ w_2\ con\ (-u_2).$

TAREA

Demostrar que las expresiones energéticas y en alturas de las ecuaciones de Euler deducidas a partir del triángulo de velocidades son perfectamente válidas.

$$\boldsymbol{Y_u = \pm\left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2}\right) \rightarrow Expresión\ energética}$$

$$\boldsymbol{H_u = \pm\left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}\right) \rightarrow Expresión\ en\ alturas}$$

$$(Ecuación\ de\ Euler, primera\ forma: bombas, ventiladores, turbocompresores, turbinas\ hidráulicas, turbinas\ de\ vapor\ y\ turbinas\ de\ gas: signo\ +\ máquinas\ motoras\ y\ signo\ -máquinas\ generadoras; unidades\ \frac{m^2}{s^2}\ SI)$$

ECUACIÓN DE EULER

Si planteamos Bernoulli a la entrada y a la salida del rodete (puntos 1 y 2) sin tener en cuenta las pérdidas en el mismo, se tendrá.

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{v_1^2}{2g}+z_1-H_u=\frac{p_2}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g}+z_2 \rightarrow Despresciando\ la\ diferencia\ de\ alturas\ z_2-z_1,$$

$$y\ considerando\ v_1\ y\ v_2\ iguales\ a\ c_1\ y\ c_2, respectivamente.$$

$$H_u=\pm\left(\frac{p_1-p_2}{\gamma}+\frac{c_1^2-c_2^2}{2g}\right)$$

$$Además\ se\ sabe\ que\ \rightarrow\ H_u=\pm\left(\frac{u_1^2-u_2^2}{2g}+\frac{w_2^2-w_1^2}{2g}+\frac{c_1^2-c_2^2}{2g}\right)$$

ECUACIÓN DE EULER

$$H_u = \pm\left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}\right) = \pm\left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}\right)$$

$$\boldsymbol{H_p = \pm\left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma}\right) = \pm\left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}\right) \rightarrow altura\ de\ presi\acute{o}n\ del\ rodete}$$

$$(Signos +: turbinas, signo -: bombas\ )$$

$$\boldsymbol{H_d = \pm\left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}\right) \rightarrow altura\ din\acute{a}mica\ del\ rodete}$$

$$(Signos +: turbinas, signo -: bombas\ )$$

GRADO DE REACCIÓN

El grado de reacción de una turbomáquina se refiere al modo cómo trabaja el rodete. Así, por ejemplo, en una bomba se debe distinguir la altura de presión que da la bomba H_u y la altura de presión que da el rodete de la bomba H_p. La primera normalmente es mayor que H_p porque la bomba tiene además de un rodete un sistema difusor, que transforma energía dinámica que da el rodete, H_d en energía de presión, que sumada a la energía de presión del rodete constituye la energía de presión que da toda la bomba. De manera análoga sucede en una turbina.

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{H_p}{H_u}}$$

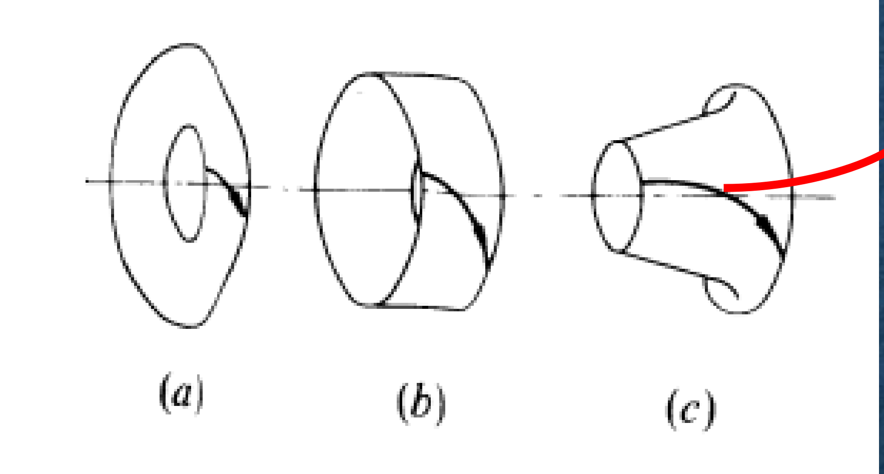
Grado de Reacción Teórico

GRADO DE REACCIÓN

$-\,Si\ H_p < 0, el\ grado\ de\ reacción\ es\ negativo.$
$-\,Si\ H_p = 0, el\ grado\ de\ reacción\ es\ 0.$
$-\,Si\ 0 < H_p < H_u, el\ grado\ está\ comprendido\ entre\ 0\ y\ 1, que\ es\ el\ caso\ normal.$
$-H_p > H_u, el\ grado\ de\ reacción\ es\ mayor\ a\ 1.$

Todas las máquinas en que $Si\ H_p = 0$ se llaman de acción. Todas las bombas son de reacción; las bombas de acción no se construyen. Las turbinas de acción constituyen la clase importante de las turbinas Pelton.
Si el rodete da (bomba) o absorbe (turbina) la mitad de su energía en forma de presión y la otra mitad en energía dinámica, el grado de reacción es $^1/_2$. (Es muy frecuente construir las turbinas de vapor y las turbinas de gas con grado de reacción igual a $^1/_2$).

CLASIFICACIÓN DE LAS TURBOMÁQUINAS SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO EN EL RODETE



Trayectoria de una partícula que atraviesa el rodete

$(a) \rightarrow Máquina\ radial.$

$(b) \rightarrow Máquina\ axial.$

$(c) \rightarrow Máquina\ radioaxial, también\ llamda\ de\ flujo\ mixto\ o, semi - axial.$

CLASIFICACIÓN DE LAS TURBOMÁQUINAS SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO EN EL RODETE

En cualquier punto de la trayectoria de una partícula se pueden dibujar tres ejes: r, u, a, dirigidos según el radio, la tangente y el eje de la máquina:

1) *En la máquina radial la velocidad en ningún punto (del rodete) tiene componente axial (según el eje a); solo tiene dos componentes: tangencial y radial.*
2) *En la máquina axial la velocidad en ningún punto tiene componente radial (según el eje r); solo tiene dos componentes: axial y periférica. En las máquinas axiales* $u_1 = u_2$*. El efecto de la fuerza centrífuga es nula. Una bomba axial no es una bomba centrífuga.*
3) *En la máquina radio-axial la velocidad tiene las tres componentes según los tres ejes.*
4) *En ninguna máquina falta la componente periférica,* C_u*, cuya variación a su paso por la máquina, según la ecuación de Euler, es esencial en la transmisión de energía.*

CLASIFICACIÓN DE LAS TURBOMÁQUINAS SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO EN EL RODETE

5) *Las turbinas hidráulicas Pelton constituyen una clase especial, porque en ellas el flujo es meramente tangencial.*
6) *Las turbinas hidráulicas son rara vez radiales. Las turbinas hidráulicas más frecuentes son las turbinas Francis, que son máquinas radio-axiales.*

MECÁNICA DE LOS FLUIDOS Y MÁQUINAS

UNIDAD N°10: Turbomáquinas hidráulicas: Bombas rotodinámicas

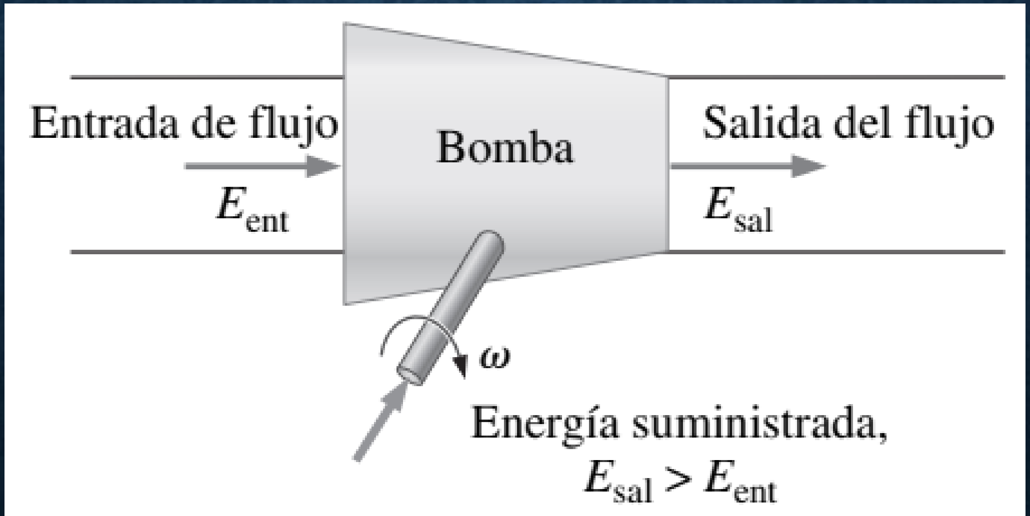
Docentes:

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

INTRODUCCIÓN

Una ***Bomba*** es una máquina que absorbe ***energía mecánica*** y restituye al líquido que la atraviesa ***energía hidráulica***.

Las bombas se clasifican en rotodinámicas y bombas de desplazamiento positivo. Nos ocuparemos de las bombas rotodinámicas que son turbomáquinas y que cumplen con la ecuación de Euler.



BOMBAS ROTODINÁMICAS. CLASIFICACIÓN.

Las bombas rotodinámicas son siempre rotativas. Su funcionamiento se basa en la ecuación de Euler; y su órgano transmisor de energía se llama rodete.

Se denominan rotodinámicas porque su movimiento es rotativo y la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de la energía.

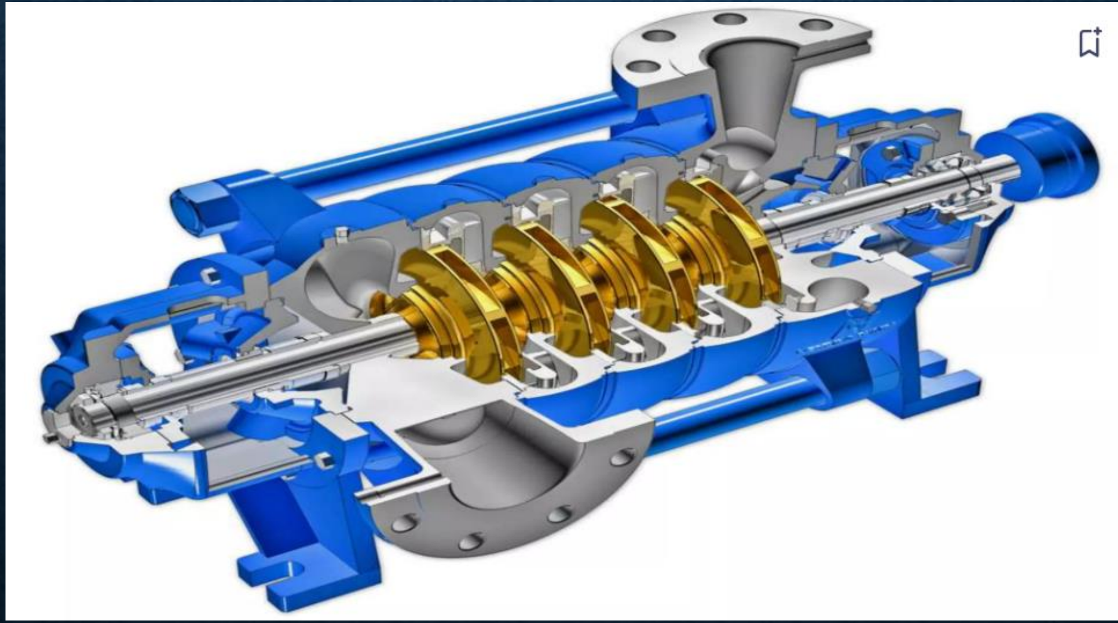
Clasificación:

- Según la dirección del flujo: bombas de flujo radial, de flujo axial y de flujo radio-axial.
- Según la posición del eje: bombas de eje horizontal, de eje vertical y de eje inclinado.
- Según la presión engendrada: bombas de baja presión, de media presión y de alta presión.

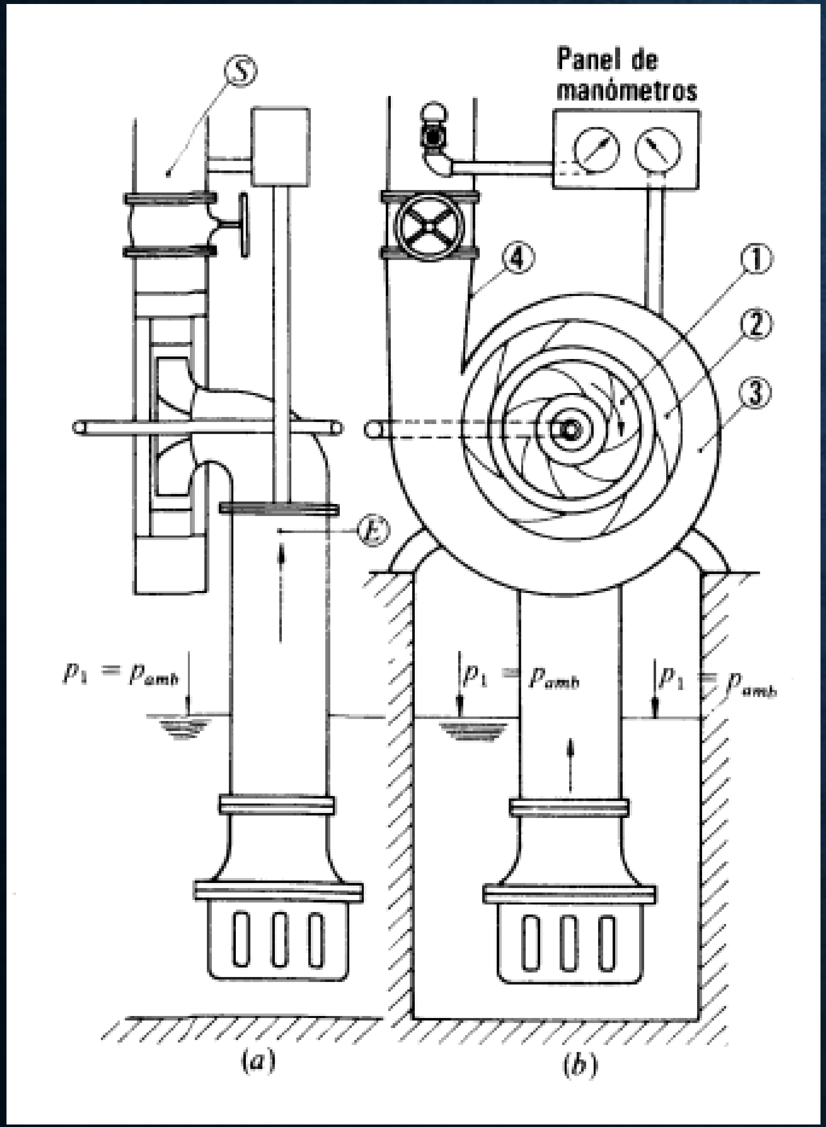
BOMBAS ROTODINÁMICAS. CLASIFICACIÓN.

Clasificación:

- Según el número de flujos en la bomba: de simple aspiración o de un flujo y de doble aspiración, o de dos flujos.
- Según el número de rodetes: de un escalonamiento o de varios escalonamientos.



BOMBA CENTRÍFUGA: ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

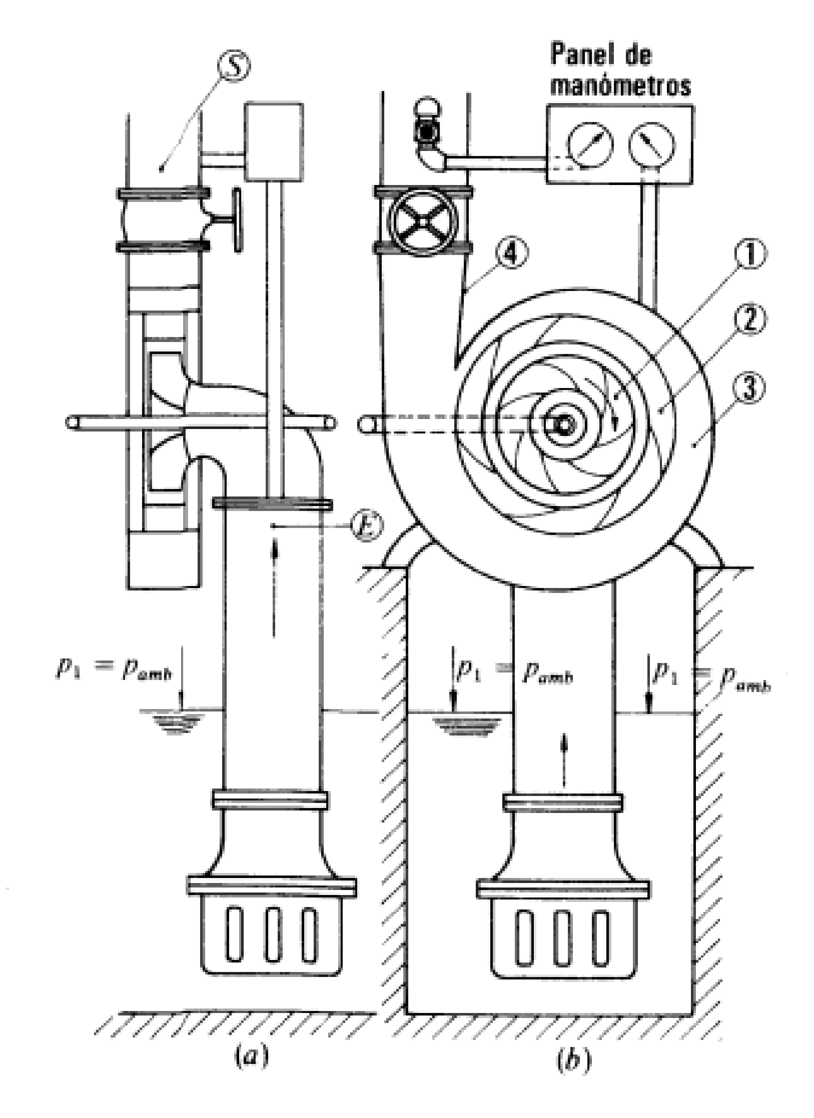


En la figura se presenta una bomba radial de eje horizontal en el cual se puede observar:

1) *Rodete.*
2) *Corona directriz.*
3) *Caja espiral.*
4) *Tubo difusor troncocónico.*

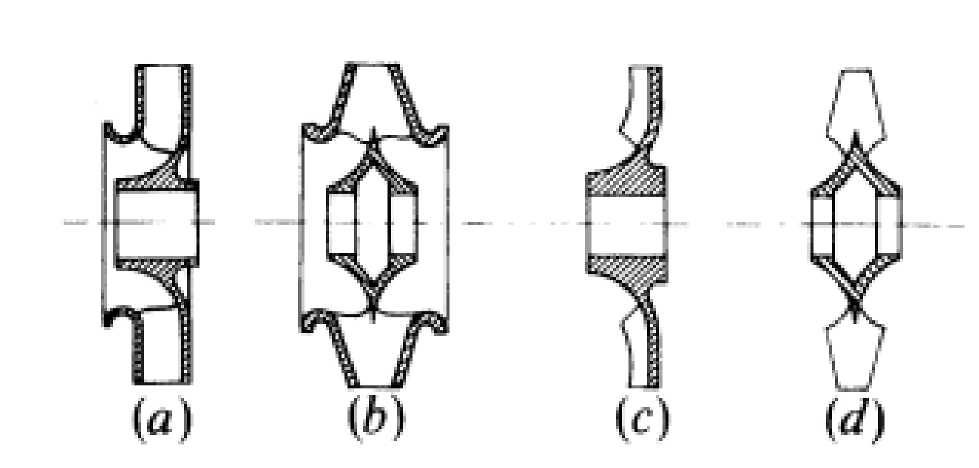
La sección de entrada de una bomba se toma antes de la brida de conexión del tubo de aspiración, sección E. La sección de salida se toma después de la brida de conexión del tubo de impulsión, sección S. La bomba empieza en la sección E y termina en la sección S.

BOMBA CENTRÍFUGA: ELEMENTOS CONSTITUTIVOS



Todas las pérdidas de energía que tienen lugar entre las secciones E y S son imputables a la bomba y disminuyen el rendimiento de la bomba; pero las pérdidas que tienen lugar antes de la sección E (en el tubo de aspiración) y después de la sección S (en el tubo de impulsión) son imputables a la instalación y disminuyen el rendimiento de la instalación (no de la bomba).

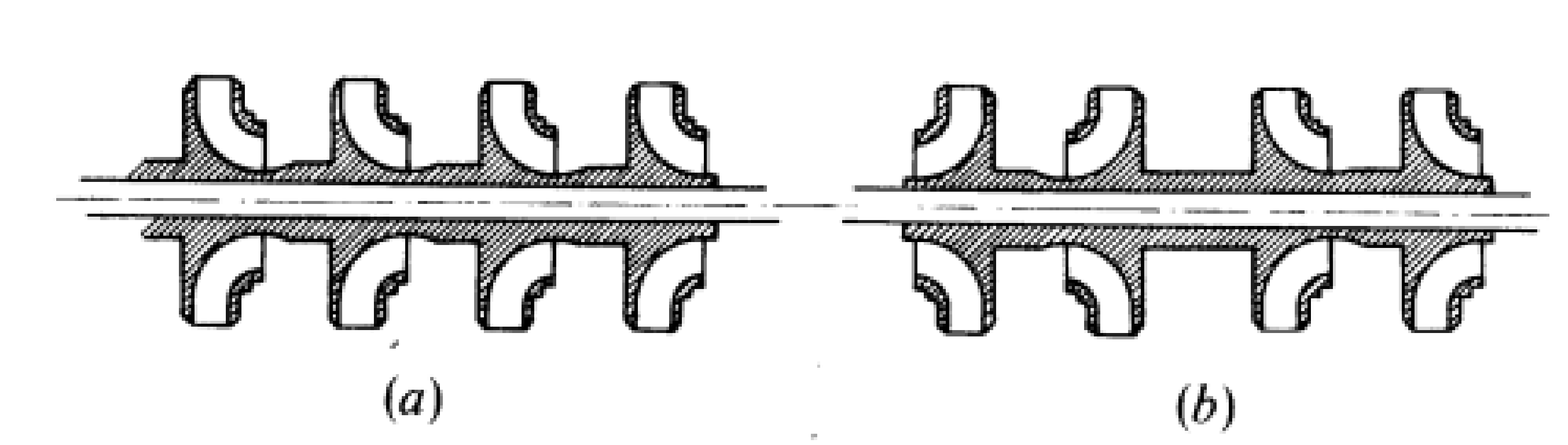
RODETE: CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS POR EL NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES



Los rodetes se clasifican en cuatro tipos:

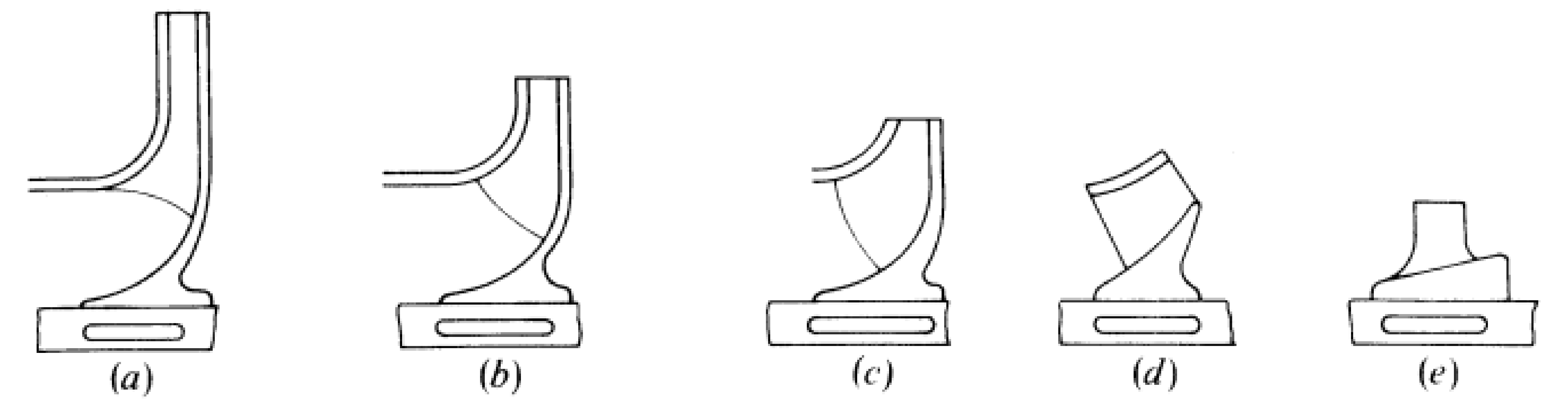
- Rodete cerrado de simple aspiración: las caras anterior y posterior forman una caja: entre ambas caras se fijan los álabes.
- Rodete cerrado de doble aspiración.
- Rodete semiabierto de simple aspiración: sin la cara anterior, los álabes se fijan solo en la cara posterior.
- Rodete abierto de doble aspiración sin cara anterior ni posterior: los álabes se fijan en el núcleo del cubo del rodete.

RODETE: CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS POR EL NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES



Cuando en las bombas se presentan varios escalonamientos, el caudal que sale de un rodete ingresa al siguiente, esto genera que en el caso a) se genere un gran empuje axial en la bomba, mientras que con la disposición de la bomba b) el empuje se encuentra equilibrado. Esto hace que la disposición de la bomba con un sistema escalonado como la situación b) sea preferible.

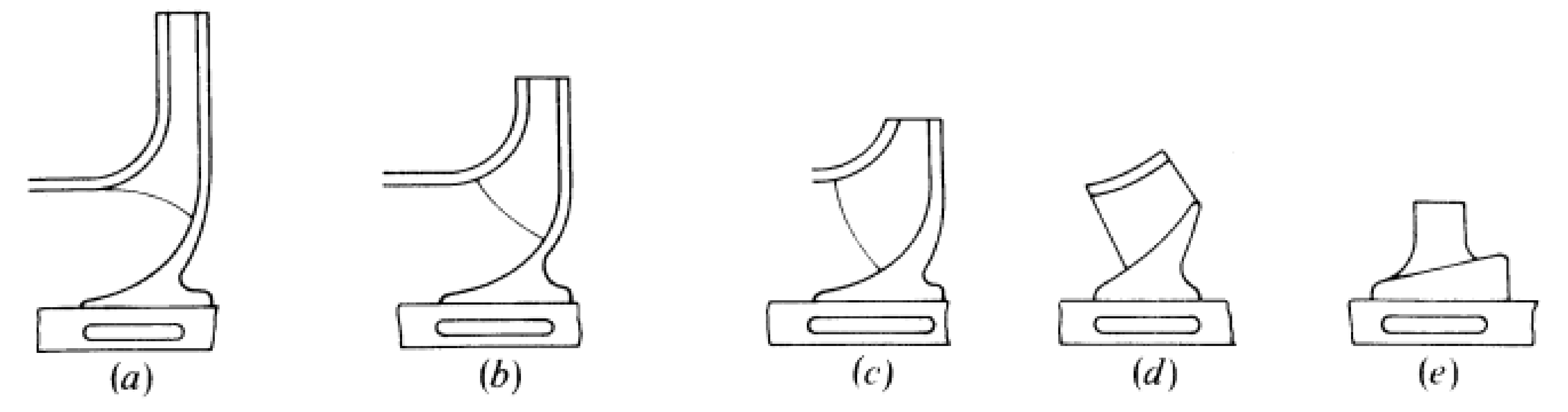
RODETE: CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS POR EL NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES



Las figuras están dibujadas en la misma escala y todas necesitarían la misma potencia:

- En la figura a) el flujo es totalmente radial y la diferencia de diámetros de entrada D_1 y salida, D_2 es máxima.
- De la figura b) hasta la d) el flujo es cada vez más axial.
- En la figura d) el rodete es claramente semi-axial o mixto.
- En la figura e) el flujo es totalmente axial.

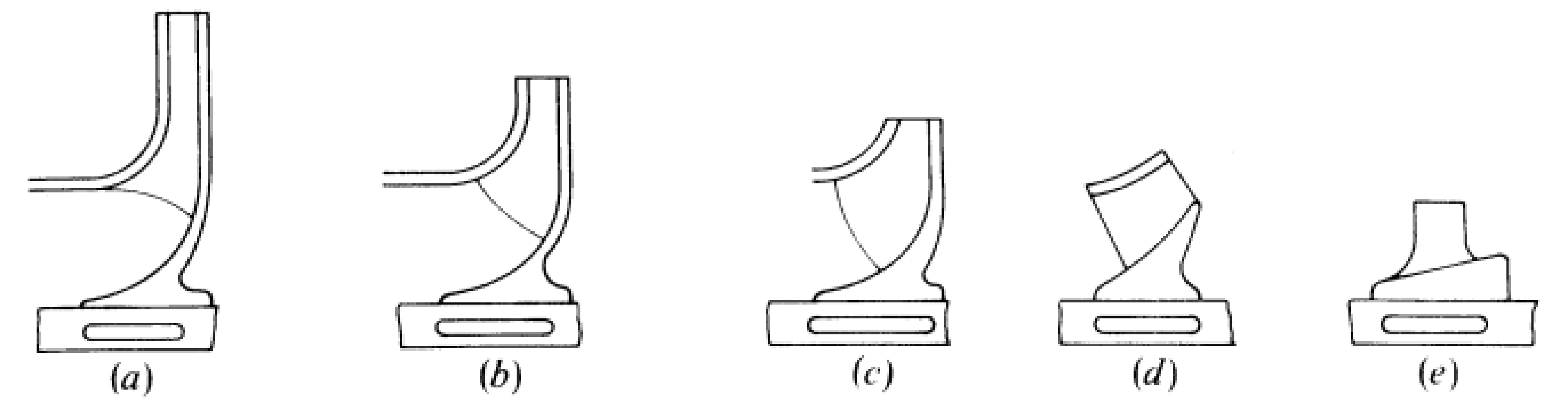
RODETE: CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS POR EL NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES



Cada uno de los cinco rodetes representa una familia de rodetes ***geométricamente semejantes.*** El tamaño se ajustará a la potencia.

La clasificación más precisa de las bombas rotodinámicas es una clasificación numérica, asignando a toda la familia de bombas geométricamente semejantes un número, a saber, el NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES.

RODETE: CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS POR EL NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES

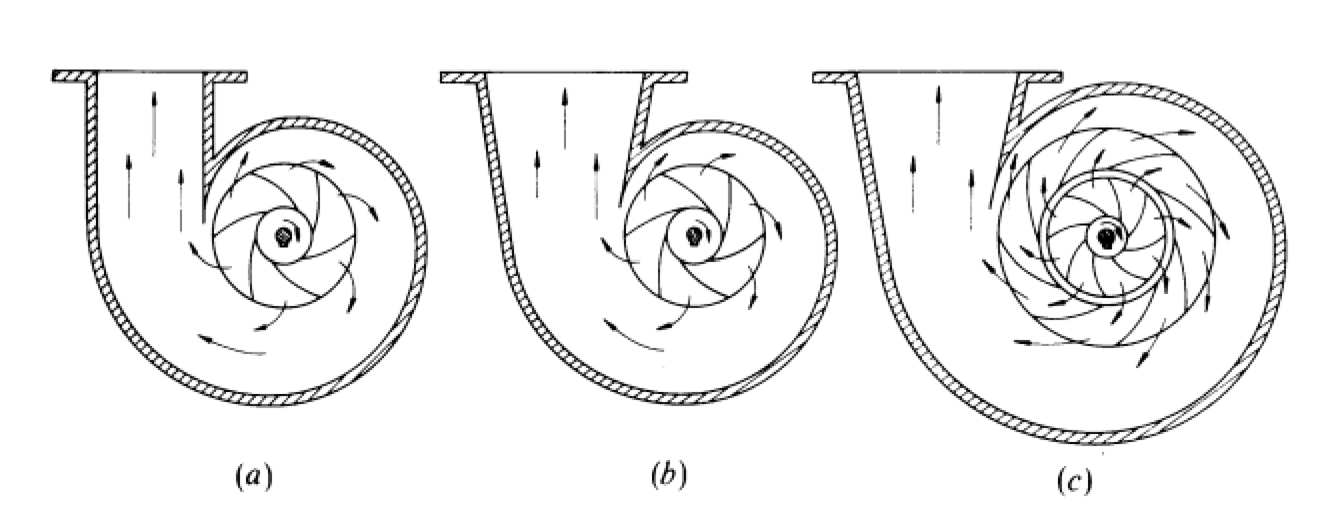


$$\boxed{\boldsymbol{n_s = nP^{1/2}H^{-5/4}}}$$

$$n_s = n(rps)P^{1/2}(W)H^{-5/4}(m) \rightarrow SI$$

$$n_s = n(rpm)P^{1/2}(CV)H^{-5/4}(m) \rightarrow son\ las\ unidades\ más\ utilizadas$$

SISTEMA DIFUSOR



- Corona directriz.
- Caja espiral.
- Cono difusor.

El papel de los tres elementos es el mismo: transformar la energía dinámica que da el rodete en energía de presión con el mínimo de pérdidas.

CEBADO DE UNA BOMBA

Las bombas rotodinámicas no son autocebantes a diferencia de las bombas de embolo y en general todas las bombas desplazamiento positivo.

¿Qué es el cebado de una bomba?

El cebado de una bomba es un proceso previo al funcionamiento de la misma, que consiste en eliminar el aire de la bomba y de la tubería de succión. Esto se hace para que la presión atmosférica y la presión de inundación puedan hacer fluir el líquido hacia la bomba.

CEBADO DE UNA BOMBA

¿Para qué sirve el cebado de una bomba?

El cebado de una bomba es esencial por las siguientes razones:

- Permite que la bomba funcione correctamente.
- Si la bomba no está cebada, no podrá generar la presión necesaria para extraer el líquido y bombearlo a donde debe ir.
- Evita daños a la bomba: El funcionamiento de una bomba sin cebar puede provocar daños a la misma, como cavitación, sobrecalentamiento y desgaste prematuro.
- Asegura que no haya fugas: El cebado ayuda a asegurar que no haya fugas en el sistema de tuberías.
- Evita el reflujo: Una vez que la bomba está cebada, se evita el reflujo del líquido hacia la fuente de suministro.

CEBADO DE UNA BOMBA

Si la bomba está llena de aire (bomba descebada) el incremento de presión creada por la bomba, suponiendo en el aire la densidad normal $\rho_{aire} = 1{,}29\, {}^{kg}/_{m^3}$, será:

$$\Delta p = \rho_{aire} \cdot g \cdot H = 1{,}29 \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot 100 = 1265{,}5Pa$$

$$Sería\ equivalente\ a\ una\ columna\ de\ agua\ de \rightarrow \frac{1265{,}5Pa}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2}} = 0{,}129m$$

“Que sería la altura máxima a que subiría el agua por la tubería de aspiración”.

CEBADO DE UNA BOMBA

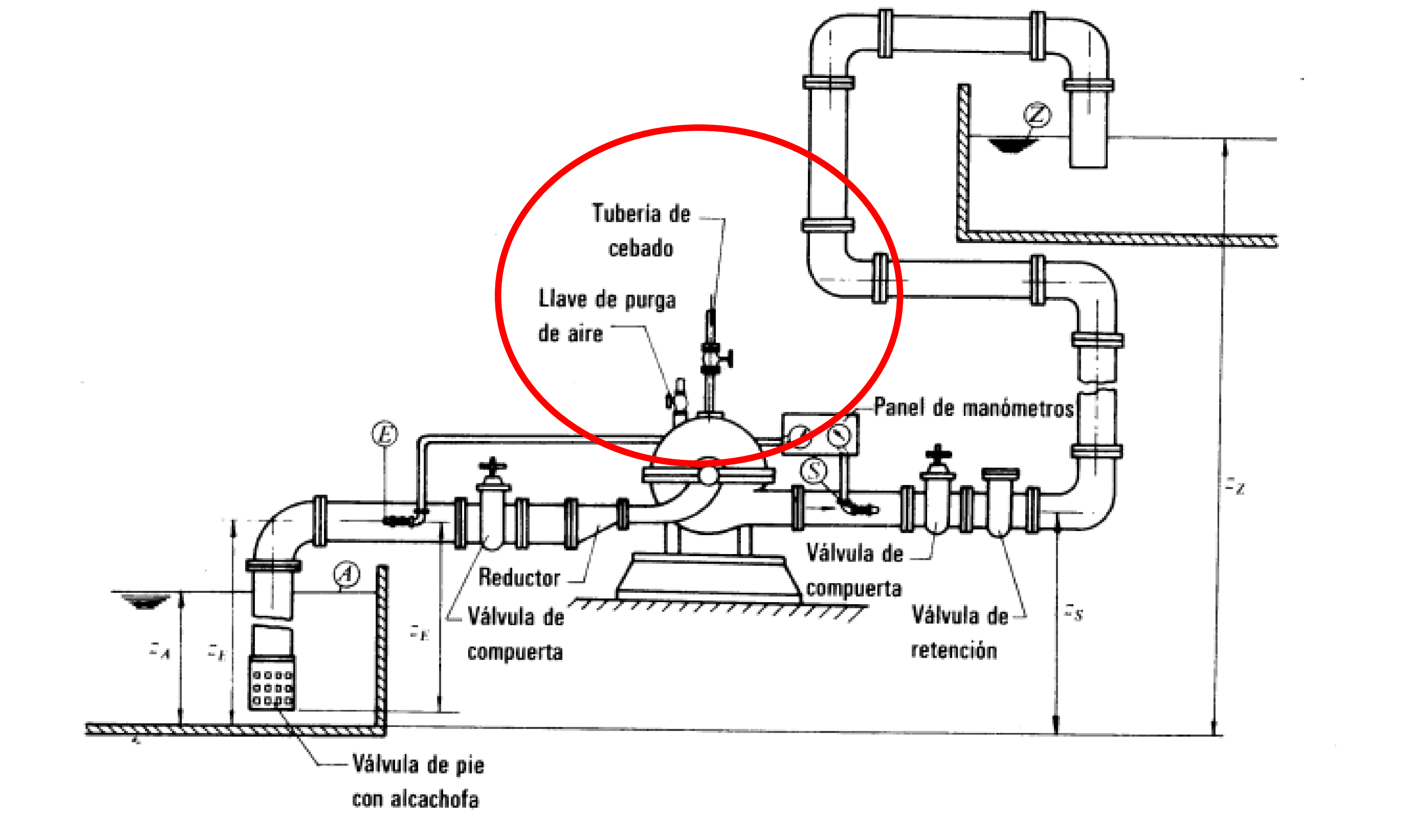
Si la bomba está llena de agua (bomba cebada) el incremento de presiones creado por la bomba, será:

$$\Delta p = \rho_{agua} \cdot g \cdot H = 1000\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81\frac{m}{s^2} \cdot 100 = 981000Pa$$

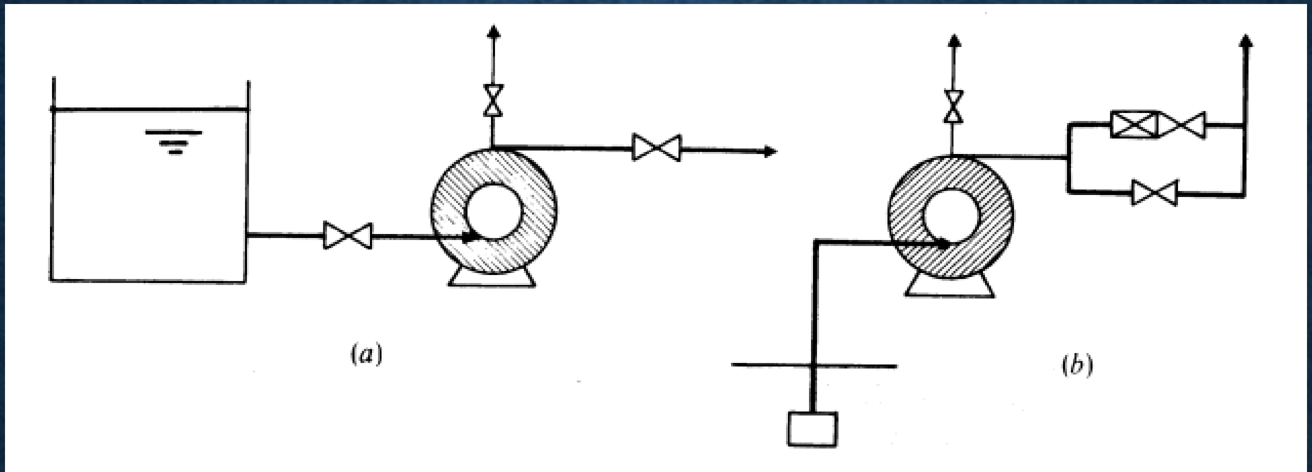
$$Sería\ equivalente\ a\ una\ columna\ de\ agua\ de \rightarrow \frac{981000Pa}{1000\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81\frac{m}{s^2}} = 100m$$

“Que sería la altura máxima a que subiría el agua por la tubería de aspiración” y por lo tanto la bomba ya podrá aspirar.

CEBADO DE UNA BOMBA



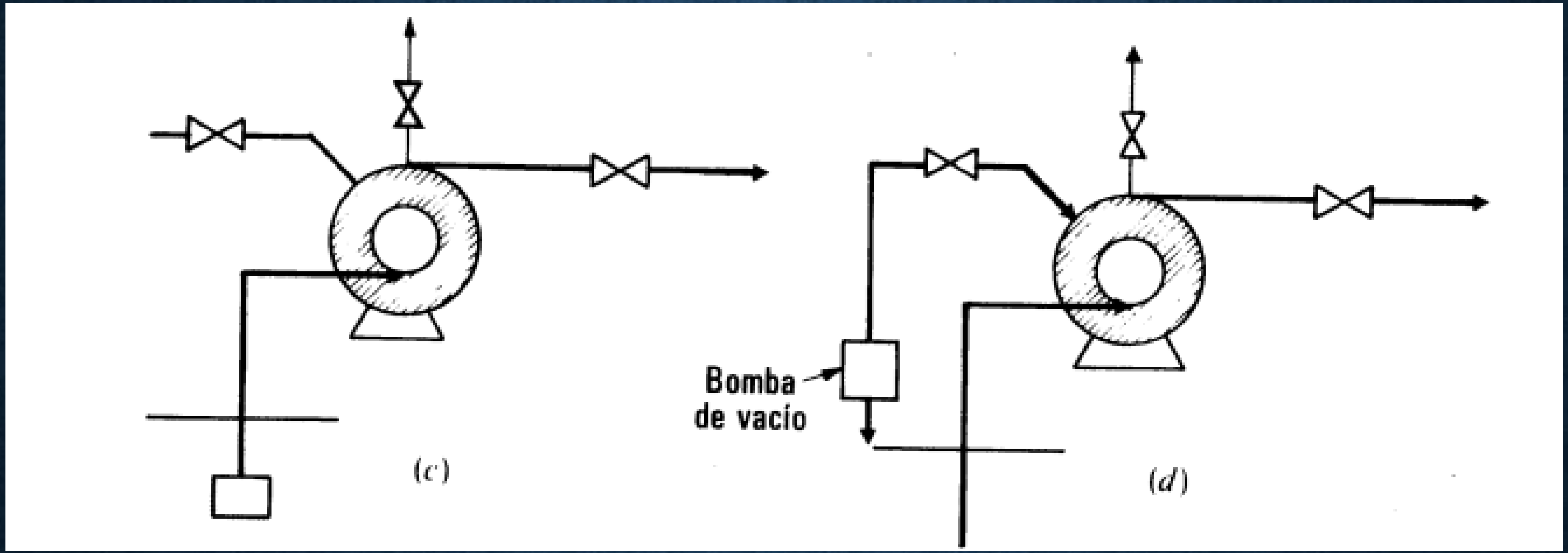
ESQUEMAS UTILIZADOS EN EL CEBADO DE UNA BOMBA ROTODINÁMICA



a. La bomba se ceba abriendo la válvula dispuesta en la línea de aspiración (este esquema exige que la bomba esté instalada en carga: eje de la bomba por debajo del nivel de depósito de aspiración).

b. En la tubería de impulsión en paralelo con la válvula de impulsión y de retención se dispone la válvula de cebado: gracias a la válvula de retención, la tubería retiene líquido cuando la bomba se para.

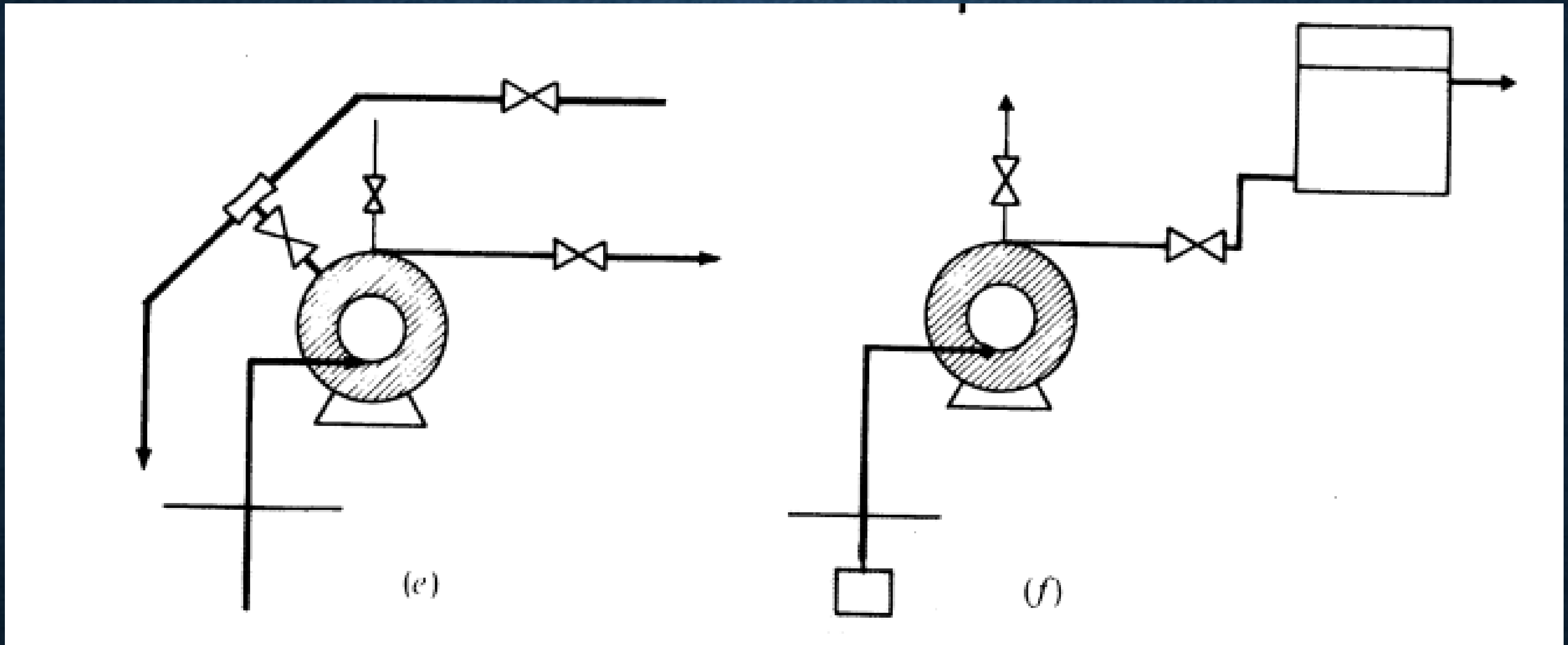
ESQUEMAS UTILIZADOS EN EL CEBADO DE UNA BOMBA



c. La válvula situada a la izquierda es la válvula de cebado y la pequeña válvula dispuesta verticalmente es un grifo de purga que deja escapar agua durante el cebado; los esquemas b), c) y f) precisan una válvula de pie.

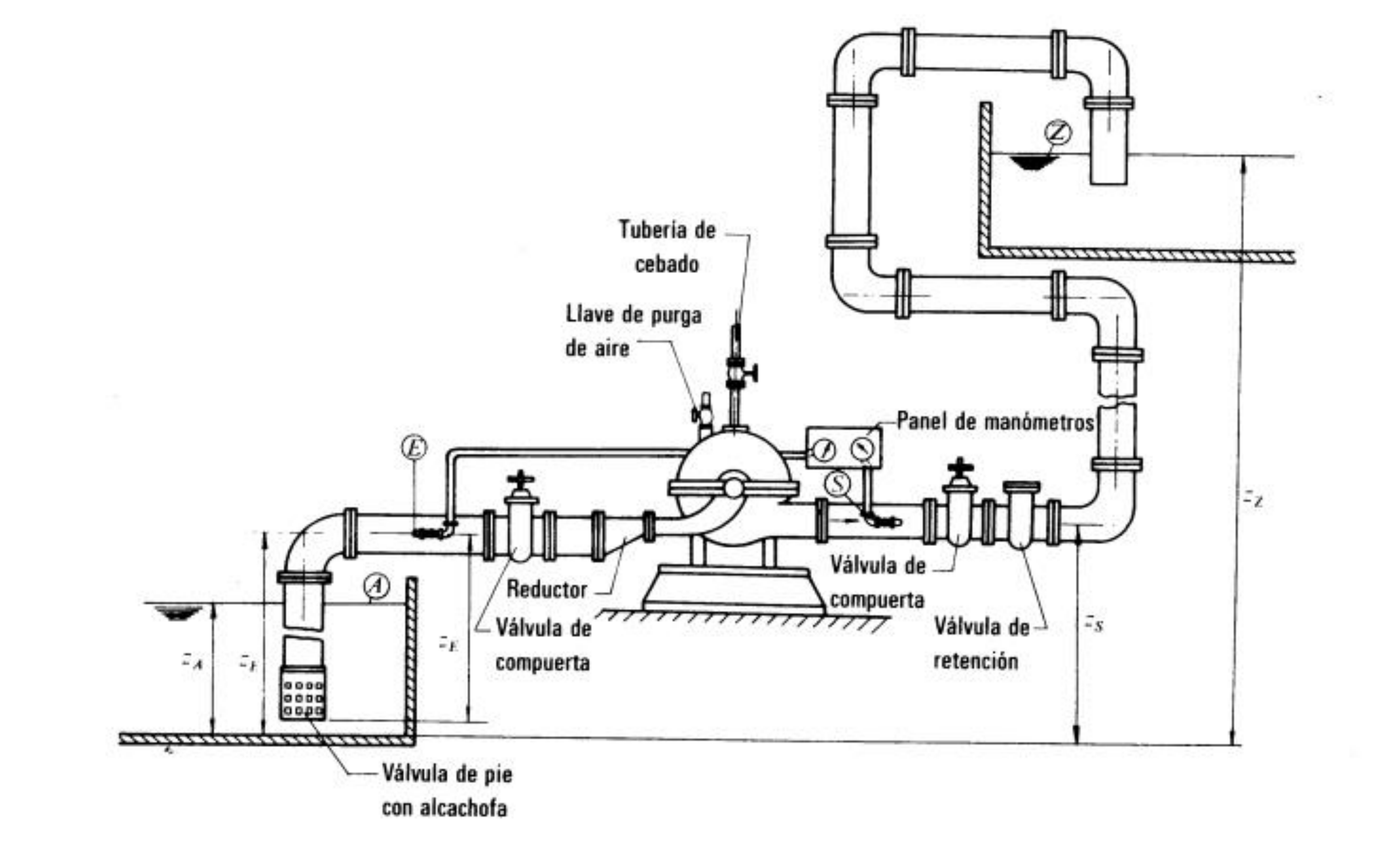
d. Cebado con bomba de vacío.

ESQUEMAS UTILIZADOS EN EL CEBADO DE UNA BOMBA



e. Cebado con eyector; los esquemas d) y e) al eliminar la válvula de pie disminuyen el riesgo de cavitación.
f. Depósito intercalado en la tubería de impulsión que retiene el líquido necesario para el cebado.

INSTALACIÓN DE LA BOMBA



ALTURA ÚTIL O EFECTIVA DE UNA BOMBA

$$H_u = \frac{(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u})}{g} \rightarrow Ecuación\ de\ Euler\ de\ las\ bombas$$

Es la altura que el rodete imparte al fluido. Si no hubiera pérdidas en el interior de la bomba sería también el aumento de altura que experimentaría el fluido entre la entrada y la salida de la bomba (secciones E y S). Sin embargo, en el interior de la bomba se producen como ya hemos dicho pérdidas hidráulicas $H_{r\text{-}int}$.

$$H = H_u - H_{r-int} \rightarrow Altura\ útil\ o\ efectiva\ de\ una\ bomba$$

Altura útil o altura efectiva H que da la bomba es la altura que imparte el rodete a la altura teórica, H_u, menos las pérdidas en el interior de la bomba, $H_{r\text{-}int}$.

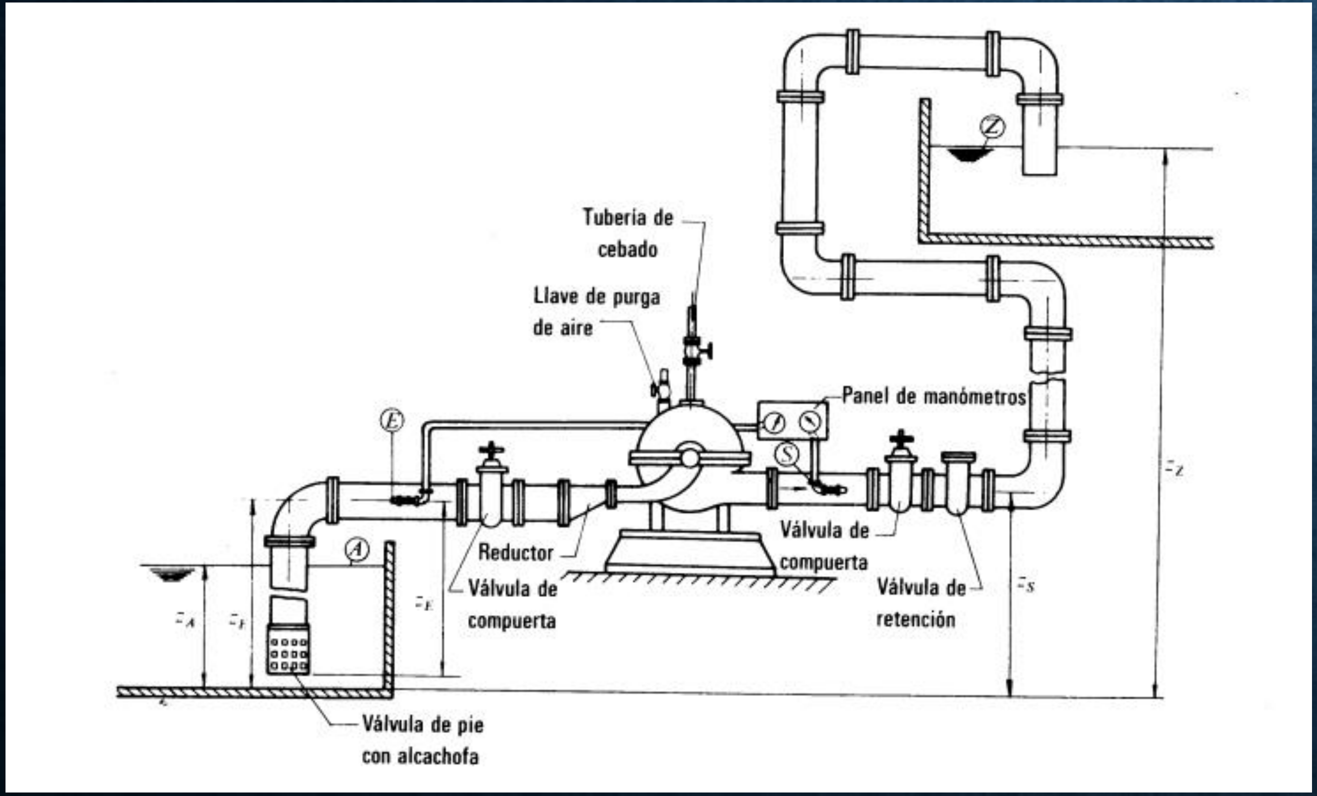
ALTURA ÚTIL Y ENERGÍA ÚTIL: PRIMERA EXPRESIÓN

Planteamos Bernoulli entre las secciones E y S.

$$\frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} + z_E - H = \frac{p_S}{\gamma} + \frac{v_S^2}{2g} + z_S$$

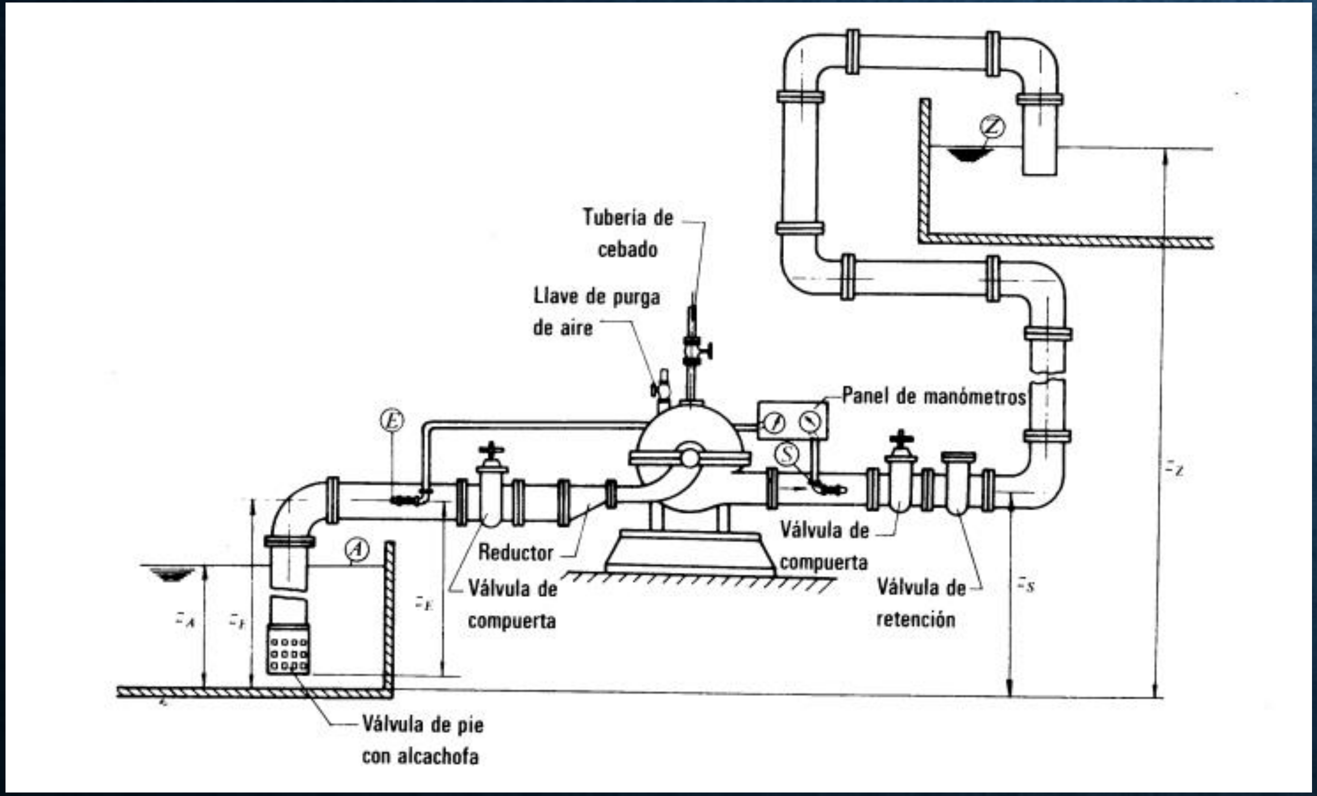
$$H = \left(\frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} + z_E\right) - \left(\frac{p_S}{\gamma} + \frac{v_S^2}{2g} + z_S\right)$$

$$\boxed{H = \left(\frac{p_E - p_S}{\gamma} + \frac{v_E^2 - v_S^2}{2g} + z_E - z_S\right)}$$



ALTURA ÚTIL Y ENERGÍA ÚTIL: PRIMERA EXPRESIÓN

Planteamos Bernoulli entre las secciones E y S.



$$H = \left(\frac{p_E - p_S}{\gamma} + \frac{v_E^2 - v_S^2}{2g} + z_E - z_S \right)$$

$$\boldsymbol{Y = \left(\frac{p_E - p_S}{\rho} + \frac{v_E^2 - v_S^2}{2} + (z_E - z_S)g \right)}$$

ALTURA ÚTIL Y ENERGÍA ÚTIL: PRIMERA EXPRESIÓN

$$H = \left(\frac{p_E - p_S}{\gamma} + \frac{v_E^2 - v_S^2}{2g} + z_E - z_S \right)$$

Notas:

- El término $z_E - z_S$ suele ser o muy pequeño o incluso igual a 0 en las bombas de eje vertical.
- El término $\frac{v_E^2 - v_S^2}{2g}$ suele ser también muy pequeño o igual a 0: positivo, aunque pequeño si el diámetro de la tubería de aspiración se hace mayor que el de la tubería de impulsión, para evitar la cavitación; igual a 0, si $D_s = D_E$.

ALTURA ÚTIL Y ENERGÍA ÚTIL: PRIMERA EXPRESIÓN

Notas:

- Luego en algunos casos:

$$H = \frac{p_E - p_S}{\gamma} = M_s + M_E$$

$$\left(\frac{v_E^2 - v_S^2}{2g} \approx 0; z_E - z_S \approx 0.\ Bomba\ en\ aspiración \right)$$

$M_s \rightarrow Lectura\ del\ manómetro\ a\ la\ salida: el\ signo + suma\ los\ valores\ absolutos\ de\ las\ lecturas; porque\ la\ presión\ a\ la\ entrada\ suele\ ser\ negativa: vacuómetro.$

$M_E \rightarrow Lectura\ del\ manómetro\ a\ la\ entrada$

ALTURA ÚTIL Y ENERGÍA ÚTIL: PRIMERA EXPRESIÓN

Notas:

- Luego en algunos casos:

$$H = \frac{p_E - p_S}{\gamma} = M_s + M_E$$

$$\left(\frac{v_E^2 - v_S^2}{2g} \approx 0; z_E - z_S \approx 0.\ Bomba\ en\ aspiración\right)$$

- La ecuación anterior suele dar una buena aproximación del valor de H.
- No se debe utilizar sin ver si se cumplen al menos con aproximación las hipótesis en que se funda. Si, por ejemplo, la bomba no está instalada en aspiración, sino en carga (eje de la bomba en cota inferior al nivel del depósito de aspiración) el manómetro a la entrada marcará una presión positiva y en la fórmula anterior figurará el signo – en vez del +.

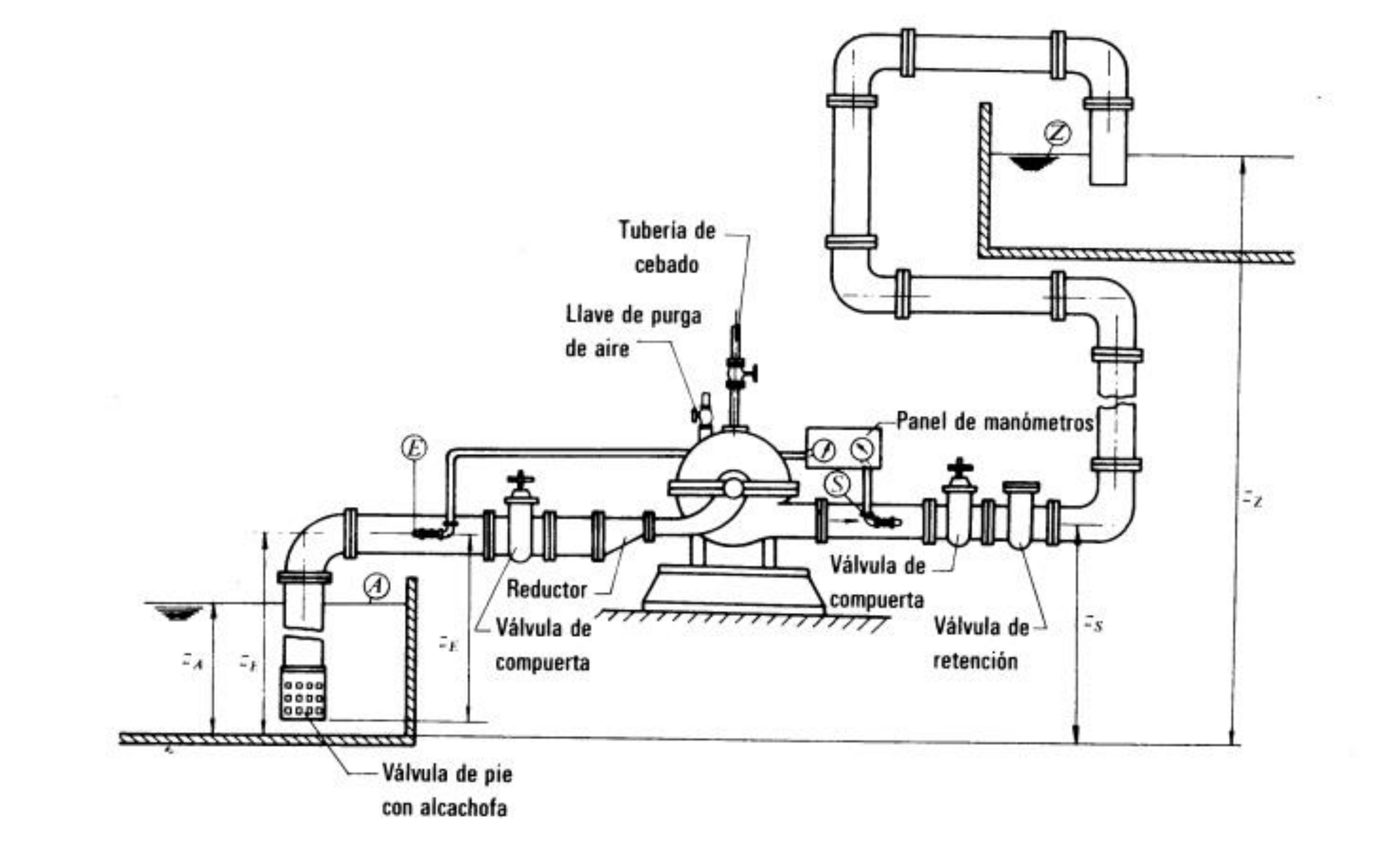
ALTURA ÚTIL Y ENERGÍA ÚTIL: PRIMERA EXPRESIÓN

Notas:

- Como en las instalaciones normales no suele existir vacuómetro a la entrada, conviene advertir que la altura útil H no es igual a la lectura del manómetro.
- La altura útil para las condiciones óptimas de servicio de la bomba debe figurar, junto con el caudal Q y el número de revoluciones n en la placa característica de la máquina.

TAREA

Deducir la expresión de altura útil y energía útil aplicando Bernoulli entre los puntos A y Z del siguiente esquema.



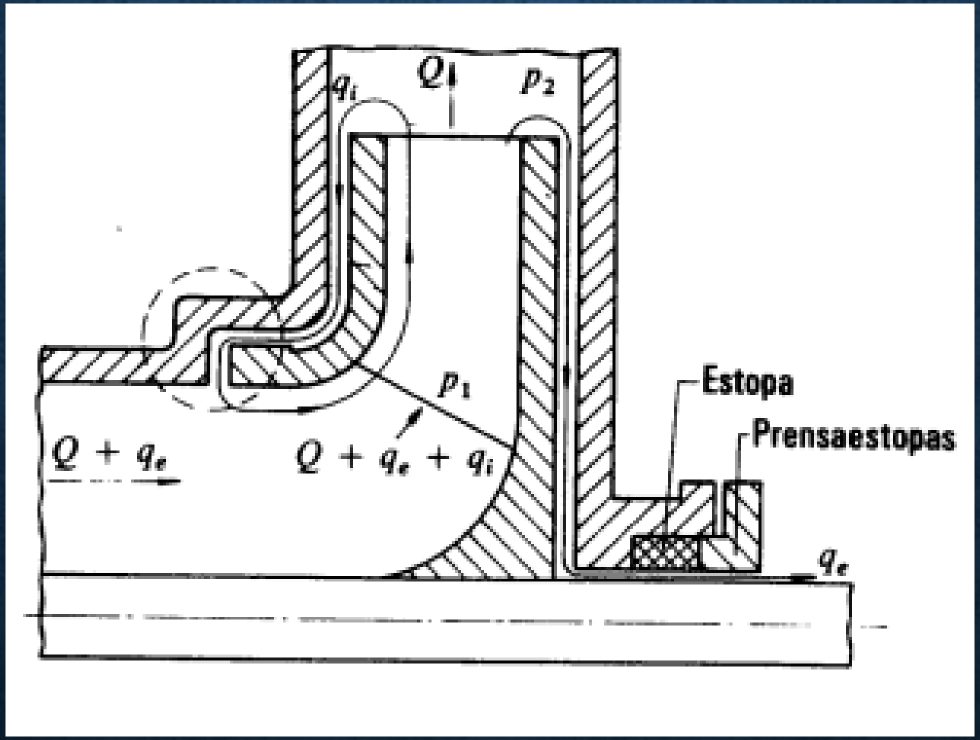
PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

Todas las pérdidas de una bomba entre los puntos E y S, se pueden clasificar en tres grupos:

a. Pérdidas hidráulicas: son de dos clases: pérdidas de superficie y pérdidas de forma. Las pérdidas de superficie se producen por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba (rodete, corona directriz..) o de las partículas del fluido entre sí; las pérdidas de forma se producen por el desprendimiento de la capa límite en los cambios de dirección y en toda forma difícil al flujo, en particular a la entrada del rodete si la tangente del álabe no coincide con la dirección de la velocidad relativa a la entrada, o a la salida del rodete si la tangente del álabe de la corona no coincide exactamente con la velocidad absoluta a la salida. Las pérdidas hidráulicas se originan, pues:
   - Entre el punto E y la entrada del rodete.
   - En el rodete.
   - En la corona directriz (si existe).
   - En la caja espiral.
   - Desde la salida de la caja espiral hasta la salida de la bomba, o punto S.

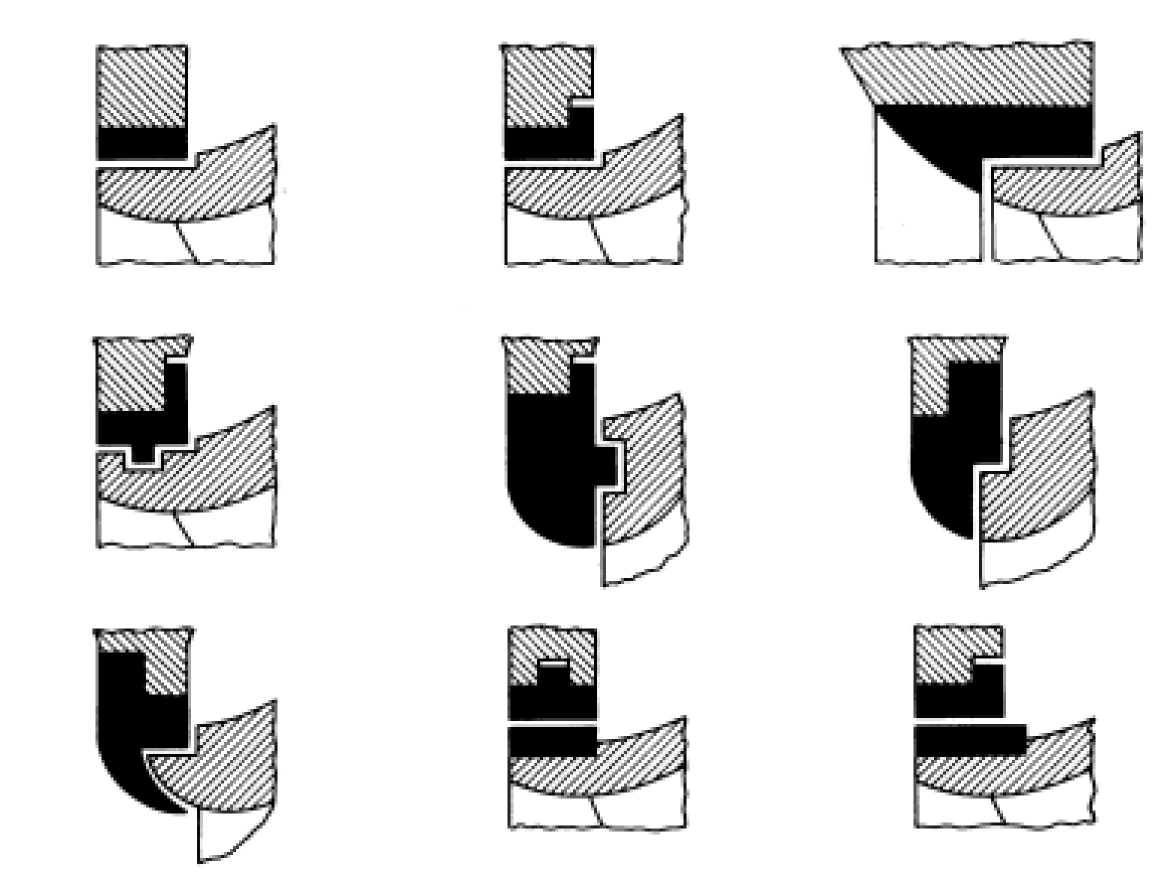
PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

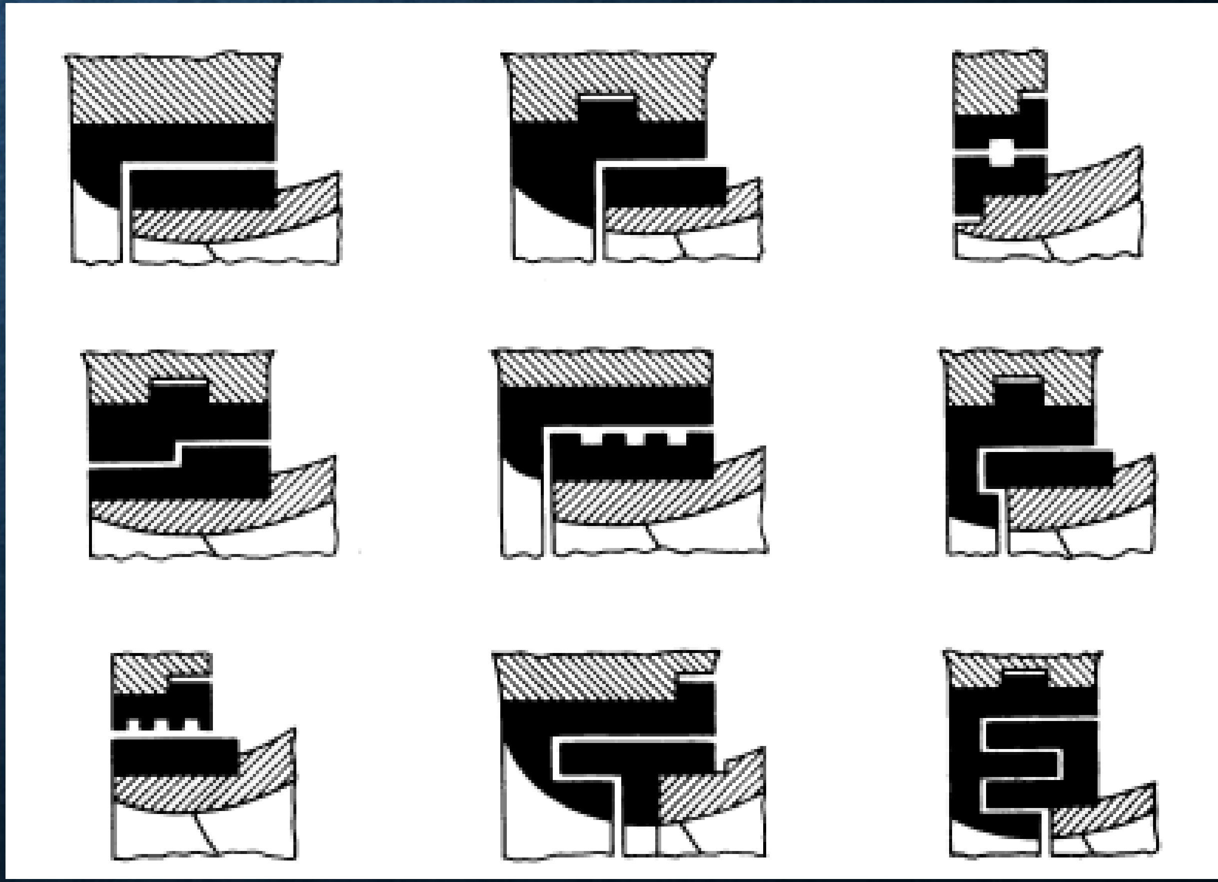
b. Pérdidas volumétricas: Estas pérdidas, que se denominan también pérdidas intersticiales, son pérdidas de caudal y se dividen en dos clases: *pérdidas exteriores* q_E y *pérdidas interiores* q_i .



PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

b. <u>Pérdidas volumétricas</u>: Estas pérdidas, que se denominan también pérdidas intersticiales, son pérdidas de caudal y se dividen en dos clases: *pérdidas exteriores* q_E y *pérdidas interiores* q_i .

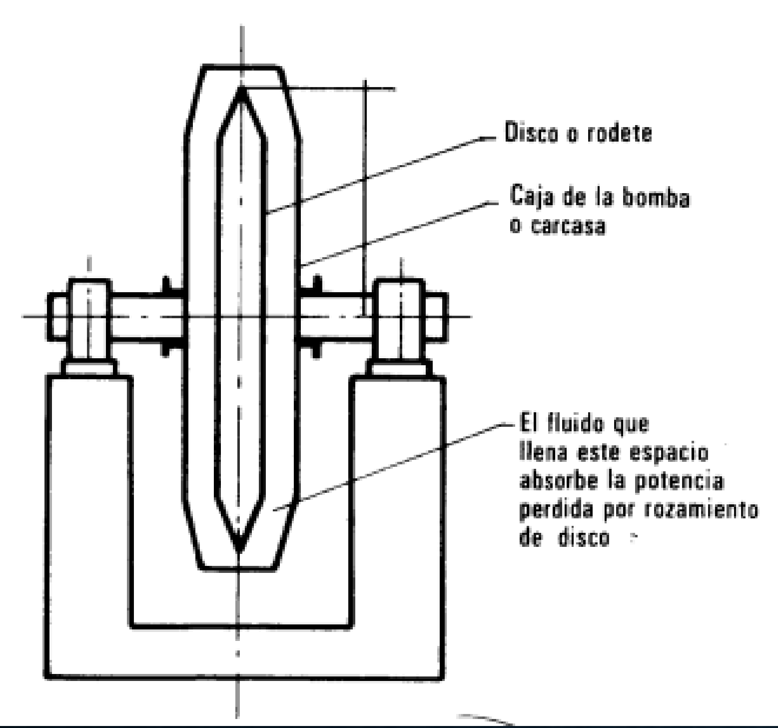


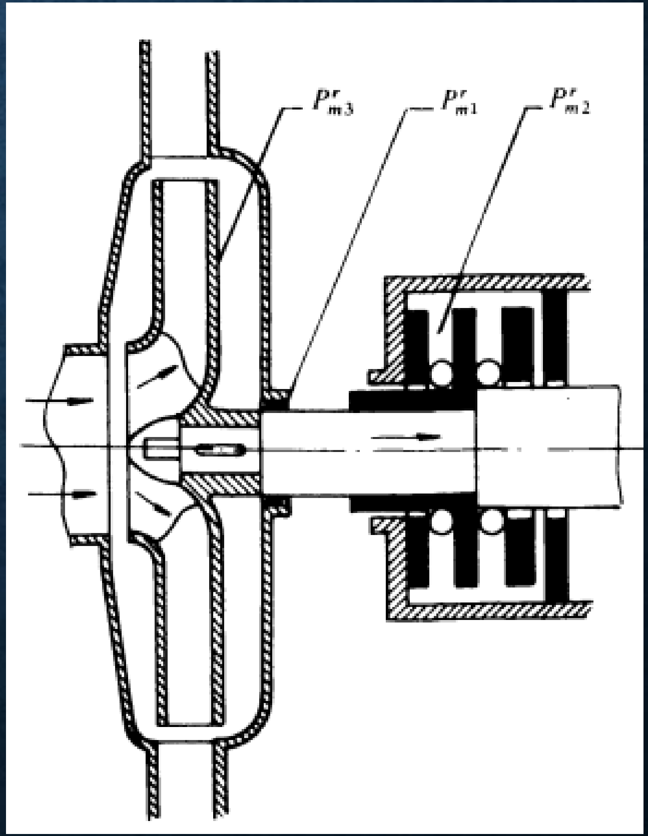


PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

c. <u>Pérdidas mecánicas</u>: estas pérdidas incluyen:

- Pérdidas por rozamiento del prensaestopas con el eje de la máquina.
- Pérdidas por rozamiento del eje con los cojinetes.
- Pérdidas por accionamiento de auxiliares (bomba de engranajes para lubricación, cuentarrevoluciones, etc).
- Rozamiento de disco o rodete.

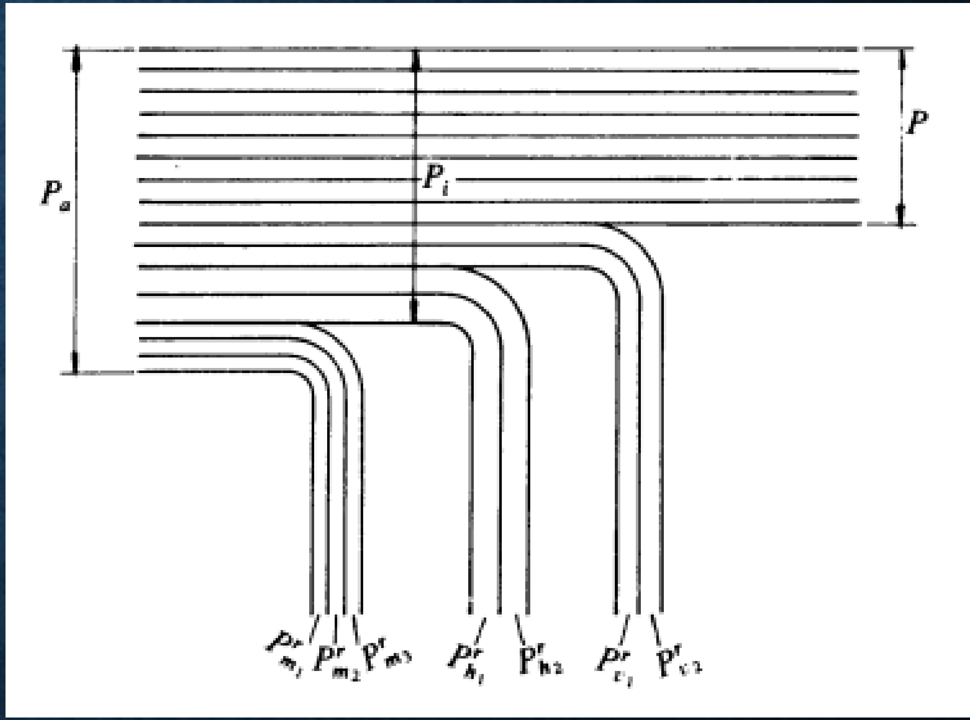




PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

P_a: $Potencia\ de\ accionamiento = potencia\ absorbida = potencia\ al\ freno = potencia\ en\ el\ eje$. Los cuatro nombres se utilizan en la práctica.

Así, en un grupo moto-bomba (motor eléctrico-bomba) P_a no es la potencia absorbida de la red, sino la potencia libre en el eje (potencia absorbida de la red multiplicada por el rendimiento del motor eléctrico.



$P_i -$ $Potencia\ interna$: potencia suministrada al rodete, igual a la potencia de accionamiento menos las pérdidas mecánicas.

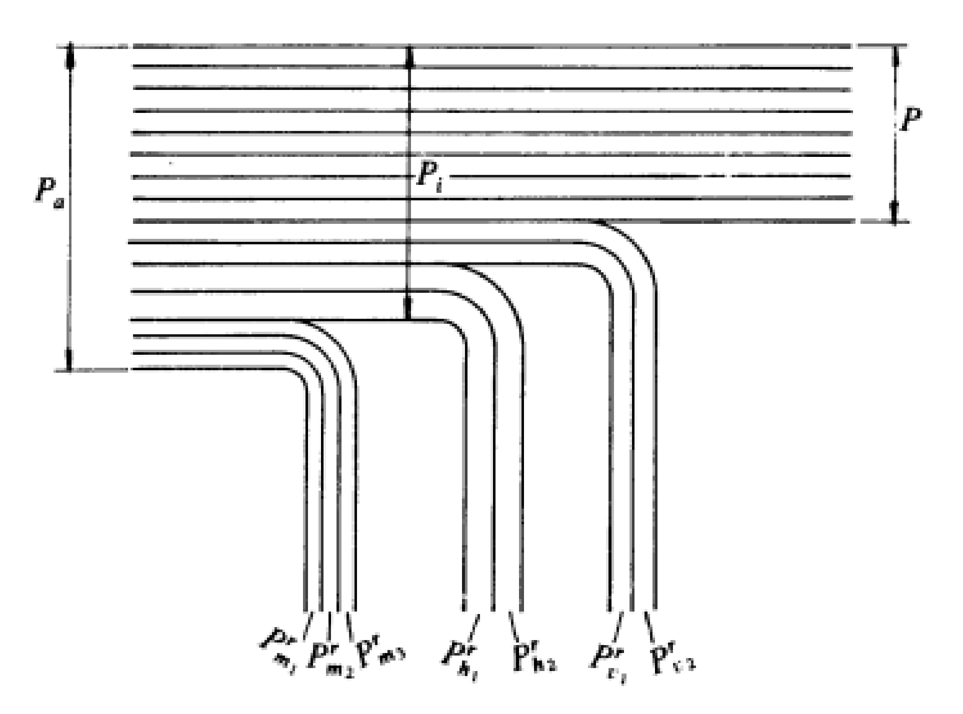
$P -$ $Potencia\ útil$: incremento de potencia que experimenta el fluido en la bomba.

PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

$P_h^r - pérdidas\ hidráulicas$: P_{h1}^r – pérdidas por rozamiento de superficie; P_{h2}^r – pérdidas por rozamiento de forma.

$P_v^r - pérdidas\ volumétricas$: P_{v1}^r – pérdidas por caudal exterior; P_{v2}^r – pérdidas por cortocircuito.

$P_m^r - pérdidas\ mecánicas$: P_{m1}^r – pérdidas por rozamiento en el prensaestopas; P_{m2}^r – pérdidas por rozamiento en los cojinetes y accionamiento de auxiliares; P_{m3}^r – pérdidas por rozamiento de disco.



PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

$Potencia\ de\ accionamiento, P_a$: es la potencia en el eje de la bomba o potencia mecánica que la bomba absorbe. Esta potencia mecánica tiene la siguiente expresión:

$$P_a = M\omega = \frac{2\pi}{60} nM \qquad W, SI$$

$Potenciainterna, P_i$: es la potencia total transmitida al fluido, o sea la potencia de accionamiento, descontando las pérdidas mecánicas:

$$P_i = P_a - P_m^r$$

El rodete entrega al fluido una energía específica equivalente a una altura $H_u = H + H_{r-int}$ y esta altura la entrega al caudal bombeado por el rodete, que es $Q + q_e + q_i$, luego:

$$P_i = (Q + q_e + q_i)\rho g(H + H_{r-int}) = (Q + q_e + q_i)\rho g H_u$$

PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

$Potencia\ útil, P$: es la potencia de accionamiento descontando todas las pérdidas en la bomba o equivalentemente la potencia interna descontando todas y sólo las pérdidas internas (hidráulicas y volumétricas). Luego:

$$P = P_a - P_m^r - P_v^r - P_h^r = P_i - P_v^r - P_h^r$$

La potencia útil por otra parte será la invertida en impulsar el caudal útil Q a la altura H. Luego:

$$P = Q\rho gH$$

$Rendimiento\ hidráulico, \eta_h$ tiene en cuenta todas y sólo las pérdidas de altura total, H_{r-int} en la bomba:

$$\eta_h = \frac{H}{H_u}$$

PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

$Rendimiento\ volumétrico, \eta_v$:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + q_e + q_i}$$

$Rendimiento\ interno, \eta_i$: tiene en cuenta todas las pérdidas hidráulicas y volumétricas.

$$\eta_i = \frac{P}{P_i} \qquad P_i = (Q + q_e + q_i)\rho g H_u = \frac{Q\rho g H}{\eta_v \eta_h}$$

$$\eta_i = \frac{P}{P_i} = \frac{Q\rho g H \eta_v \eta_h}{Q\rho g H} = \eta_v \eta_h$$

PÉRDIDAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS

$Rendimiento\ mecánico, \eta_m$:

$$\eta_v = \frac{P_i}{P_a}$$

$Rendimiento\ total, \eta_{tot}$: tiene en cuenta todas las pérdidas en la bomba.

$$\eta_{tot} = \frac{P}{P_a}$$

$Relación\ entre\ los\ rendimientos.$

$$\boxed{\boldsymbol{\eta_{tot} = \frac{P}{P_a} = \frac{PP_i}{P_iP_a} = \eta_i\eta_m = \eta_v\eta_h\eta_m}}$$

CAVITACIÓN Y GOLPE DE ARIETE DE UNA BOMBA

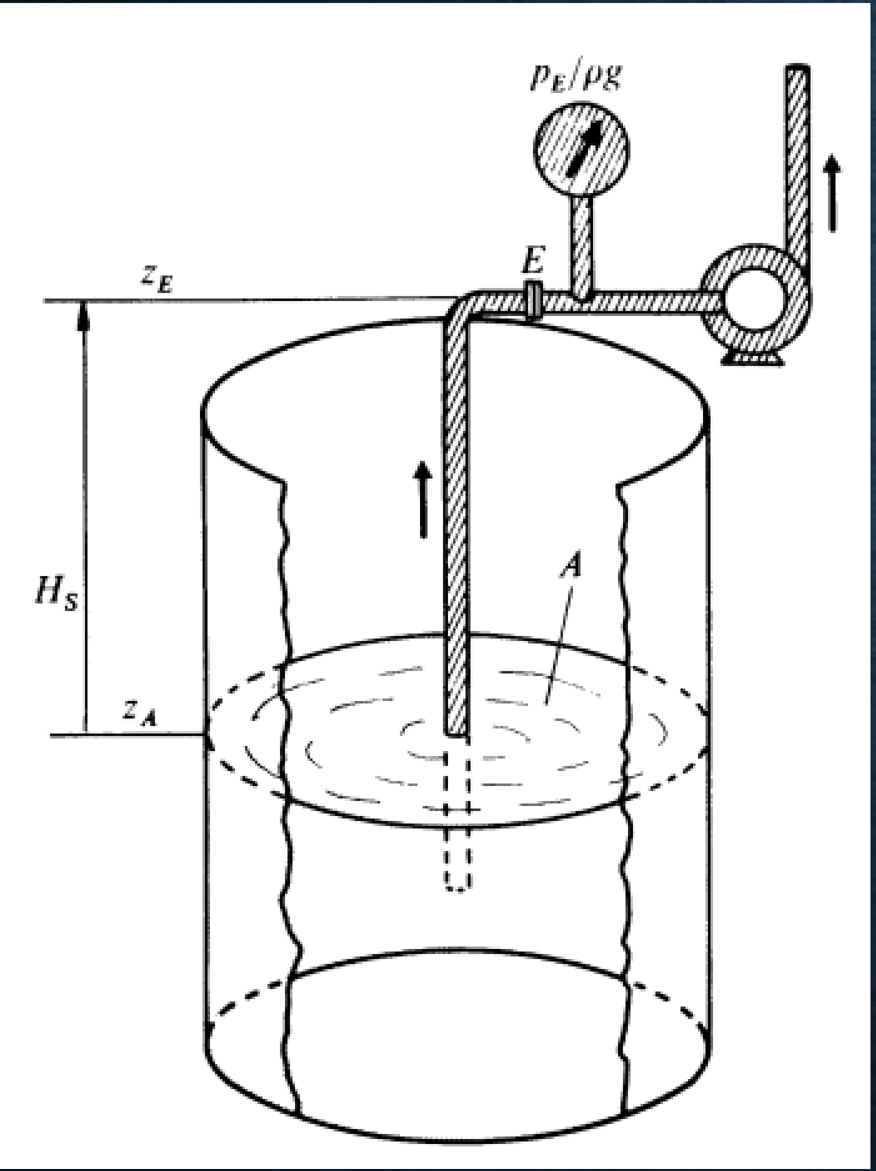
La cavitación en las bombas (y en las turbinas) produce dos efectos perjudiciales: disminución del rendimiento y erosión. La aparición de la cavitación en bombas esta íntimamente relacionada con:

- Con el tipo de bomba (en general el peligro de cavitación es tanto mayor cuanto mayor es el número específico de revoluciones, n_s.

- Con la instalación de la bomba (la altura de suspensión de la bomba, H_s, o cota del eje de la bomba sobre el nivel del líquido en el depósito de aspiración, debe ser escogida cuidadosamente para evitar la cavitación).

- Con las condiciones de servicio de la bomba (el caudal de la bomba nunca debe exceder el máximo permisible para que no se produzca la cavitación).

CAVITACIÓN Y GOLPE DE ARIETE DE UNA BOMBA



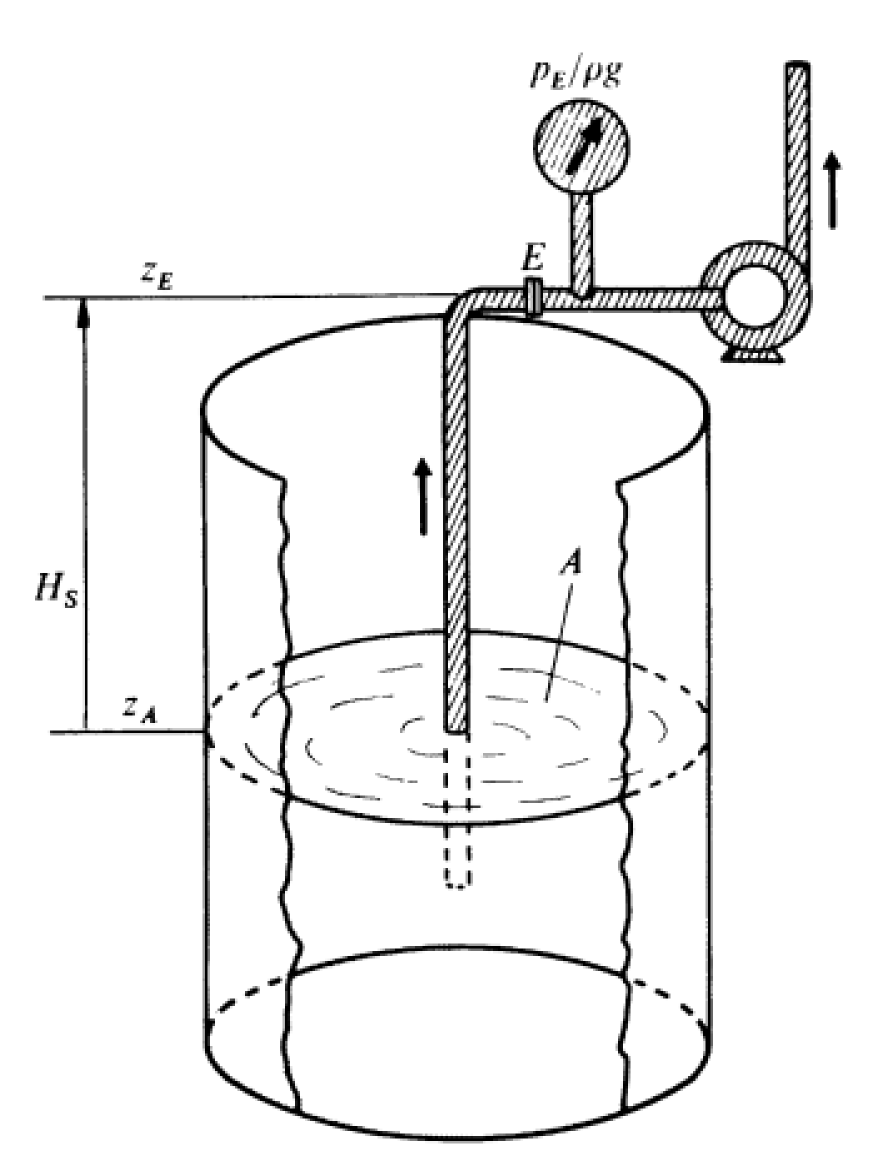
El NPSH necesario y la altura de suspensión o aspiración, H_s, de una bomba.

$$H_s = z_E - z_A \rightarrow cota\ de\ entrada\ de\ la\ bomba\ sobre\ el\ nivel\ del\ depósito\ de\ aspiración.$$

$$H_s > 0\ si\ el\ eje\ de\ la\ bomba\ está\ más\ elevado\ que\ el\ nivel\ de\ líquido\ (bomba\ en\ aspiración)$$

$$H_s < 0\ si\ la\ entrada\ de\ la\ bomba\ está\ más\ baja\ que\ dicho\ nivel\ (bomba\ de\ carga)$$

CAVITACIÓN Y GOLPE DE ARIETE DE UNA BOMBA



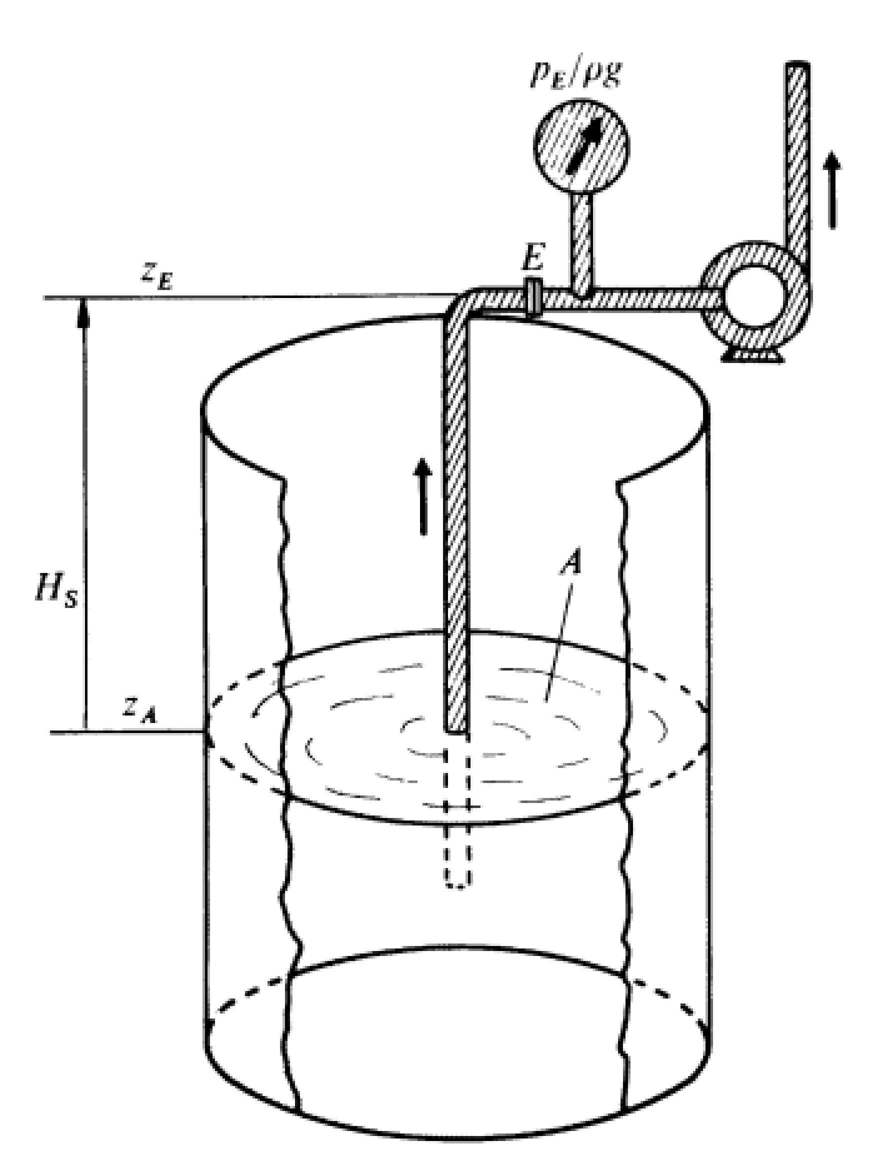
$$H_E = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{c_E^2}{2g} \rightarrow altura\ total\ a\ la\ entrada\ de\ la\ bomba\ referida\ a\ la\ cota\ z_E$$

Antes que el líquido circule desde el depósito de aspiración, posterior a este momento aparecen pérdidas, aumenta la altura geodésica, entre otros.

Por lo tanto la altura disponible es, H_{Ed}:

$$H_{Ed} = \frac{p_E - p_S}{\gamma} + \frac{c_E^2}{2g}$$

CAVITACIÓN Y GOLPE DE ARIETE DE UNA BOMBA



Planteando Bernoulli entre los puntos A y E:

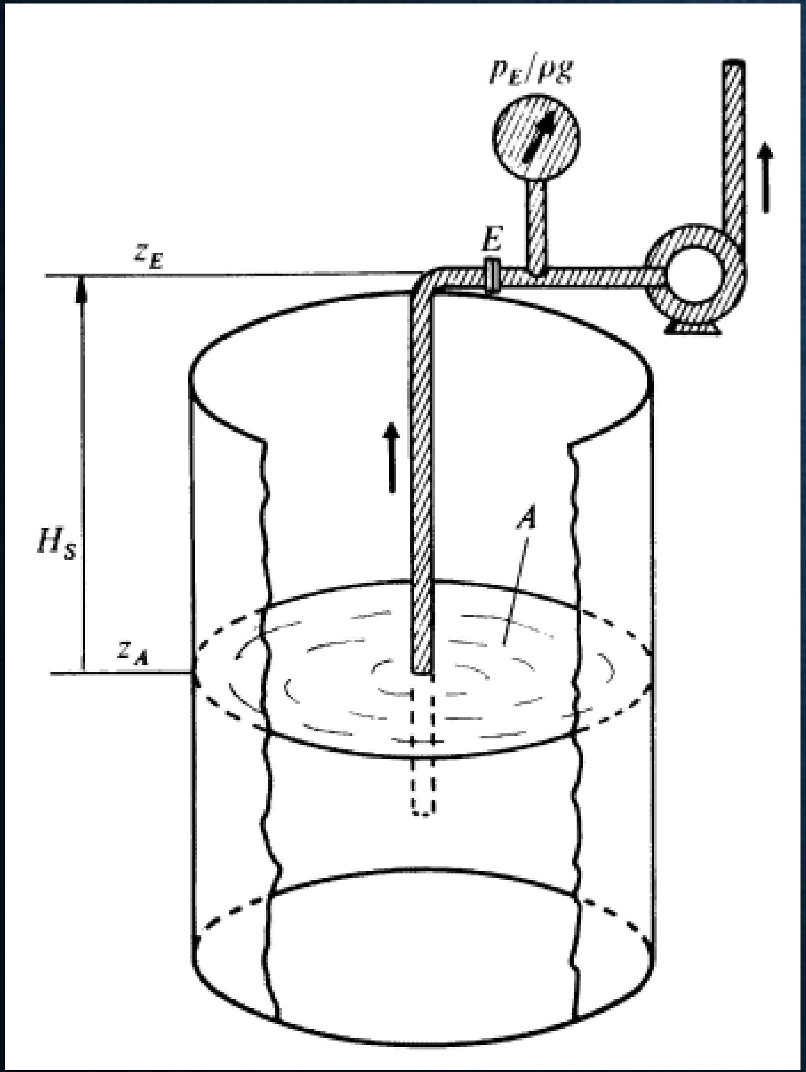
$$\frac{p_A}{\gamma} + z_A - H_{r\,A-E} = \frac{p_E}{\gamma} + z_E + \frac{c_E^2}{2g} \rightarrow siendo\ H_s = z_E - z_A$$

$$\frac{p_A}{\gamma} - H_s - H_{r\,A-E} = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{c_E^2}{2g}$$

$$H_{Ed} = \frac{p_A - p_S}{\gamma} - H_s - H_{r\,A-E}$$

La altura de aspiración disponible, H_{Ed}, se denomina en los países de habla inglesa NPSH (Net Positive Suction Head).

CAVITACIÓN Y GOLPE DE ARIETE DE UNA BOMBA



Para evitar la cavitación se debe verificar que:

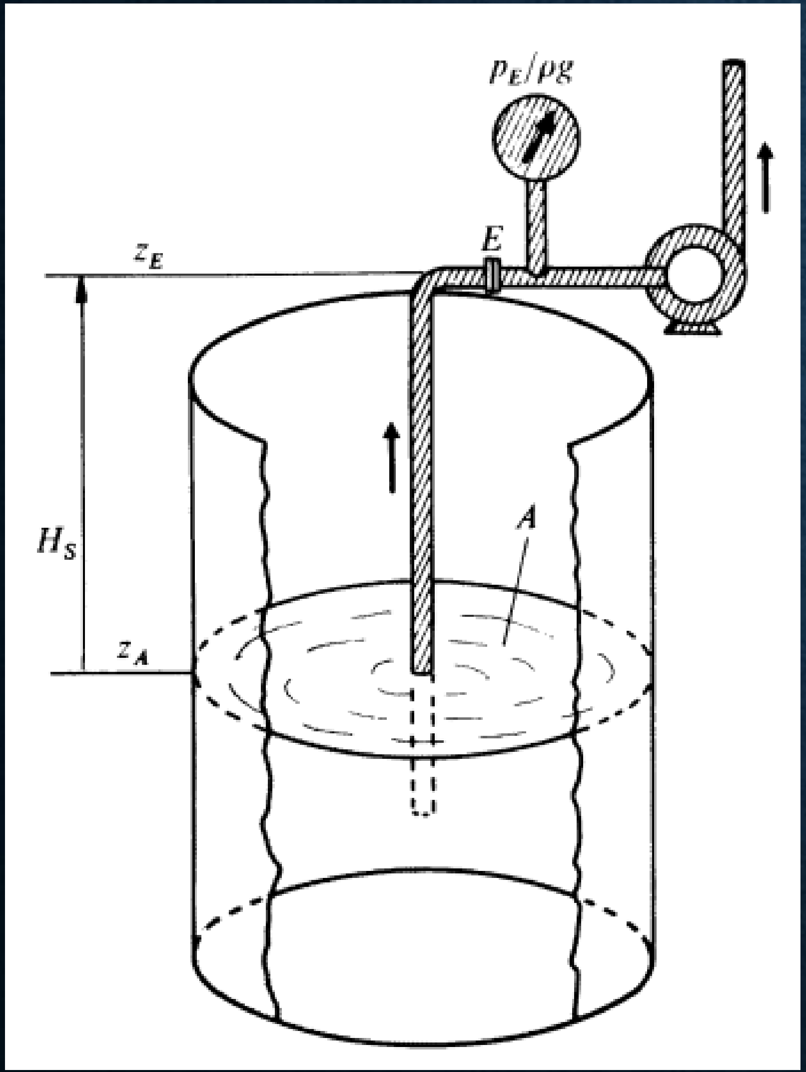
$$H_{Ed} \geq \Delta h \rightarrow donde\ \Delta h\ se\ denomina\ caida\ de\ altura\ de\ presión\ en\ el\ interior\ de\ la\ bomba.$$

$$H_{Ed\ min} = NPSH_{necesaria} = \Delta h \rightarrow altura\ de\ aspiración\ necesaria.$$

$$H_{Ed\ min} = NPSH_{necesaria} = \Delta h = \left(\frac{p_A - p_S}{\gamma} - H_s - H_{r\ A-E}\right)_{min}$$

$$H_{Ed\ min} = NPSH_{necesaria} = \Delta h = \left(\frac{p_E}{\gamma} + \frac{c_E^2}{2g}\right)_{mín}$$

CAVITACIÓN Y GOLPE DE ARIETE DE UNA BOMBA



Δh varía con el punto de funcionamiento de la bomba. Generalmente interesa el Δh correspondiente al caudal nominal de la bomba, o caudal para el cual la bomba funciona $\eta_{tot\ max}$.

Aunque la evaluación teórica de Δh es hoy por hoy imposible, Δh puede calcularse experimentalmente con ayuda de las ecuaciones antes presentadas.

TAREA: DEFINIR COMO SE CÁLCULA EXPERIMENTALMENTE LA CAVITACIÓN A PARTIR DE LA INSTALACIÓN INDICADA