Las trasparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, …) y elaborar sus propios apuntes

En esta presentación se incluye un listado de problemas en el orden en el que se pueden resolver siguiendo el desarrollo de la teoría. Es trabajo del alumno resolverlos y comprobar la solución

Departamento: **Ingeniería Eléctrica y Energética**
Area: **Máquinas y Motores Térmicos**

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es
INMACULADA FERNANDEZ DIEGO fernandei@unican.es
JUAN CARCEDO HAYA juan.carcedo@unican.es
FELIX ORTIZ FERNANDEZ felix.ortiz@unican.es

BLOQUE 1: Máquinas de Fluidos Incompresibles

- Características
- Campos de Aplicación
- Partes
- Rodetes
- La Voluta
- Clasificación
- Curva Característica
- Cebado
- Instalación
- Acoplamiento
- Potencias, Rendimientos y Pérdidas
- Cavitación
- Golpe de Ariete
- Catálogos de Fabricantes
- Leyes de Semejanza
- Número Específico de Revoluciones
- Influencia del Número de Alabes
- Grado de Reacción del Rodete
- Punto de Funcionamiento
- Selección de una Bomba

Número Específico de Revoluciones, n_s (I)

$$\lambda = \frac{D}{D_0} = \frac{b}{b_0}$$

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

Considerando las semejanzas geométrica (λ) y cinemática (α):

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{H_t}{H_{t0}} = \alpha^2 \cdot \lambda^2 \\ \dfrac{Pot}{Pot_0} = \alpha^3 \cdot \lambda^5 \end{array}\right\} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{H_t}{H_{t0}}}$$

$$\frac{Pot}{Pot_0} = \alpha^3 \cdot \left(\frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{H_t}{H_{t0}}}\right)^5 = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left(\frac{H_t}{H_{t0}}\right)^{5/2} = \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 \cdot \left(\frac{H_t}{H_{t0}}\right)^{5/2}$$

Agrupando los valores del modelo: $Pot \cdot n^2 \cdot H_t^{-5/2} = Pot_0 \cdot n_0^{\,2} \cdot H_{t0}^{-5/2}$

$$\xrightarrow{\sqrt{\ }} n \cdot Pot^{1/2} \cdot H_t^{-5/4} = n_0 \cdot Pot_0^{1/2} \cdot H_{t0}^{-5/4}$$

Todas las bombas geométricamente iguales tienen el mismo n_s

$$n_s = n \cdot Pot^{1/2} \cdot H_t^{-5/4}$$

$$Pot = \gamma \cdot H_t \cdot Q \Rightarrow n_s = n \cdot (\gamma \cdot H_t \cdot Q)^{1/2} \cdot H_t^{-5/4} = n \cdot \gamma^{1/2} \cdot H_t^{-3/4} \cdot Q^{1/2}$$

Número Específico de Revoluciones, n_s (II)

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

En función del caudal: n_q

Si se tiene una bomba funcionando a *n*(r.p.m.) impulsando un caudal *Q* (m^3/s) a una altura *H*(m), se define el **número específico de revoluciones n_q** como aquella velocidad a la que habrá de girar una bomba semejante para que impulse un caudal de ***1 m³/s*** a una altura de ***1 m***

$$\frac{Q'}{Q} = \alpha \cdot \lambda^3$$

$$\frac{H'_m}{H_m} = \alpha^2 \cdot \lambda^2$$

$$Q' = 1\,m^3/s$$

$$H'_m = 1\,m$$

Eliminando λ:

$$\lambda = \left(\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{Q}\right)^{1/3}$$

$$\lambda = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{1}{H_m}\right)^{1/2}$$

$$\left(\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{Q}\right)^{1/3} = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{1}{H_m}\right)^{1/2}$$

$$\frac{1}{\sqrt[3]{\alpha}} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{Q}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\sqrt{H_m}}$$

$$(\alpha \cdot Q)^{1/3} = \alpha \cdot H_m^{1/2}$$

$$Q^{1/3} = \alpha^{2/3} \cdot H_m^{1/2}$$

$$\alpha^{2/3} = \frac{Q^{1/3}}{H_m^{1/2}} = Q^{1/3} \cdot H_m^{-1/2}$$

$$\alpha = Q^{1/2} \cdot H_m^{-3/4}$$

Si la altura fuera total $\Rightarrow H_t$

Número Específico de Revoluciones, n_s (III)

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

En función del caudal: n_q

Si se tiene una bomba funcionando a *n*(r.p.m.) impulsando un caudal *Q* (m^3/s) a una altura *H*(m), se define el **número específico de revoluciones n_q** como aquella velocidad a la que habrá de girar una bomba semejante para que impulse un caudal de ***1 m³/s*** a una altura de ***1 m***

$$\frac{Q'}{Q} = \alpha \cdot \lambda^3$$

$$\frac{H'_m}{H_m} = \alpha^2 \cdot \lambda^2$$

$$Q' = 1\,m^3/s$$

$$H'_m = 1\,m$$

$$\alpha = Q^{1/2} \cdot H_m^{-3/4}$$

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$n_q \Big|_{\substack{Q = 1\,m^3/s \\ H = 1\,m}}$$

$$n_q = n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H_m^{3/4}}$$

Si la altura fuera total $\Rightarrow H_t$

Número Específico de Revoluciones, n_s (IV)

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

En función de la potencia: n_s

Si se tiene una bomba funcionando a *n*(r.p.m.) absorbiendo una potencia *Pot*(CV) y dando una altura *H*(m), se define el **número específico de revoluciones n_s** como aquella velocidad a la que habrá de girar una máquina semejante para que absorbiendo una potencia de ***1 CV*** de una altura de ***1 m***

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{Pot'}{Pot} = \alpha^3 \cdot \lambda^5 \\[2ex] \dfrac{H'_m}{H_m} = \alpha^2 \cdot \lambda^2 \\[2ex] Pot' = 1\,C.V. \\[1ex] H'_m = 1\,m \end{array}\right\}$$

Eliminando λ:
$$\left\{\begin{array}{l} \lambda = \left(\dfrac{1}{\alpha^3} \cdot \dfrac{1}{Pot}\right)^{1/5} \\[2ex] \lambda = \dfrac{1}{\alpha} \cdot \left(\dfrac{1}{H_m}\right)^{1/2} \end{array}\right.$$

$$\left(\frac{1}{\alpha^3} \cdot \frac{1}{Pot}\right)^{1/5} = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{1}{H_m}\right)^{1/2}$$

$$\frac{1}{\sqrt[5]{\alpha^3}} \cdot \frac{1}{\sqrt[5]{Pot}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\sqrt{H_m}}$$

$$\alpha^{3/5} \cdot Pot^{1/5} = \alpha \cdot H_m^{1/2}$$

$$Pot^{1/5} = \alpha^{2/5} \cdot H_m^{1/2}$$

$$\alpha^{2/5} = \frac{Pot^{1/5}}{H_m^{1/2}} = Pot^{1/5} \cdot H_m^{-1/2}$$

$$\alpha = Pot^{1/2} \cdot H_m^{-5/4}$$

Si la altura fuera total $\Rightarrow H_t$

Número Específico de Revoluciones, n_s (V)

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

En función de la potencia: n_s

Si se tiene una bomba funcionando a *n*(r.p.m.) absorbiendo una potencia *Pot*(CV) y dando una altura *H*(m), se define el **número específico de revoluciones n_s** como aquella velocidad a la que habrá de girar una máquina semejante para que absorbiendo una potencia de ***1 CV*** de una altura de ***1 m***

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{Pot'}{Pot} = \alpha^3 \cdot \lambda^5 \\[2ex] \dfrac{H'_m}{H_m} = \alpha^2 \cdot \lambda^2 \\[2ex] Pot' = 1\,C.V. \\[1ex] H'_m = 1\,m \end{array}\right\}$$

$$\alpha = Pot^{1/2} \cdot H_m^{-5/4}$$

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$n_s \Big|_{\substack{Pot = 1\,CV \\ H = 1\,m}} \Rightarrow n_s = n \cdot \frac{Pot^{1/2}}{H_m^{5/4}}$$

Si la altura fuera total $\Rightarrow H_t$

Número Específico de Revoluciones, n_s (VI)

Relación entre n_s y n_q

$$n_s = n \cdot Pot^{1/2} \cdot H_t^{-5/4}$$

$$Pot = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m}{\eta_{man}} (W) = \frac{\rho \cdot g}{735{,}5 \cdot \eta_{man}} \cdot Q \cdot H_m \text{ (C.V.)}$$

$$n_s = n \cdot \frac{\left(\frac{\rho \cdot g}{735{,}5 \cdot \eta} \cdot Q \cdot H_m\right)^{1/2}}{H_m^{5/4}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{735{,}5 \cdot \eta}} \cdot n \cdot \frac{Q^{1/2} \cdot H_m^{1/2}}{H_m^{5/4}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{735{,}5 \cdot \eta}} \cdot \underbrace{n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H_m^{3/4}}}$$

$$n_s = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{735{,}5 \cdot \eta_{man}}} \cdot n_q \qquad n_q = n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H_m^{3/4}}$$

En el caso particular del agua: $n_s = \frac{3{,}65}{\sqrt{\eta_{man}}} \cdot n_q$

BLOQUE 1: Máquinas de Fluidos Incompresibles
1.2.- Bombas Hidráulicas
1.2.2.- Bombas Centrífugas

Número Específico de Revoluciones, n_s (VII)

Características de n_q y n_s

El valor de n_q y n_s depende del sistema de unidades utilizado. Por este motivo se han definido en cada caso las unidades empleadas

Se define el número adimensional n_0, partiendo de n_q: $n_q = n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H_m^{3/4}}$

y multiplicando por $g^{-3/4}$ y expresando *n* en *rad/s:*

Coeficiente de velocidad específica $n_0 = \frac{\omega \cdot Q^{1/2}}{(g \cdot H_m)^{3/4}}$

Número Específico de Revoluciones, n_s (VIII)

$$n_q = n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H_m^{3/4}}$$

Para prediseñar una bomba para una aplicación:

$$n_s = n \cdot Pot^{1/2} \cdot H_t^{-5/4}$$

Se parte del caudal *Q*, de la altura *H* y, normalmente, de la velocidad del accionamiento (p.e. sincronismo). Por lo tanto, se establece el valor de n_q

- Para caudales pequeños y alturas grandes (n_q pequeño) la geometría radial es la que permite alcanzar mayores rendimientos
- Para grandes caudales y alturas más limitadas (n_q grande) la geometría axial es la que mejores rendimientos consigue

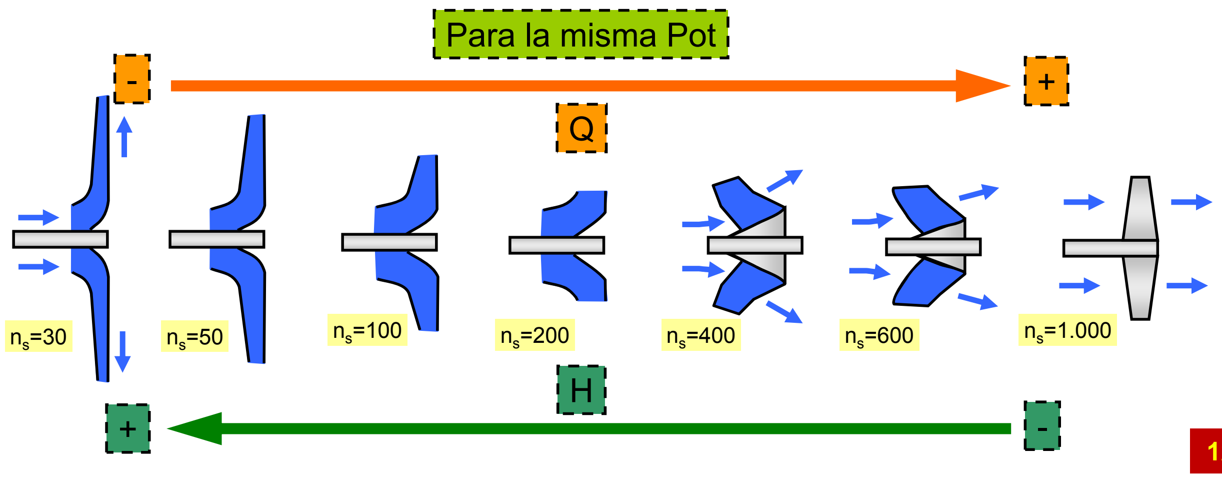
Si se quiere dar gran altura y el caudal que se ha de proporcionar es moderado, n_q será pequeño, por lo que se está dentro del campo de aplicación de las bombas centrífugas

Si el caudal es grande y la altura moderada o pequeña, n_q será grande, por lo que nos situamos dentro del campo de las bombas axiales

Número Específico de Revoluciones, n_s (IX)

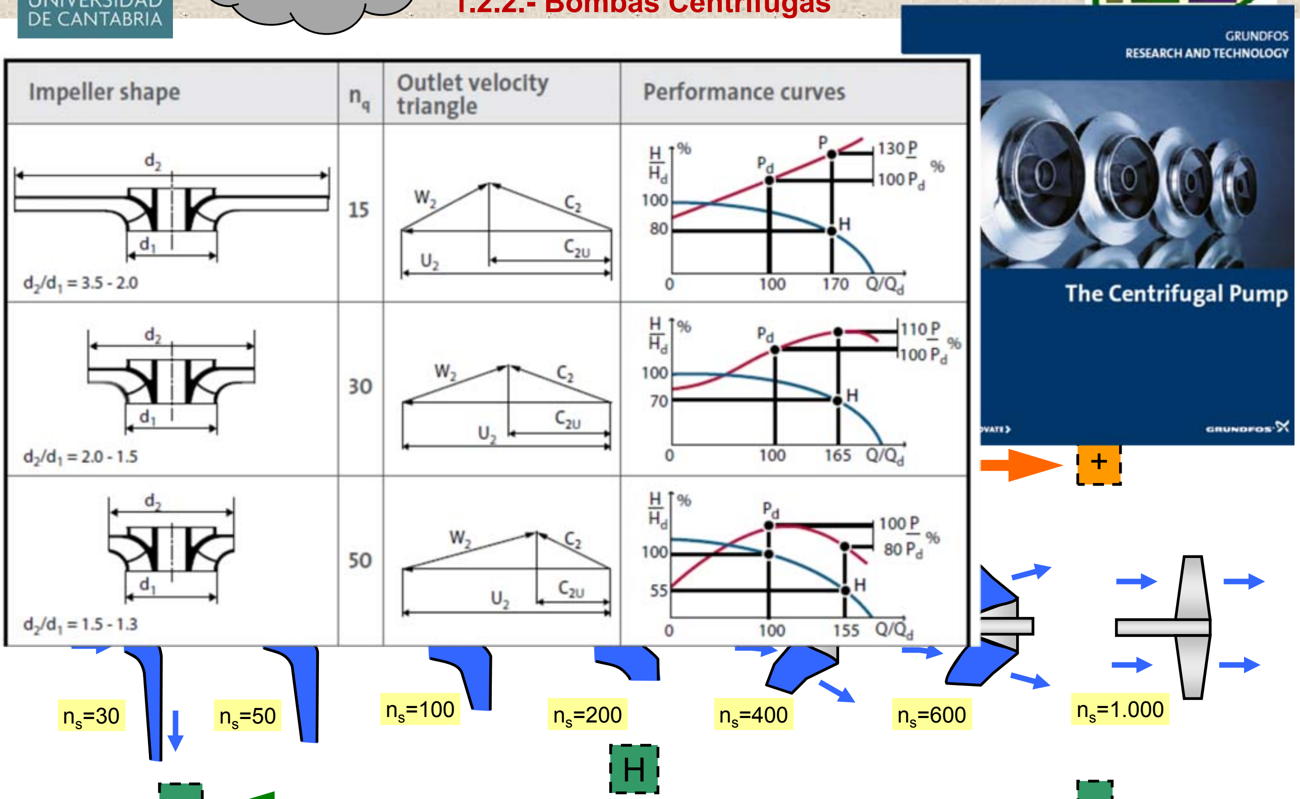
$$n_s = n \cdot Pot^{1/2} \cdot H_t^{-5/4} \qquad n_s = n \cdot \gamma^{1/2} \cdot H_t^{-3/4} \cdot Q^{1/2}$$

$$n_s = \frac{n \cdot Pot^{1/2}}{H_t^{5/4}} \cdot \qquad n_s = \frac{n \cdot \gamma^{1/2} \cdot Q^{1/2}}{H_t^{3/4}}$$



Impel… velocity triangle and performance …ion of specific speed n_q.

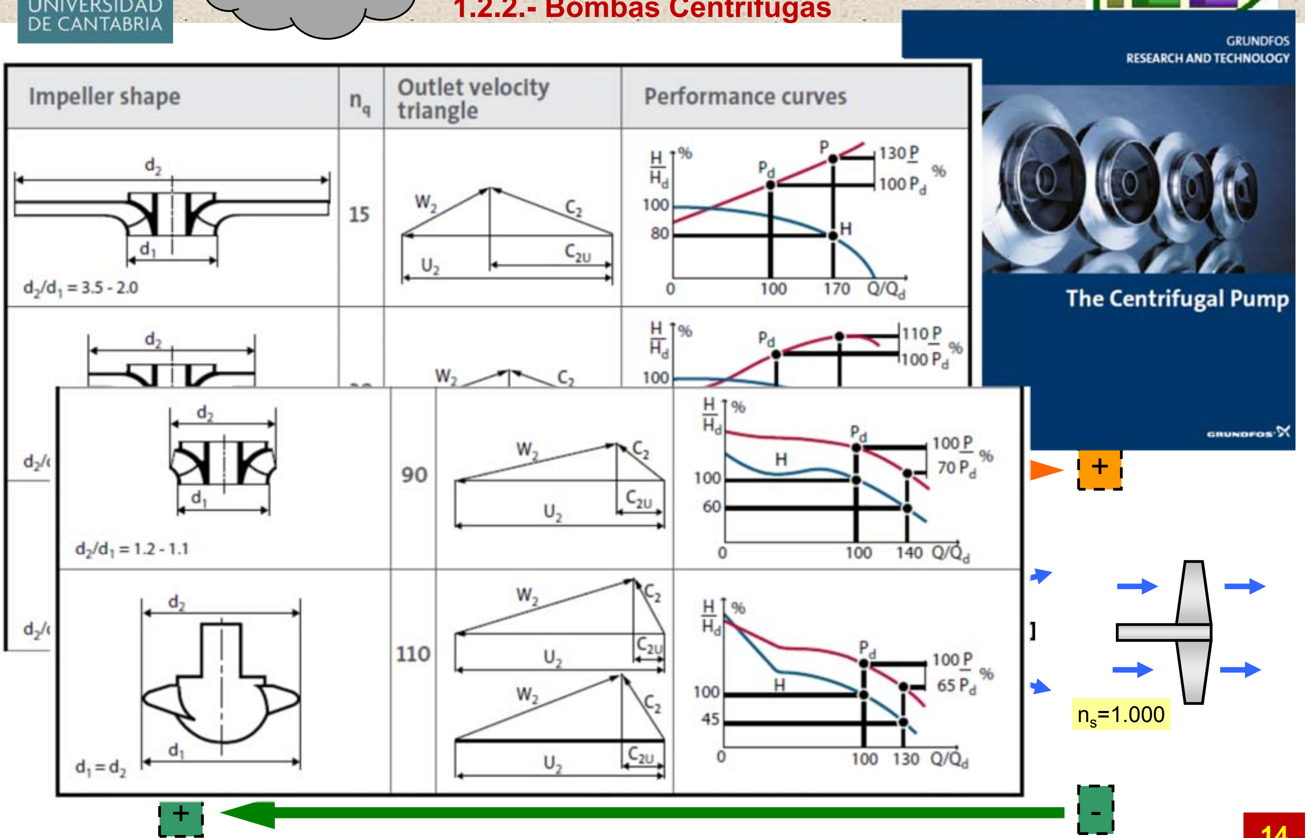
…esibles



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Máster Ingeniería Industrial
1.2.2.- Bombas Centrífugas

Impel… velocity triangle and performance …ion of specific speed n_q.

…esibles



Número Específico de Revoluciones, n_s (X)

Bombas Axiales (I)

Una hélice provoca el movimiento del fluido

Se emplean para agitar el líquido

Pueden tener una corona directriz a la salida (presiones más elevadas)

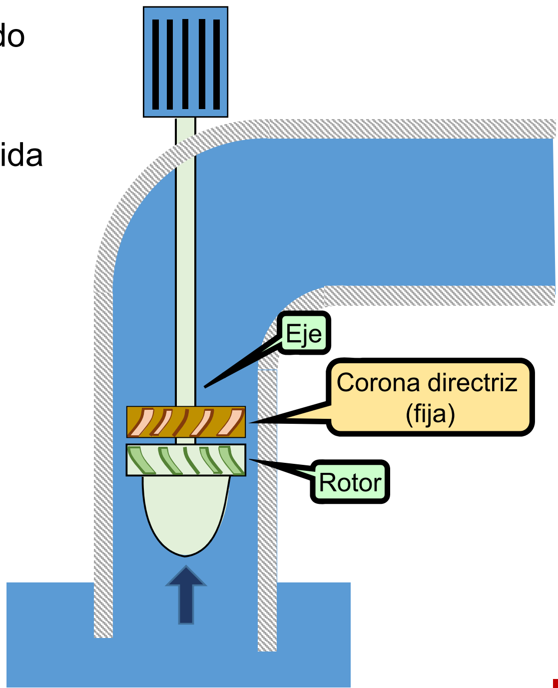
Número Específico de Revoluciones, n_s (X)

Bombas Axiales (II)

Una hélice provoca el movimiento del fluido

Se emplean para agitar el líquido

Pueden tener una corona directriz a la salida (presiones más elevadas)



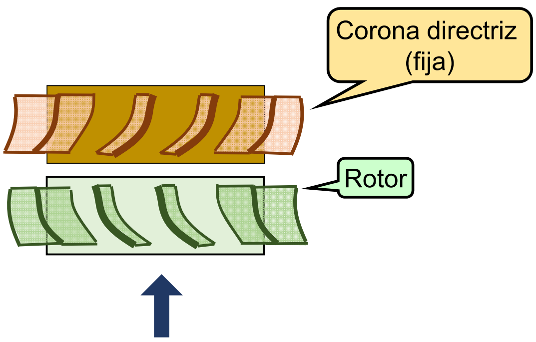
Número Específico de Revoluciones, n_s (X)

Bombas Axiales (III)

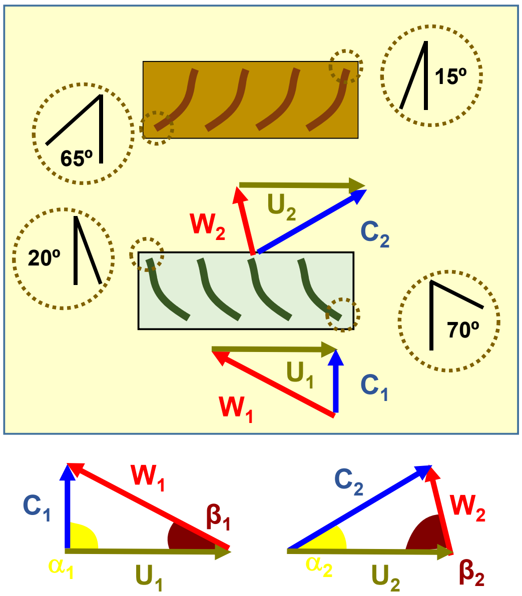
Una hélice provoca el movimiento del fluido

Se emplean para agitar el líquido

Pueden tener una corona directriz a la salida (presiones más elevadas)



α	β
$[\overline{C} \wedge \overline{U}]$	$[\overline{W} \wedge -\overline{U}]$



Una bomba centrífuga gira a 1.500 rpm. La superficie de entrada del agua al rodete es de 0,03 m², y la de salida 0,04 m². El diámetro del rodete a la entrada es de 0,3 m y a la salida de 0,5 m. Los ángulos de los álabes son: β_1= 22º; β_2= 15º; con α_1= 90º

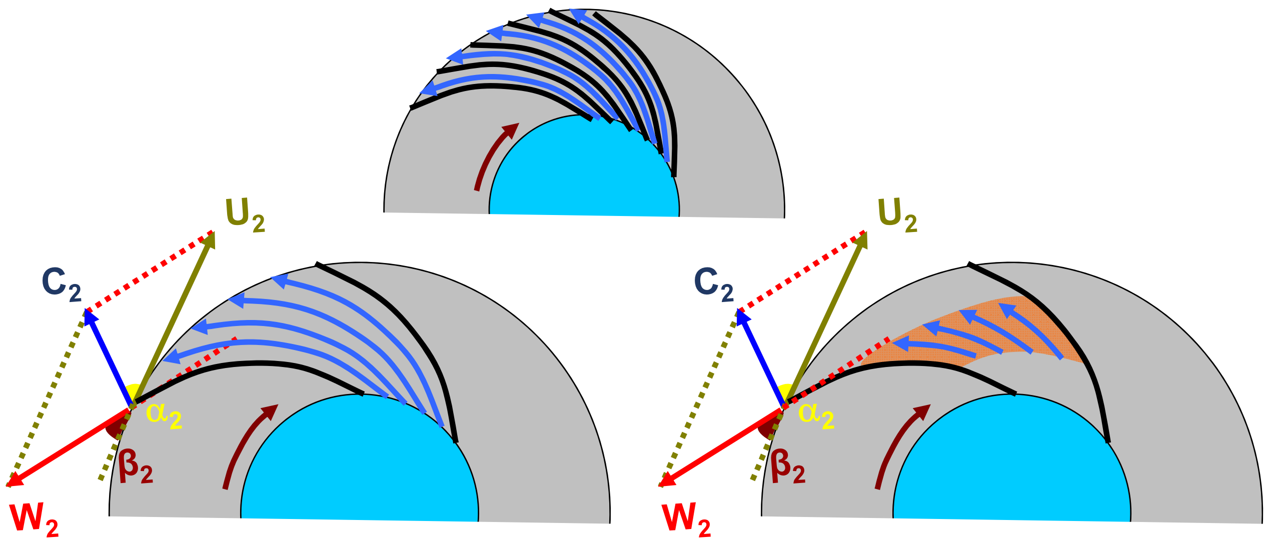
- Calcular los triángulos de velocidades (U_1, U_2, C_1, C_2; α_2)
- La altura teórica y el caudal de impulsión

- Las potencias (mecánica, rodete, fluido y útil) si η_{man} = 0,85; η_{vol} = η_{mec} = 1
- La curva característica de la bomba

- **y el número específico de revoluciones, n_s y n_q**

Influencia del Número de Alabes del Rodete (I)

Si los rodetes de las bombas tuvieran un número ∞ de álabes el flujo del agua en el interior de los mismos sería unidimensional



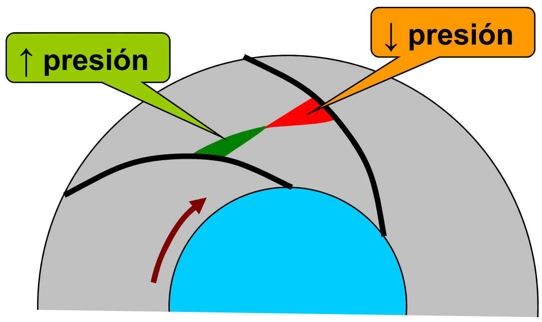
Trayectorias ideales de las partículas

Velocidad ideal de las partículas

Influencia del Número de Alabes del Rodete (II)

Pero tienen un número finito de álabes, y esto hace que entre cada dos álabes consecutivos se creen zonas de presiones “relativas”

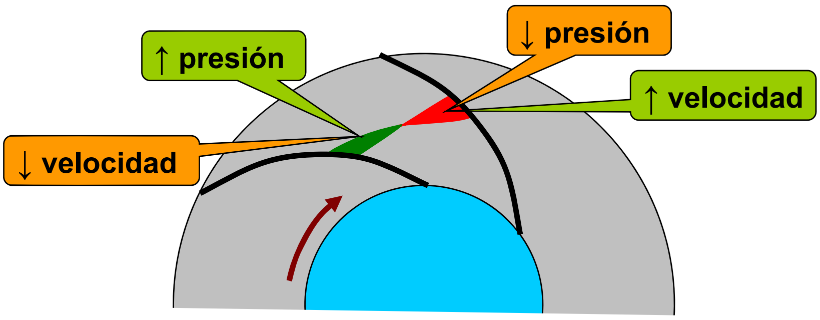
- La cara anterior del álabe comunica sobrepresión
- La cara posterior produce una depresión



Las variaciones de presión implican variaciones en la velocidad (con signo contrario, T. Bernouilli)

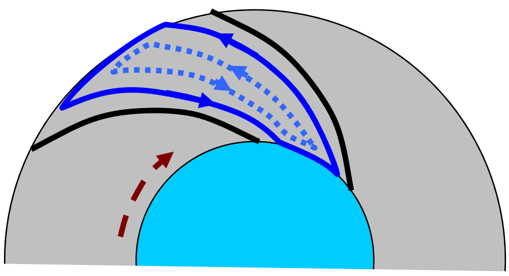
Influencia del Número de Alabes del Rodete (III)

Esta velocidad (positiva en las proximidades de la cara posterior del álabe, y negativa en las de la cara anterior) crea remolinos relativos con sentido de giro contrario al del rodete

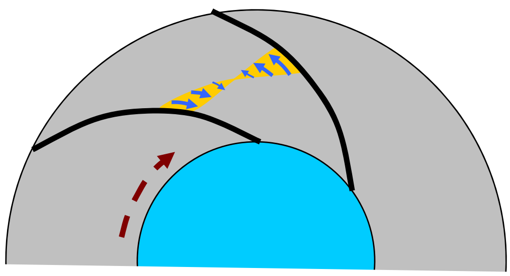


Influencia del Número de Alabes del Rodete (III)

Esta velocidad (positiva en las proximidades de la cara posterior del álabe, y negativa en las de la cara anterior) crea remolinos relativos con sentido de giro contrario al del rodete



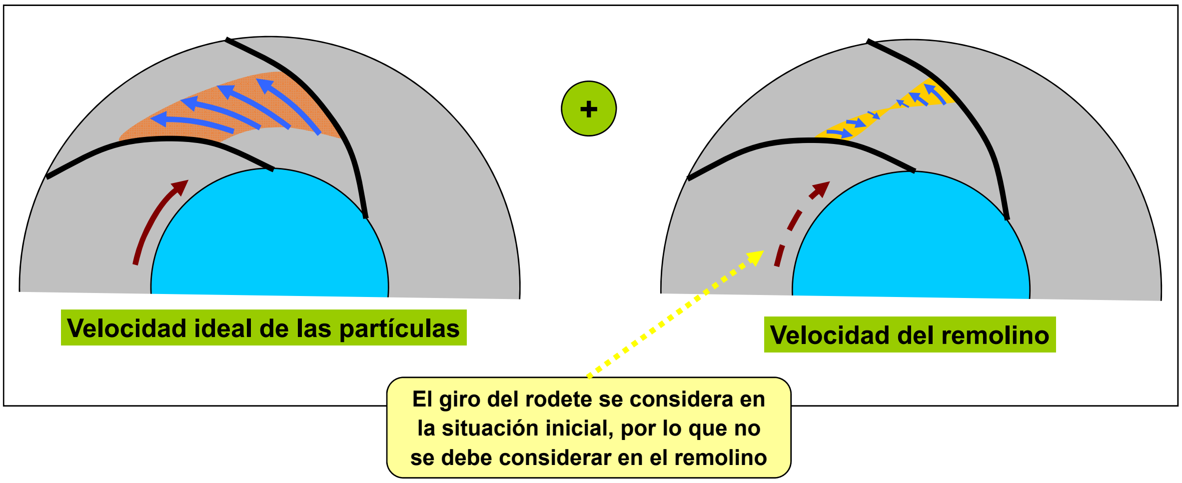
Remolino relativo



Velocidad del remolino

Influencia del Número de Alabes del Rodete (IV)

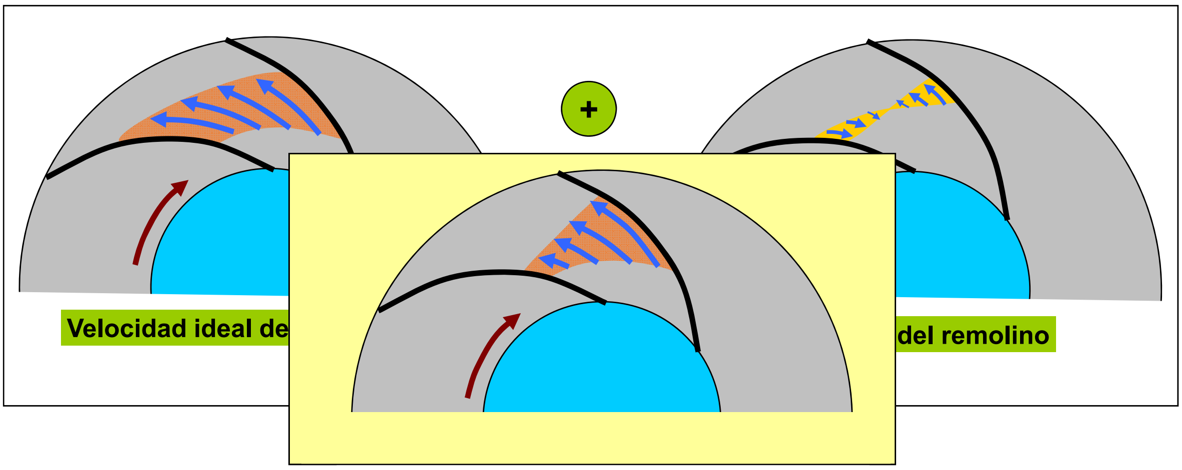
El resultado final de la velocidad de las partículas es una superposición de la velocidad teórica, y la creada por el remolino relativo



BLOQUE 1: Máquinas de Fluidos Incompresibles
1.2.- Bombas Hidráulicas
1.2.2.- Bombas Centrífugas

Influencia del Número de Alabes del Rodete (IV)

El resultado final de la velocidad de las partículas es una superposición de la velocidad teórica, y la creada por el remolino relativo

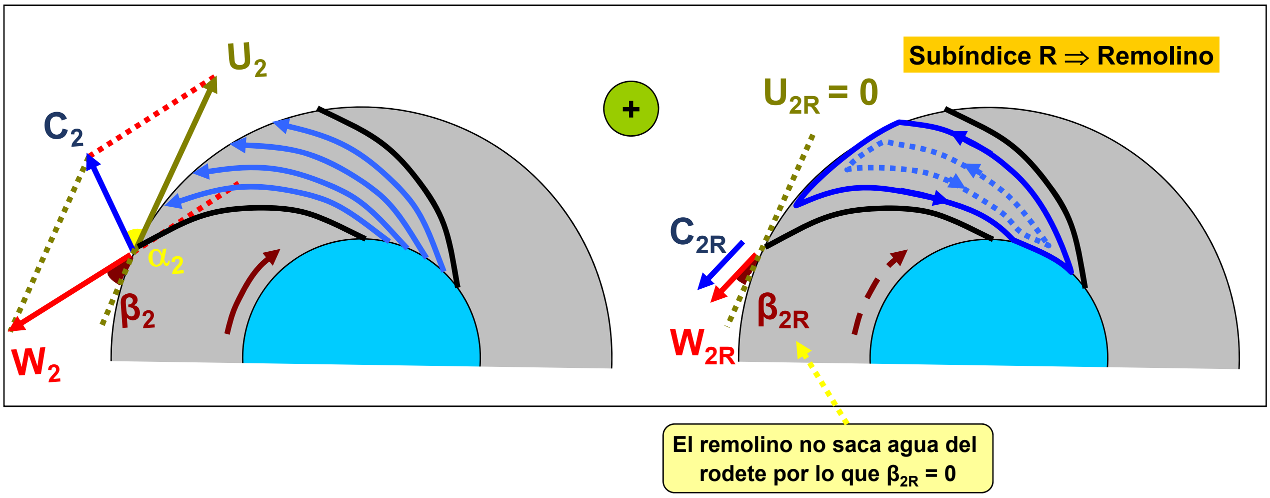


Esto hace que en cada punto la velocidad sea distinta, y por lo tanto también el triángulo de velocidades, que se compone de dos

Influencia del Número de Alabes del Rodete (V)

$\overline{C} = \overline{U} + \overline{W}$

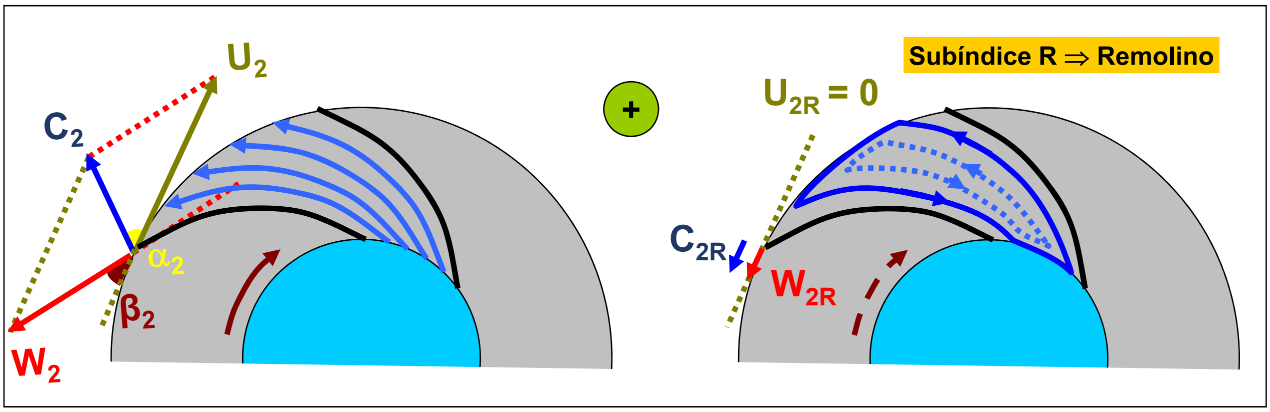
Las dos velocidades (teórica y de remolino) ofrecen dos triángulos de velocidades cuya suma es el triángulo real considerando Z álabes

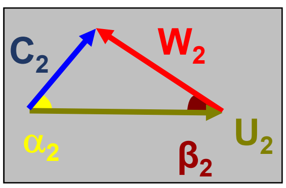


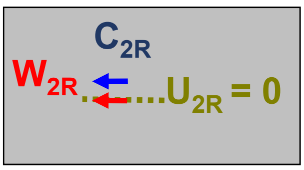
Influencia del Número de Alabes del Rodete (V)

$\overline{C} = \overline{U} + \overline{W}$

Las dos velocidades (teórica y de remolino) ofrecen dos triángulos de velocidades cuya suma es el triángulo real considerando Z álabes

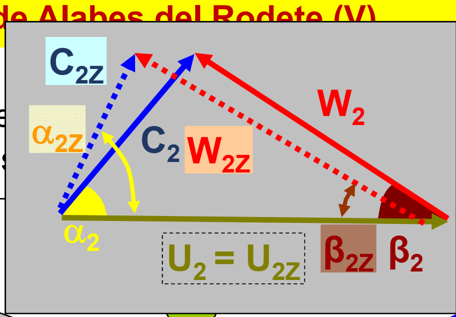




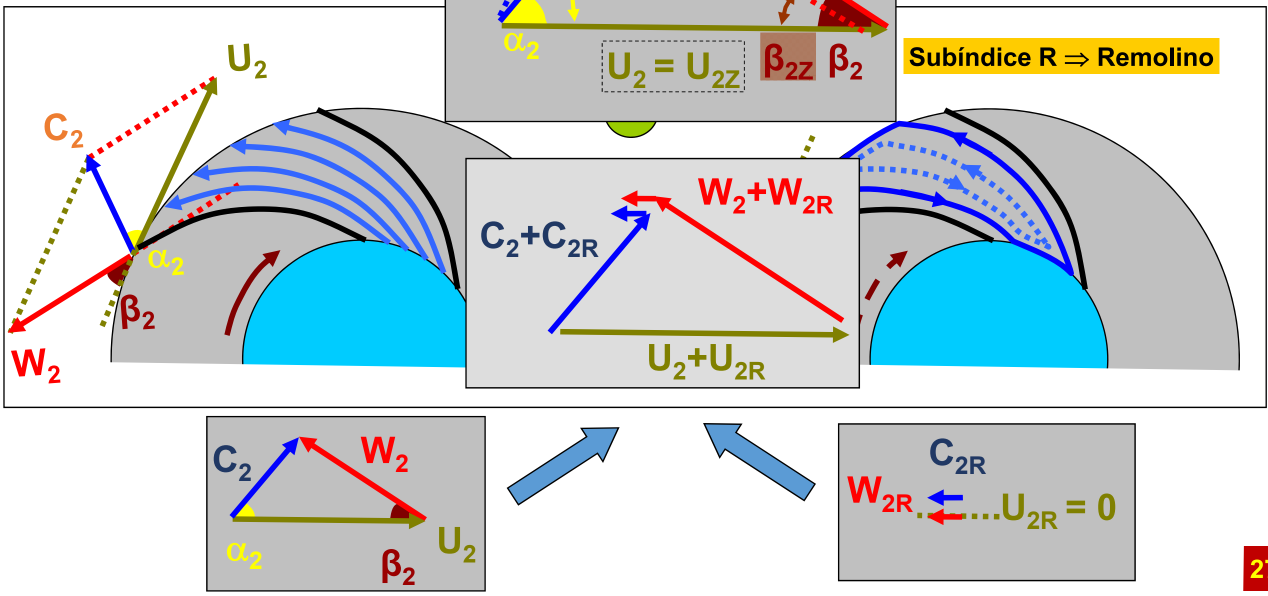


$\overline{C} = \overline{U} + \overline{W}$

Influencia del Número de Alabes del Rodete (V)



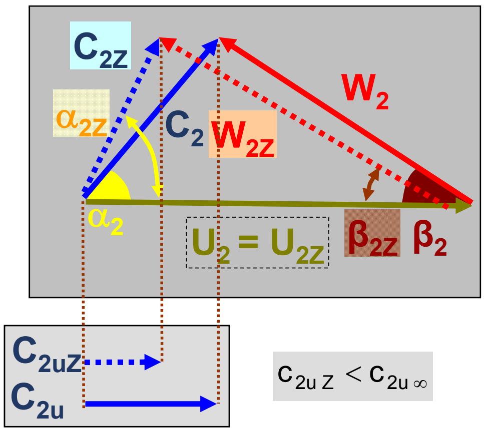
Las dos velocidades (te... n dos triángulos de velocidades cuya suma es ... Z álabes



Influencia del Número de Alabes del Rodete (VI)

Por lo tanto:

- El nº finito de álabes hace que el triángulo de velocidades tenga una desviación sobre el teórico



- En el nuevo triángulo se reduce la componente tangencial de la velocidad de salida del fluido

$c_{2u\,Z} < c_{2u\,\infty}$

- Esto provoca que se reduzca la altura suministrada por la bomba

$$H_{total} = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g}$$

$H_{t,Z} < H_{t,\infty}$

$H_{t,Z} = \mu \cdot H_{t,\infty}$

H_{tz} Altura creada por una bomba con Z álabes

$H_{t\infty}$ Altura creada por una bomba con infinitos álabes

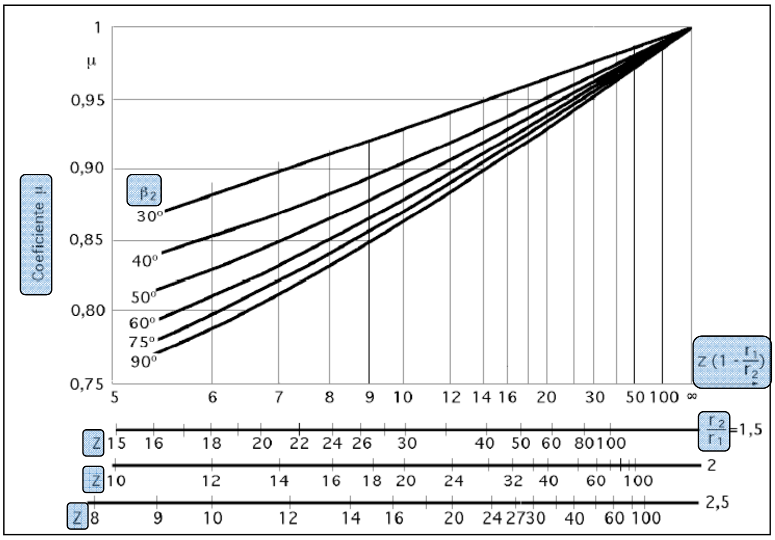
μ Coeficiente de influencia del número de álabes

Influencia del Número de Alabes del Rodete (VII)

El coeficiente μ no depende del régimen de trabajo de la bomba, sino de la forma geométrica del rodete. Es decir, es cte para un determinado rodete

La forma más habitual de determinar μ es la propuesta por Eckert:

$$\mu = \frac{1}{1 + \dfrac{\pi \cdot \mathrm{sen}\beta_2}{2 \cdot z \cdot \left(1 - \dfrac{r_1}{r_2}\right)}}$$



BLOQUE 1: Máquinas de Fluidos Incompresibles
1.2.- Bombas Hidráulicas
1.2.2.- Bombas Centrífugas

Influencia del Número de Alabes del Rodete (VIII)

Ejemplo:

- D_{ext} = 30 mm
- D_{int} = 20 mm
- Z = 21
- β_2 = 30º

Influencia del Número de Alabes del Rodete (IX)

Para determinar el número de álabes de un impulsor, Z, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$Z = \pi \cdot k \cdot \frac{r_1 + r_2}{2} \cdot \mathrm{sen}\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right)$$

Para: $60^o < \beta_2 < 90^o$

Siendo: $k = \dfrac{1}{\text{anchura media del canal entre álabes}}$ (valor entre 2 y 3)

Grado de Reacción del Rodete (I)

La altura total que adquiere el fluido en su paso por el rodete se expresa como:

$$H_t = H_{dinámica} + H_{presión} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g}$$

- Si toda la energía suministrada por los álabes al líquido se transforma en energía dinámica H_d (aumento de ésta *a presión constante*), la bomba sería de acción
- Si toda la energía suministrada por los álabes al líquido se transforma en energía de presión H_p (aumento de ésta *a velocidad constante*), la bomba sería de reacción

Si α_1=90º $\Rightarrow c_{1u} = 0 \Rightarrow H_{max}$

$$H_{total\ Max} = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g}$$

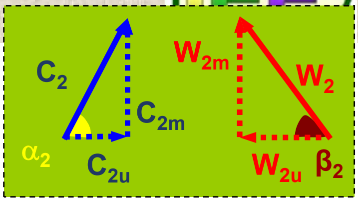
Si $\alpha_2 = 90^o \Rightarrow c_{2u} = 0 \Rightarrow H = 0$

Caudal, $Q = c_{2m} \cdot A_2$

Si $\alpha_2 = 0 \Rightarrow c_{2m} = 0 \Rightarrow Q = 0$

C_{2u} da presión
C_{2m} da caudal

En la práctica se tienen tipos intermedios en los que la energía se comunica al líquido, parte como aumento de H_d y parte como H_p



Grado de Reacción del Rodete (II)

Se define el grado de reacción, **σ,** de un rodete como la relación entre la energía o altura de presión H_p y la total H_t ganada por el líquido

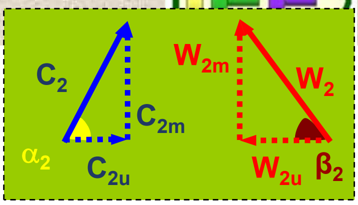
$$\sigma = \frac{H_p}{H_t} = 1 - \frac{H_d}{H_t}$$

Si se cumple que:

- No hay prerotación a la entrada $c_{1u} = 0$ ⇨ $H_t = \dfrac{u_2 \cdot c_{2u}}{g}$
- La velocidad del fluido se mantiene Cte a su paso por el rodete $c_{1m} = c_{2m}$ $(b_1 > b_2)$

$$H_d = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2 \cdot g} = \frac{c_{2m}^2 + c_{2u}^2 - c_{1m}^2 - c_{1u}^2}{2 \cdot g} \Rightarrow H_d = \frac{c_{2u}^2}{2 \cdot g}$$

$$\sigma = 1 - \frac{c_{2u}}{2 \cdot u_2}$$



Grado de Reacción del Rodete (III)

$$\left.\begin{array}{l} c_{1u} = 0 \\ c_{1m} = c_{2m} \end{array}\right\} \quad \sigma = 1 - \frac{c_{2u}}{2 \cdot u_2}$$

$$\begin{cases} \sigma = 1 \Rightarrow c_{2u} = 0 \Rightarrow \beta_{2\,MÍN} & \textbf{Reacción pura} \\ \sigma = 0{,}5 \Rightarrow c_{2u} = u_2 \Rightarrow \beta_2 = 90^\circ & \\ \sigma = 0 \Rightarrow c_{2u} = 2 \cdot u_2 \Rightarrow \beta_{2\,MÁX} & \textbf{Acción pura} \end{cases}$$

Si α_1=90º ⇒ c_{1u}= 0 ⇒ H_{max}

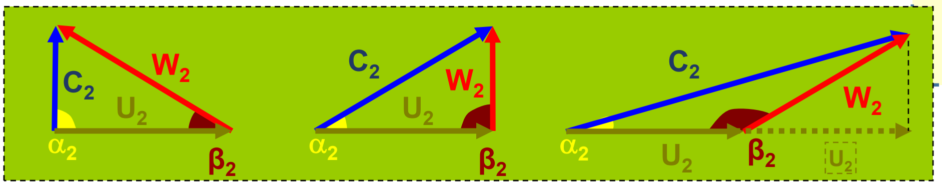
$$H_{total\,Max} = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g}$$

Si α_2 = 90º ⇒ c_{2u} = 0 ⇒ H = 0

Caudal, $Q = c_{2m} \cdot A_2$

Si α_2 = 0 ⇒ c_{2m} = 0 ⇒ Q = 0

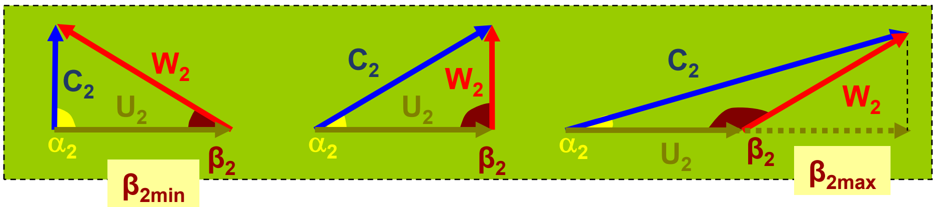
C_{2u} da presión
C_{2m} da caudal



β_{2min} β_{2max}

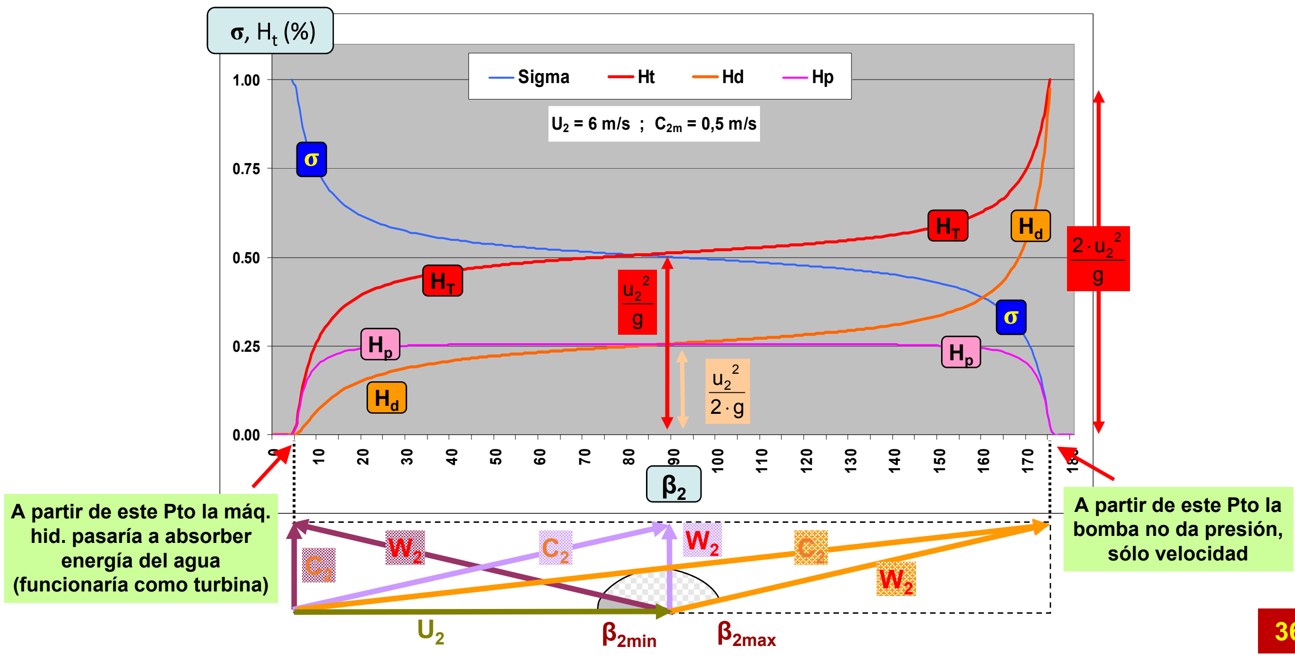
Grado de Reacción del Rodete (IV)

$$\left.\begin{array}{l} c_{1u}=0 \\ c_{1m}=c_{2m} \end{array}\right\} \quad \sigma = 1-\frac{c_{2u}}{2\cdot u_2}$$

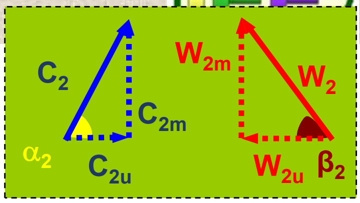


	β_{2min}	$\beta_2=90º$	β_{2max}
$H_t=\frac{u_2\cdot c_{2u}}{g}$ ⇒	$H_t\big\|_{\beta_{2min}}=0$	$H_t\big\|_{\beta_2=90º}=\frac{U_2^2}{g}$	$H_t\big\|_{\beta_{2max}}=\frac{U_2\cdot(2\cdot U_2)}{g}=\frac{2\cdot U_2^2}{g}$
$H_d=\frac{c_{2u}^2}{2\cdot g}$ ⇒	$H_d\big\|_{\beta_{2min}}=0$	$H_d\big\|_{\beta_2=90º}=\frac{U_2^2}{2\cdot g}$	$H_d\big\|_{\beta_{2max}}=\frac{(2\cdot U_2)^2}{2\cdot g}=\frac{2\cdot U_2^2}{g}$
$H_p=H_t-H_d$ ⇒	$H_p\big\|_{\beta_{2min}}=0$	$H_p\big\|_{\beta_2=90º}=\frac{U_2^2}{2\cdot g}$	$H_p\big\|_{\beta_{2max}}=0$
$\sigma=1-\frac{c_{2u}}{2\cdot u_2}$ ⇒	$\sigma\big\|_{\beta_{2min}}=1$	$\sigma\big\|_{\beta_2=90º}=0{,}5$	$\sigma\big\|_{\beta_{2max}}=0$

Grado de Reacción del Rodete (V)



Grado de Reacción del Rodete (VI)



$$\left.\begin{array}{l} c_{1u} = 0 \\ c_{1m} = c_{2m} \end{array}\right\} \quad \sigma = 1 - \frac{c_{2u}}{2 \cdot u_2}$$

$$\left.\begin{array}{l} \bar{u}_2 = \bar{c}_{2u} + \bar{w}_{2u} \\ tg\beta_2 = \frac{\bar{w}_{2m}}{\bar{w}_{2u}} = \frac{\bar{c}_{2m}}{\bar{w}_{2u}} \end{array}\right\} \bar{c}_{2u} = \bar{u}_2 - \frac{\bar{c}_{2m}}{tg\beta_2}$$

En función de β_2

$$H_t = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g} \Rightarrow H_t = \frac{u_2 \cdot \left(u_2 - \frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2}\right)}{g} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 \cdot c_{2m}}{g \cdot tg\,\beta_2}$$

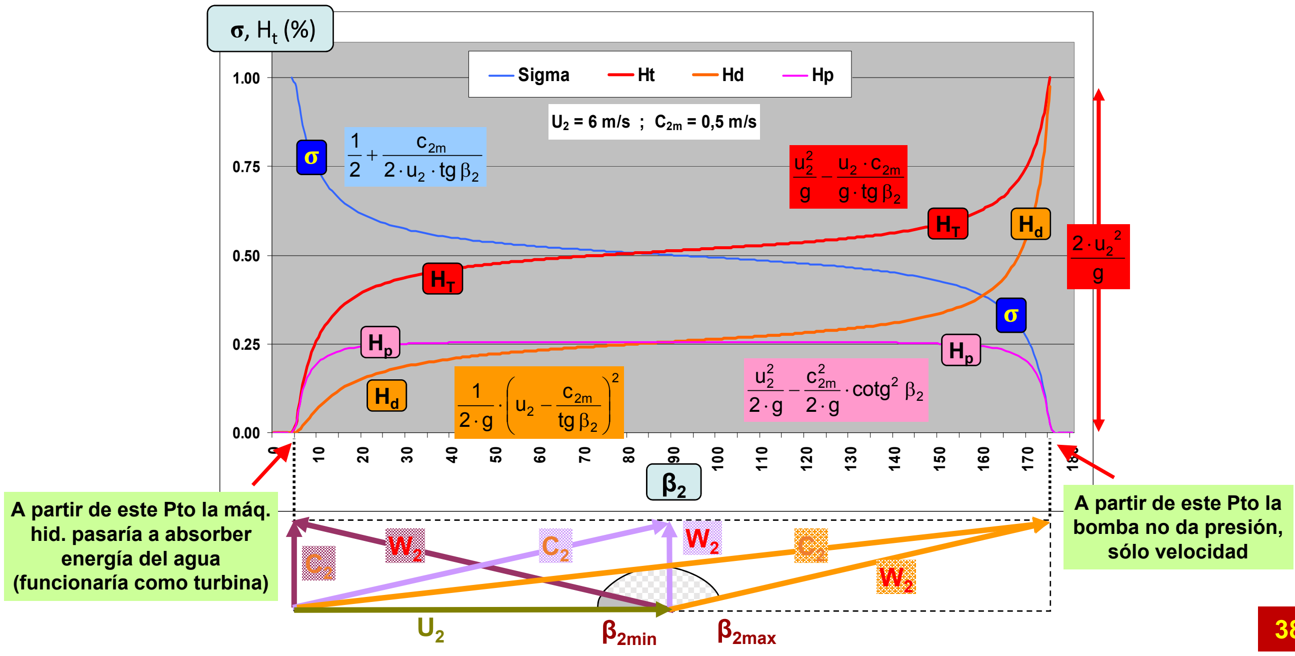
$$H_d = \frac{c_{2u}^2}{2 \cdot g} \Rightarrow H_d = \frac{\left(u_2 - \frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2}\right)^2}{2 \cdot g}$$

$$H_p = H_t - H_d \Rightarrow H_p = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g} - \frac{c_{2u}^2}{2 \cdot g} = \quad = \frac{u_2^2 - c_{2m}^2 \cdot cotg^2\,\beta_2}{2 \cdot g}$$

$$= \frac{2 \cdot u_2 \cdot c_{2u} - c_{2u}^2}{2 \cdot g} = \left| c_{2u} = u_2 - \frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2} \right| = \frac{2 \cdot u_2 \cdot \left(u_2 - \frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2}\right) - \left(u_2 - \frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2}\right)^2}{2 \cdot g} = \frac{\left[\cancel{2} \cdot u_2^2 - \cancel{\frac{2 \cdot u_2 \cdot c_{2m}}{tg\,\beta_2}}\right] - \left[\cancel{u_2^2} + \frac{c_{2m}^2}{tg^2\,\beta_2} - \cancel{2 \cdot u_2 \cdot \frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2}}\right]}{2 \cdot g} =$$

$$\sigma = 1 - \frac{c_{2u}}{2 \cdot u_2} \Rightarrow \sigma = 1 - \frac{u_2 - \frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2}}{2 \cdot u_2} = 1 - \frac{u_2}{2 \cdot u_2} + \frac{\frac{c_{2m}}{tg\,\beta_2}}{2 \cdot u_2} = \frac{1}{2} + \frac{c_{2m}}{2 \cdot u_2 \cdot tg\,\beta_2}$$

Grado de Reacción del Rodete (VII)



Grado de Reacción del Rodete (VIII)

- A medida que aumenta β_2, aumenta H_t y disminuye σ
- Que aumente H_t supone una ventaja, ya que con una bomba pequeña se pueden conseguir importantes alturas
- Que disminuya σ supone una desventaja, ya que se crea una mayor altura cinética en el rodete
- Las pérdidas por fricción son proporcionales al cuadrado de la velocidad, por lo que no interesa que σ disminuya excesivamente. En tal caso, sería necesario transformar el exceso de energía cinética en energía de presión, a través de la voluta o el difusor, con las pérdidas que ello supone

CONCLUSIÓN: Escoger un β_2 "de compromiso", del orden de 20º a 25º