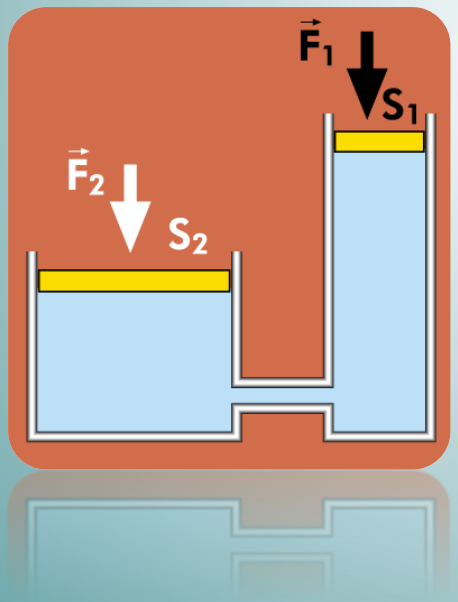
Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas

Tema 09. Máquinas Hidráulicas (1)



Severiano F. Pérez Remesal

Carlos Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

Creative Commons BY-NC-SA 3.0

MF. T9.- Máquinas hidráulicas

Objetivos:

El objetivo de este tema es desarrollar el concepto de máquina hidráulica y su funcionamiento. La máquina hidráulica por excelencia estudiada por los ingenieros industriales es la turbina hidráulica, pero por su extensa aplicación destacan las bombas centrífugas y los ventiladores.

El tema se completa con tress prácticas de laboratorio:

- En la primera se explican despieces de máquinas hidráulicas (bombas centrífugas, turbinas hidráulicas y ventiladores)
- En la segunda se ensayan bombas centrífugas y sus acoplamientos en serie y paralelo
- En la tercera se ensayan dos turbinas hidráulicas: pelton y francis

Máquinas de Fluidos son máquinas que transforman energía

- ***Máquina Hidráulicas*:** no cambian la densidad el fluido
  (líquidos, incompresibles)

- ***Máquinas Térmicas:*** si se modifica la densidad del fluido
  (gases y vapores)

Máquina Hidráulica es una máquina que intercambia energía con un fluido incompresible

- ***Motor H.:*** absorbe E. H. de un fluido (de presión y/o cinética) y proporciona E. Mec. en el eje
  (ej: turbina hidráulica)

- ***Generador H.:*** absorbe E. Mec. en el eje y proporciona E. H. a un fluido
  (ej: bomba centrífuga)

Similar a las máquinas eléctricas

➢ **Clasificación por la continuidad de la circulación del fluido de trabajo**

- ***Volumétricas o de Desplazamiento Positivo:*** en cada instante evoluciona una cantidad determinada de fluido
  ej: motor de combustión interna, compresor alternativo, ….

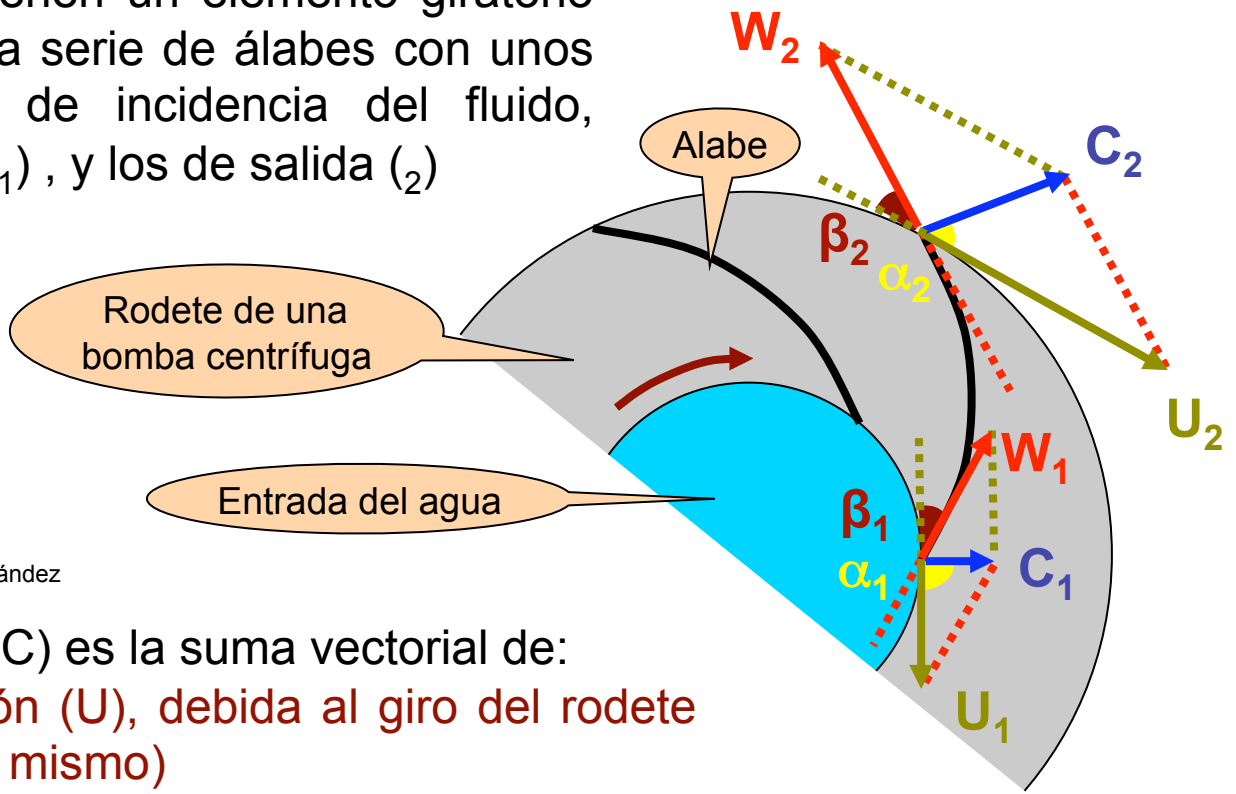
- ***Dinámicas o Turbomáquinas*:** circulación continua
  ej: bomba centrífuga, ventilador, turbina hidráulica, …

Los cambios y velocidad (dirección y magnitud) del fluido juegan un papel importante

Se estudian con la Ec. De Euler

Las ***Turbomáquinas*** tienen un elemento giratorio (rodete), que posee una serie de álabes con unos determinados ángulos de incidencia del fluido, siendo los de entrada ($_1$) , y los de salida ($_2$)

P. Fernández



La velocidad del fluido (C) es la suma vectorial de:

- Velocidad de rotación (U), debida al giro del rodete (tangente al giro del mismo)
- Velocidad de traslación a lo largo del rodete (W) (sigue la dirección del álabe, tangente a él)

Estas velocidades y los ángulos entre ellas forman los triángulos de velocidades

Para una Bomba Centrífuga:

Aspiración:

El líquido es aspirado por el ojo del rodete

Rodete:

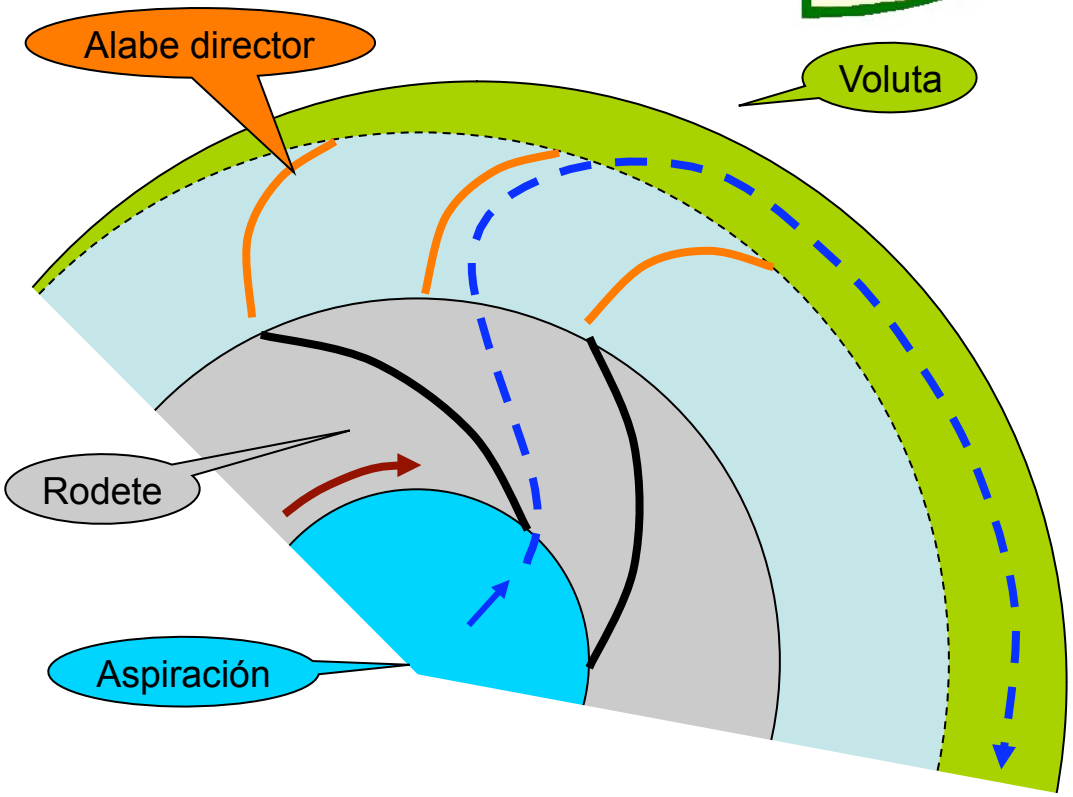
Comunica energía cinética al fluido, el flujo pasa de axial a radial

Alabes directores:

Recoger el fluido y lo envía hacia la voluta sin choques ni turbulencias (opcionales)

Voluta:

En ella se transforma la energía cinética del fluido en energía de presión

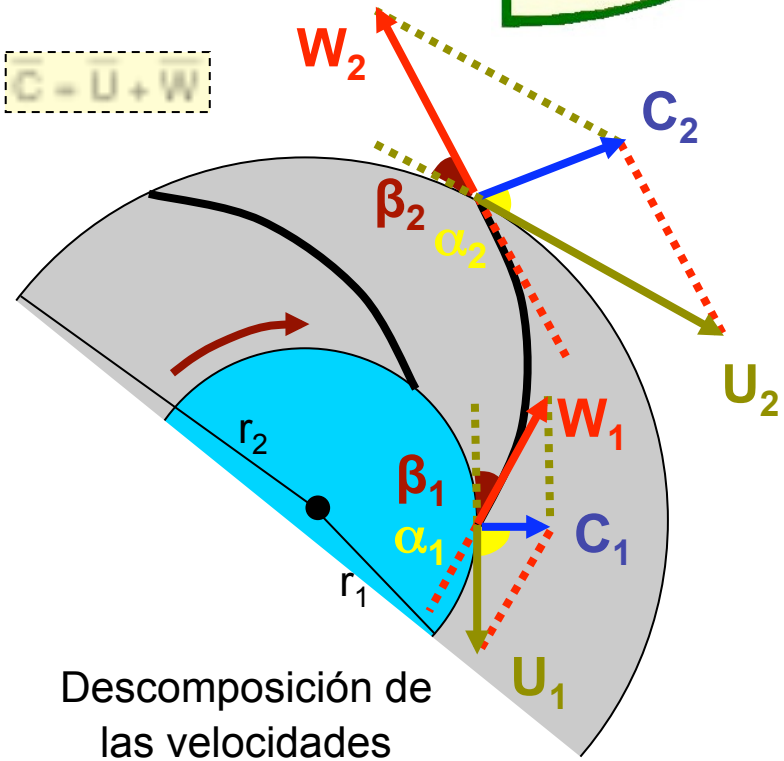


	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

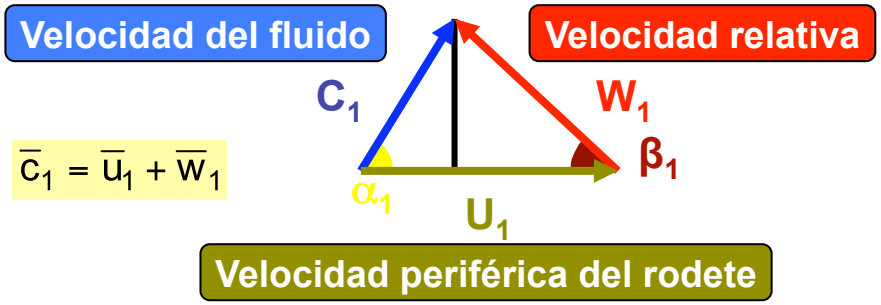
Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$

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

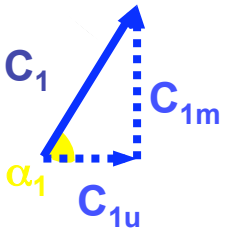


Triángulo de Velocidades

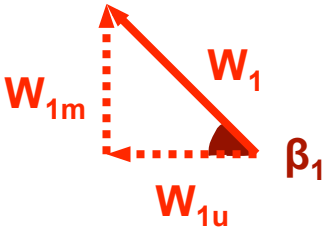


$\overline{c}_1 = \overline{u}_1 + \overline{w}_1$

Descomposición de las velocidades



$\overline{c}_1 = \overline{c}_{1u} + \overline{c}_{1m}$



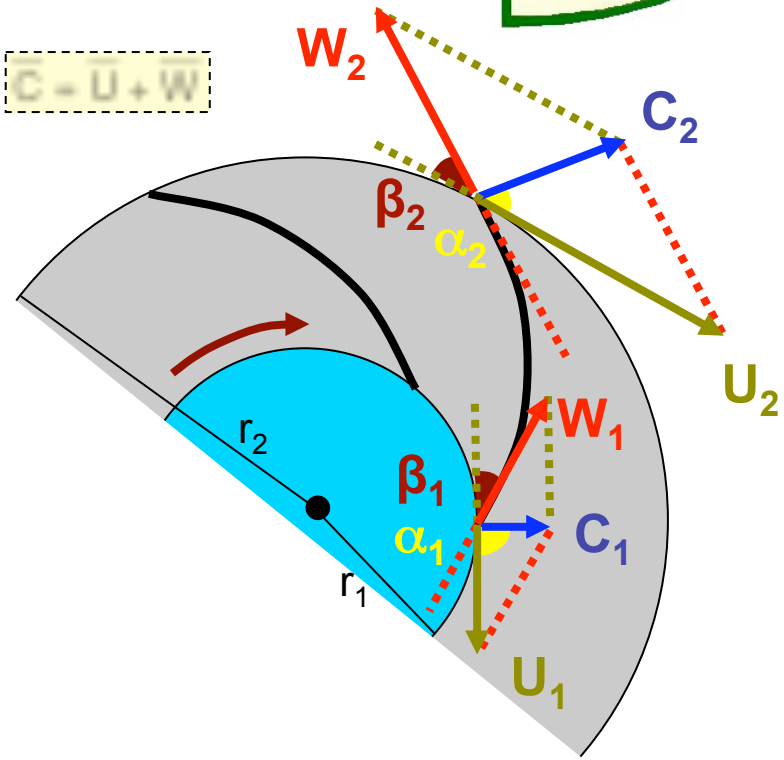
$\overline{w}_1 = \overline{w}_{1u} + \overline{w}_{1m}$

$$c_{1u} = c_1 \cos\alpha_1; \quad c_{1m} = c_1 \operatorname{sen}\alpha_1; \quad c_1 = \sqrt{c_{1u}^2 + c_{1m}^2}$$

$$w_{1u} = w_1 \cos\beta_1; \; w_{1m} = w_1 \operatorname{sen}\beta_1; \; w_1 = \sqrt{w_{1u}^2 + w_{1m}^2}$$

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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

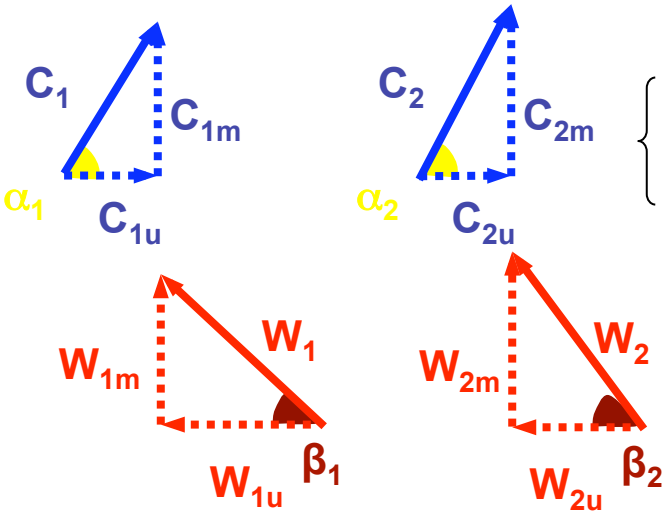


Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$

$$U_1 = \frac{2\,\pi\,r_1\,n}{60}\ (m/s) \qquad U_2 = \frac{2\,\pi\,r_2\,n}{60}\ (m/s)$$

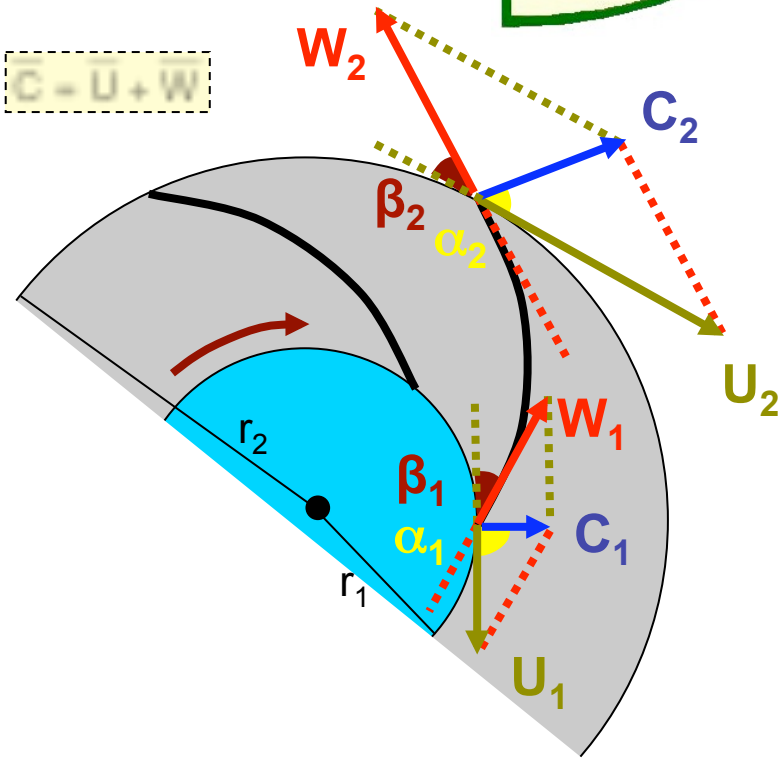
n velocidad de giro (rpm)



- C_{1u} y C_{2u} "hacen girar el agua en el rodete"
- C_{1m} y C_{2m} "hacen entrar/salir el agua del rodete"

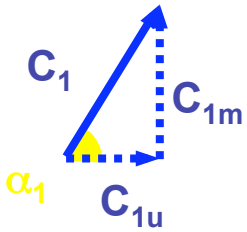
	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\left[\overline{C}-\overline{U}\right]$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1=\left[\overline{C}_1-\overline{U}_1\right]$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2=\left[\overline{C}_2-\overline{U}_2\right]$

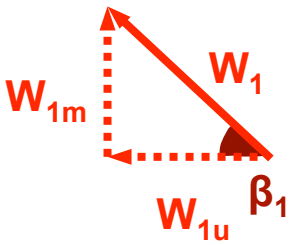
$\overline{C}=\overline{U}+\overline{W}$



Forma del álabe

α	β
$\left[\overline{C}\Lambda\overline{U}\right]$	$\left[\overline{W}\Lambda-\overline{U}\right]$





$$\begin{cases} C_{1m}=W_{1m} \\ C_{2m}=W_{2m} \end{cases}$$

$$C_{1m}=W_{1m}\Rightarrow C_1\,\text{sen}\,\alpha_1=W_1\,\text{sen}\,\beta_1\Rightarrow W_1=\frac{C_1\,\text{sen}\,\alpha_1}{\text{sen}\,\beta_1}$$

$$U_1=C_{1u}+W_{1u}\Rightarrow U_1=C_1\cos\alpha_1+W_1\cos\beta_1\Rightarrow U_1=C_1\left(\cos\alpha_1+\frac{\text{sen}\,\alpha_1}{\text{tg}\,\beta_1}\right)$$

$$C_1=\frac{U_1}{\left(\cos\alpha_1+\dfrac{\text{sen}\,\alpha_1}{\text{tg}\,\beta_1}\right)}$$

En las bombas centrífugas es típico que la entrada del líquido en el rodete sea radial

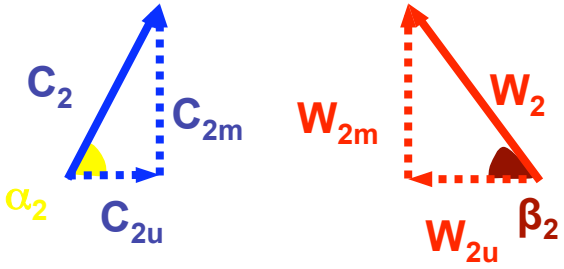
$$\Rightarrow\begin{cases}\alpha_1=90^\circ\\ c_{1u}=0\end{cases}\qquad\Rightarrow C_1=U_1\,\text{tg}\beta_1\ (\text{m/s})$$

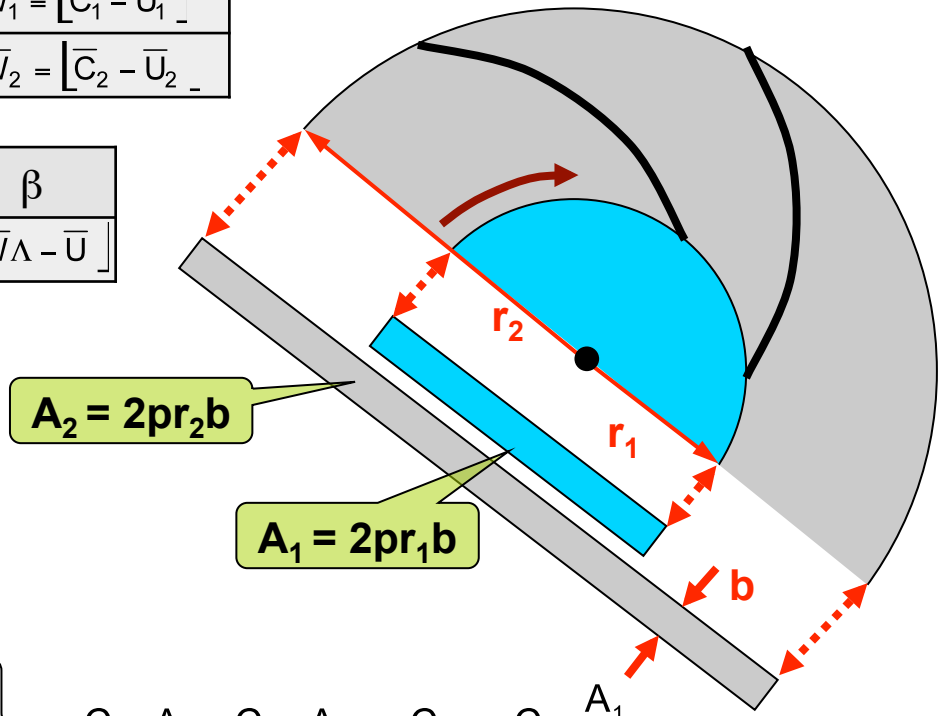
	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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

Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$





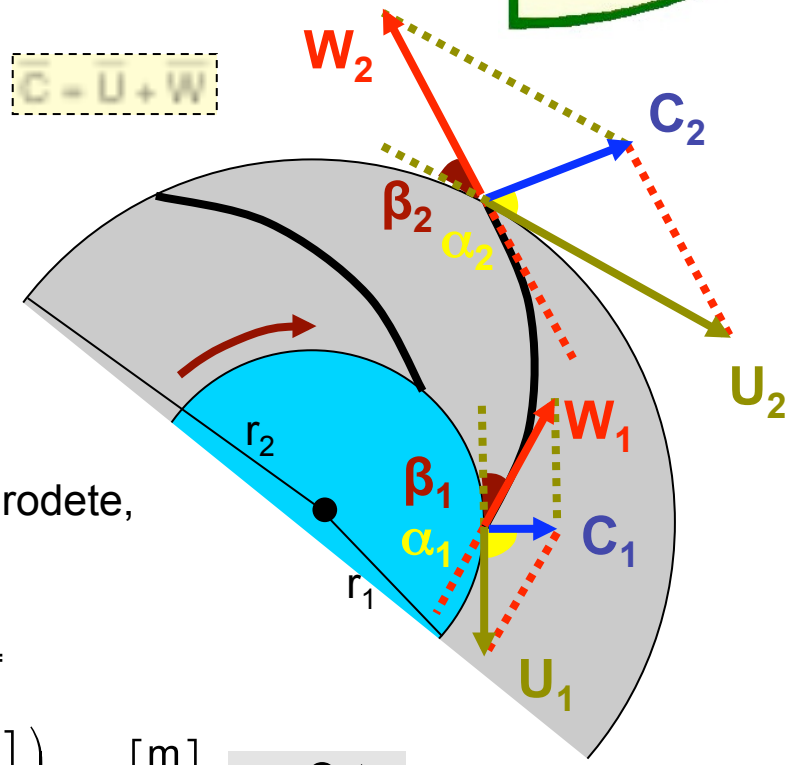
$$\text{Caudal}_1 = \text{Caudal}_2 \left\{ \begin{array}{l} \text{Caudal}_1 = C_{1m}\, A_1 \\ \text{Caudal}_2 = C_{2m}\, A_2 \end{array} \right\} \Rightarrow C_{1m}\, A_1 = C_{2m}\, A_2 \Rightarrow C_{2m} = C_{1m} \frac{A_1}{A_2} \Rightarrow$$

$$C_{2m} = C_{1m} \frac{2\,\pi\, r_1\, \text{Ancho}_{\text{rodete}}}{2\,\pi\, r_2\, \text{Ancho}_{\text{rodete}}} \approx \frac{C_{1m}\, r_1}{r_2}$$

Si $\alpha_1 = 90^{\circ} \Rightarrow C_{1m} = C_1$

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \bar{C} - \bar{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\bar{W}_1 = \lfloor \bar{C}_1 - \bar{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\bar{W}_2 = \lfloor \bar{C}_2 - \bar{U}_2 \rfloor$

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



Forma del álabe

α	β
$\lfloor \bar{C} \Lambda \bar{U} \rfloor$	$\lfloor \bar{W} \Lambda - \bar{U} \rfloor$

El fluido sufre un cambio de velocidad al paso por el rodete, por lo que la Fuerza implicada en ello es:

$$F = m\,[kg]\; a\,[m/s^2] = m\,[kg]\frac{\Delta v\,[m/s]}{t\,[s]} = \frac{m\,[kg]}{t\,[s]}\Delta v\left[\frac{m}{s}\right] =$$

$$= \left(\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right] Q\left[\frac{m^3}{s}\right]\right)\Delta v\left[\frac{m}{s}\right] = \rho\, Q\, \Delta v$$

$$\bar{F} = \rho\, Q\, \Delta\bar{v} \Rightarrow \quad \bar{F} = \rho\, Q\, \Delta\bar{c} \Rightarrow \quad \bar{F} = \rho\, Q\,(\bar{c}_2 - \bar{c}_1)$$

Y tomando momentos con relación al eje del rodete:

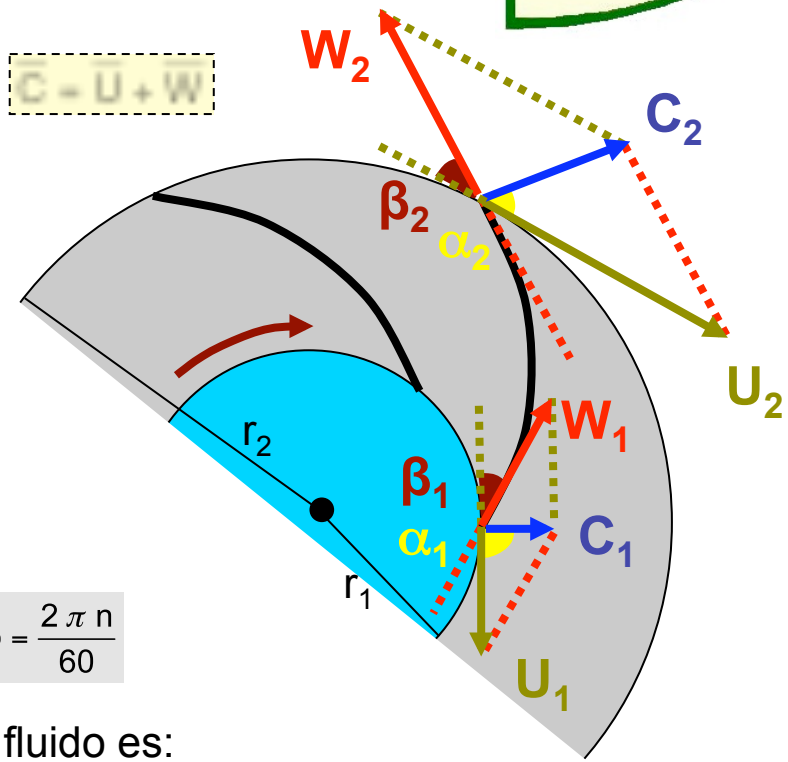
$$M = F\,d \Rightarrow \quad M = \rho\, Q\,(c_{2u}\, r_2 - c_{1u}\, r_1) \Rightarrow \quad M = Q\,\rho\,(r_2 c_2 \cos\alpha_2 - r_1 c_1 \cos\alpha_1)$$

M lo crea la componente tangencial de la velocidad del fluido, c_u

La componente radial, C_m, no crea M

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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



Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$

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

Y la potencia desarrollada será:

$$Pot = M\,\omega \Rightarrow \quad Pot = Q\,\rho\,\omega\,(r_2 c_2 \cos\alpha_2 - r_1 c_1 \cos\alpha_1) \qquad \omega = \frac{2\,\pi\,n}{60}$$

Por otro lado la potencia desarrollada por un flujo de fluido es:

$$Pot = \gamma\,Q\,H \qquad \left[\frac{N}{m^3}\,\frac{m^3}{s}\,m = \frac{N\,m}{s} = \frac{J}{s} = W\right]$$

$$Pot = Q\,\rho\,\omega\,(r_2 c_2 \cos\alpha_2 - r_1 c_1 \cos\alpha_1) = \gamma\,Q\,H \Rightarrow \quad H = \frac{\rho\,\omega\,(r_2 c_2 \cos\alpha_2 - r_1 c_1 \cos\alpha_1)}{\gamma}$$

$$\begin{cases} \omega\,r = u \\ c\cos\alpha = c_u \\ \gamma = \rho\,g \end{cases}$$

1ª Ec. EULER

Generadores Hid. $\Rightarrow$ $H_{G.H.} = \dfrac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g}$

Motores Hid. $\Rightarrow$ $H_{M.H.} = \dfrac{u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}}{g}$

La Energía necesaria para elevar una masa “m” de líquido a una altura “H_t” es equivalente al trabajo que se debe realizar CONTRA la gravedad

El Trabajo que desarrolla dicha fuerza para desplazar la masa “m”:

$$W = F \cdot l = F \cdot H_t = \left| F = m \cdot g \right| = m \cdot g \cdot H_t = \left| m = \rho \cdot V \right| = \rho \cdot V \cdot g \cdot H_t$$

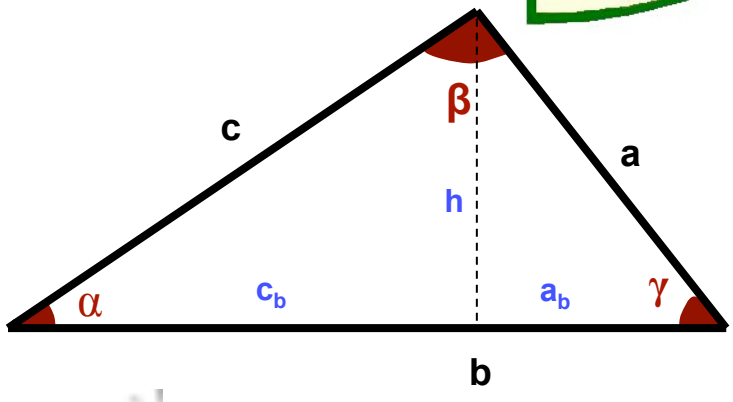
Por lo tanto, la Potencia necesaria para elevar el fluido es:

$$Pot = \frac{W}{t} = \frac{\rho \cdot g \cdot V \cdot H_t}{t} = \left| \begin{array}{l} \rho \cdot g = \gamma \\ \frac{V}{t} = Q \end{array} \right| = \gamma \cdot Q \cdot H_t$$

Similar sería la potencia desarrollada por el fluido en una turbina

Teorema del Coseno:

dado un triángulo de lados a, b y c, siendo α, β, γ, los ángulos opuestos a ellos, entonces:



$$c^2 = c_b^2 + h^2$$

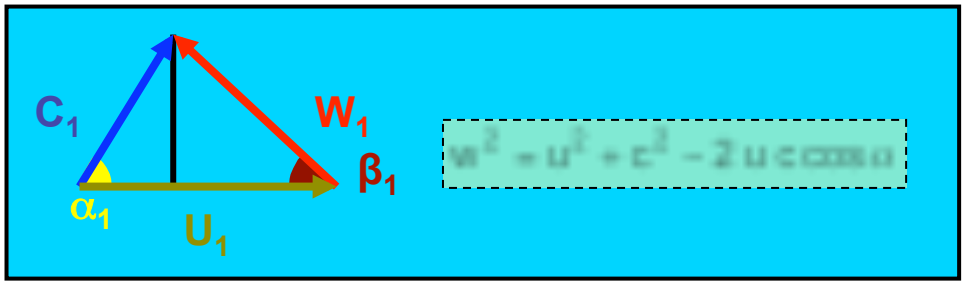
$$h^2 = a^2 - a_b^2 = a^2 - (b - c_b)^2 = a^2 - (b^2 - 2bc_b + c_b^2)$$

$$c^2 = c_b^2 + (b^2 - b^2 + 2bc_b - c_b^2) = a^2 - b^2 + 2bc_b$$

$$\cos\gamma = \frac{a_b}{a} = \frac{b - c_b}{a} \Rightarrow c_b = b - a\cos\gamma$$

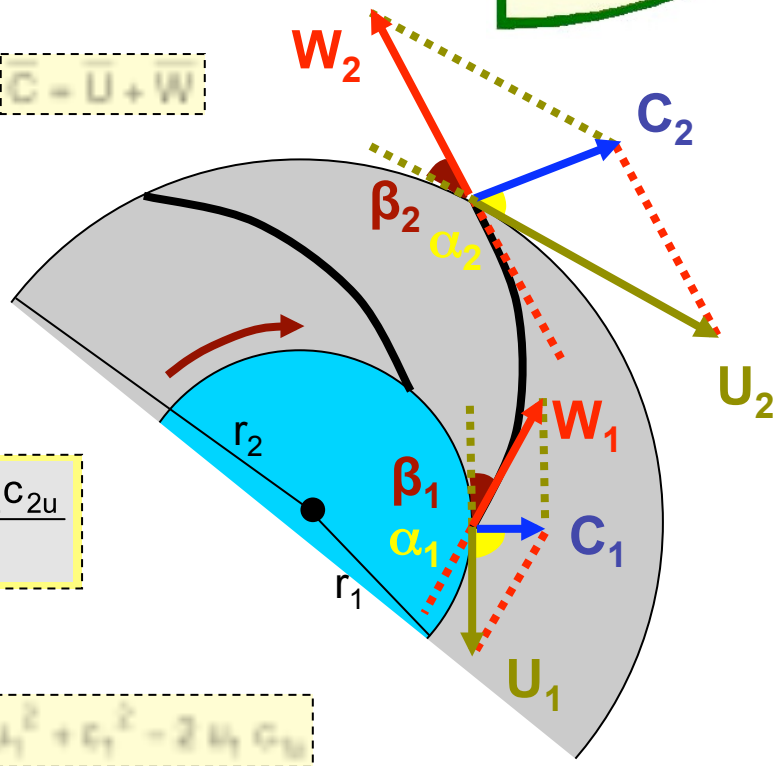
$$c^2 = a^2 - b^2 + 2b[b - a\cos\gamma] = a^2 - b^2 + 2b^2 - 2ab\cos\gamma$$

$$\boxed{c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma}$$



	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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

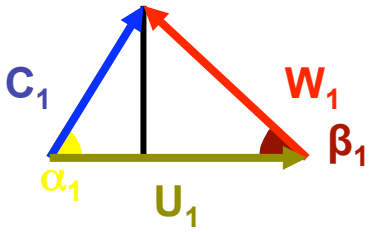


Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$

1ª Ec. EULER

$$H_{G.H.} = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g} \qquad H_{M.H.} = \frac{u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}}{g}$$



$$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2 u_1 c_1 \cos\alpha_1 = u_1^2 + c_1^2 - 2 u_1 c_{1u}$$

$$u_1 c_{1u} = \frac{u_1^2 + c_1^2 - w_1^2}{2} \qquad u_2 c_{2u} = \frac{u_2^2 + c_2^2 - w_2^2}{2}$$

2ª Ec. EULER

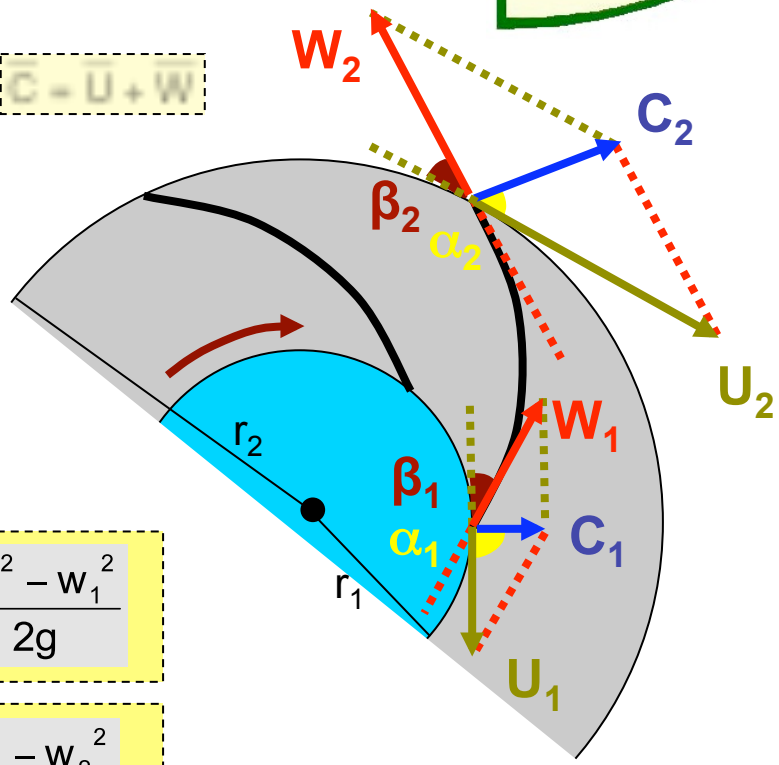
$$H_{G.H.} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \qquad H_{M.H.} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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

Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$



1ª Ec. EULER

$$H_{G.H.} = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g}$$

2ª Ec. EULER

$$H_{G.H.} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$$

$$H_{M.H.} = \frac{u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}}{g}$$

$$H_{M.H.} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

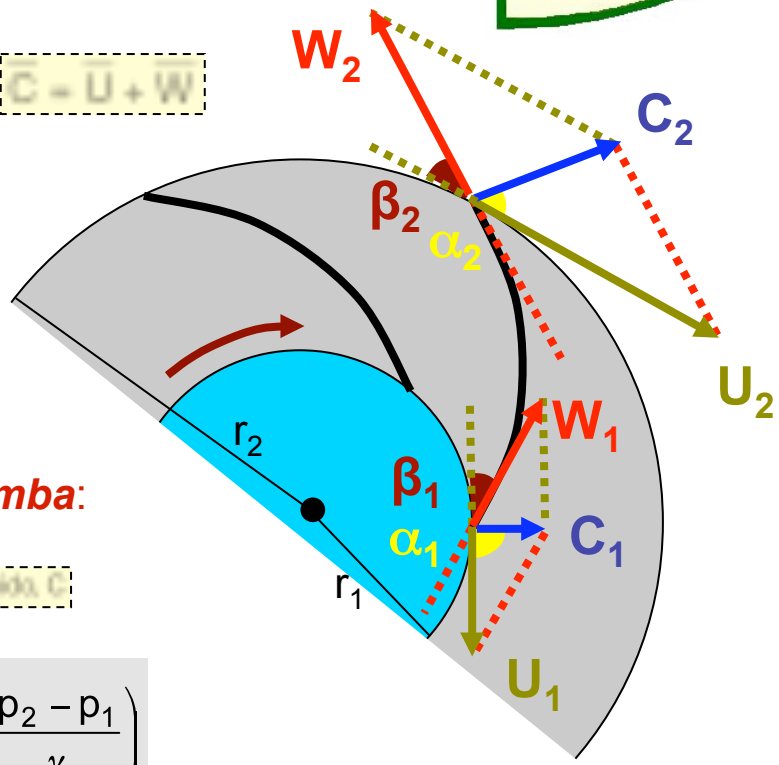
La ecuación de Euler describe el funcionamiento una turbomáquina ideal en la que no hay ningún tipo de pérdida y todas las partículas del líquido siguen las mismas líneas de corriente (Teoría unidimensional, infinitos alabes).

De acuerdo a esta ecuación, la altura es independiente del líquido bombeado.

En una bomba (G.H.) si $\alpha_1 = 90^\circ \Rightarrow c_{1u} = 0 \Rightarrow H_{max}$

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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



Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$

Aplicando la Ec. de Bernouilli en el rodete de una ***bomba***:

$$\left(z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma}\right) + H_{u/o} - H_{ex} - H_{per} = \left(z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma}\right)$$

V = velocidad del fluido; C

$$H_u = (z_2 - z_1) + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}\right) + \left(\frac{p_2 - p_1}{\gamma}\right)$$

La altura dinámica del rodete es:

$$H_{d\,G.H.} = \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}\right)$$

Despreciando la diferencia de cota en el rodete (z_2-$z_1 \approx 0$), y considerando la 2ª Ec Euler:

$$H_{G.H.} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$$

La altura de presión del rodete es:

$$H_{p\,G.H.} = \left(\frac{p_2 - p_1}{\gamma}\right)$$

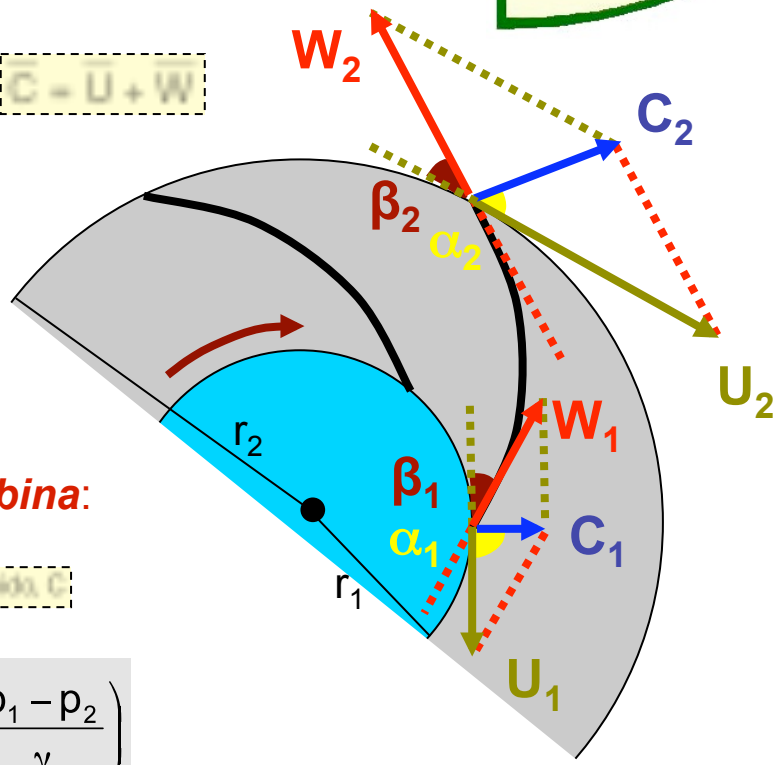
$$H_{p\,G.H.} = \left(\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}\right) - \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}\right)$$

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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

Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$



Aplicando la Ec. de Bernouilli en el rodete de una ***turbina***:

$$\left(z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma}\right) + H_{u/o} - H_{ex} - H_{per} = \left(z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma}\right)$$

V = velocidad del fluido, C

$$H_u = (z_1 - z_2) + \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}\right) + \left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma}\right)$$

La altura dinámica del rodete es:

$$H_{d\,M.H.} = \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}\right)$$

Despreciando la diferencia de cota en el rodete (z_2-$z_1 \approx 0$), y considerando la 2ª Ec Euler:

$$H_{M.H.} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

La altura de presión del rodete es:

$$H_{p\,M.H.} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma}\right)$$

$$H_{p\,M.H.} = \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g}\right) - \left(\frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}\right)$$

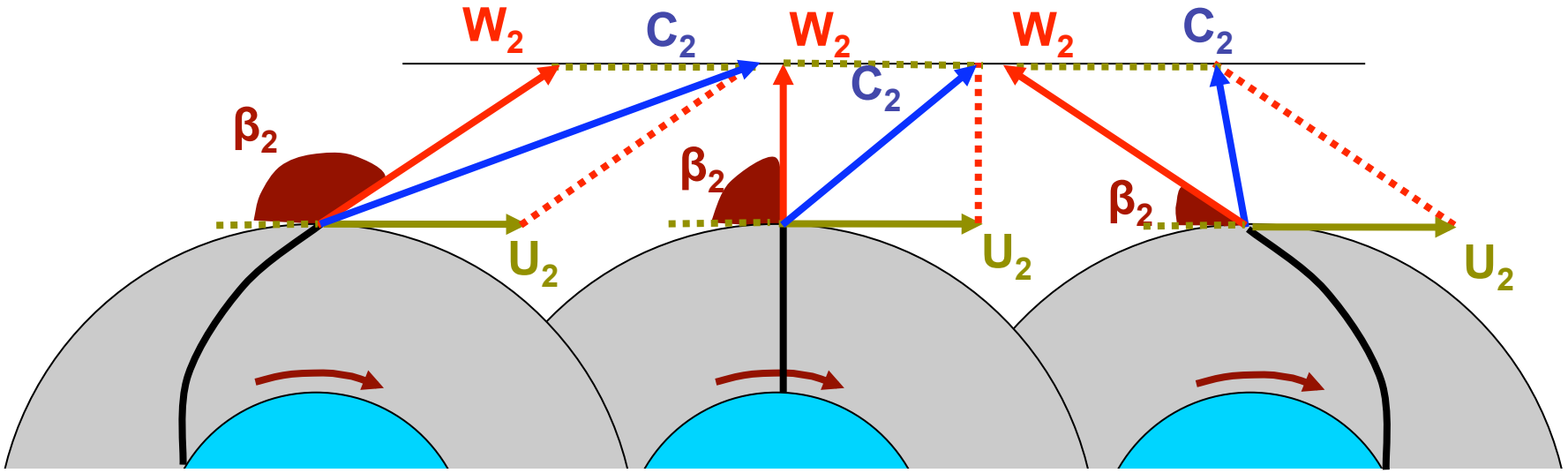
	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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

Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$

La geometría de los álabes tiene gran influencia en el comportamiento de la máquina



Alabes curvados hacia delante | Alabes rectos | Alabes curvados hacia atrás

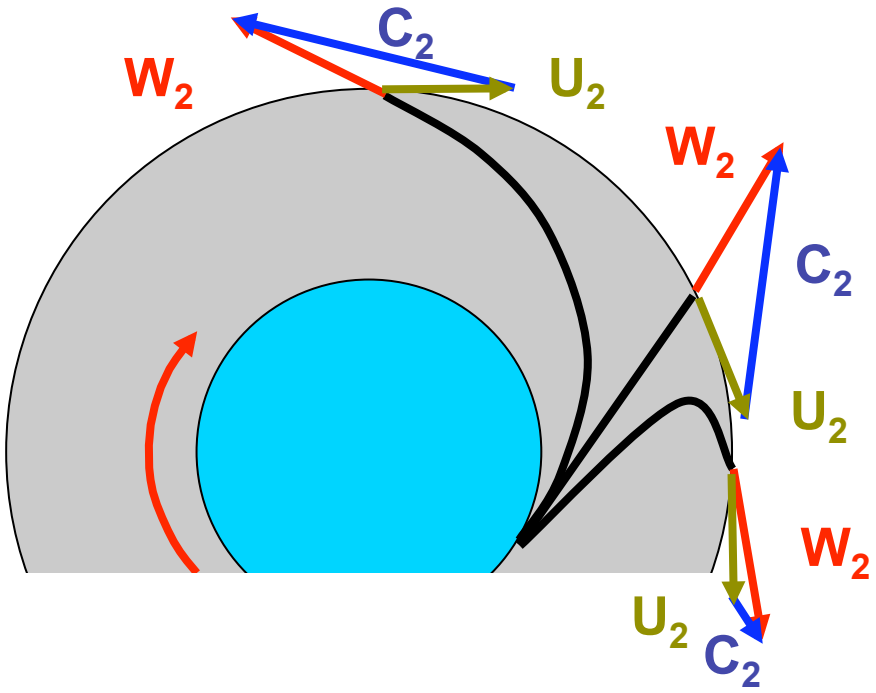
	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $\lfloor \overline{C} - \overline{U} \rfloor$
Entrada	C_1	U_1	$\overline{W}_1 = \lfloor \overline{C}_1 - \overline{U}_1 \rfloor$
Salida	C_2	U_2	$\overline{W}_2 = \lfloor \overline{C}_2 - \overline{U}_2 \rfloor$

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

Forma del álabe

α	β
$\lfloor \overline{C} \Lambda \overline{U} \rfloor$	$\lfloor \overline{W} \Lambda - \overline{U} \rfloor$

La geometría de los álabes tiene gran influencia en el comportamiento de la máquina

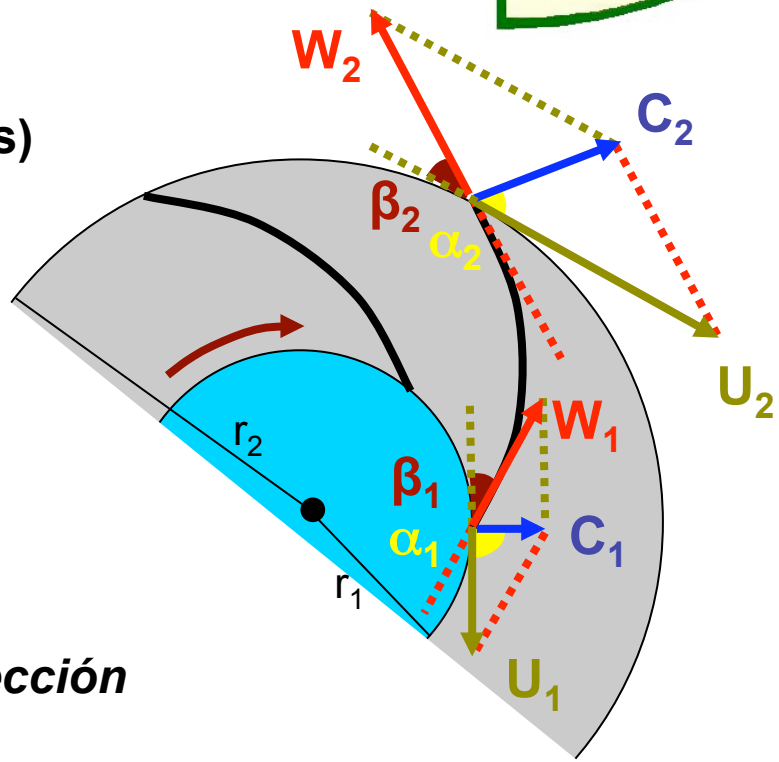


Grado de Reacción de una Turbomáquina (s)

Hace referencia al modo de trabajo del rodete

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

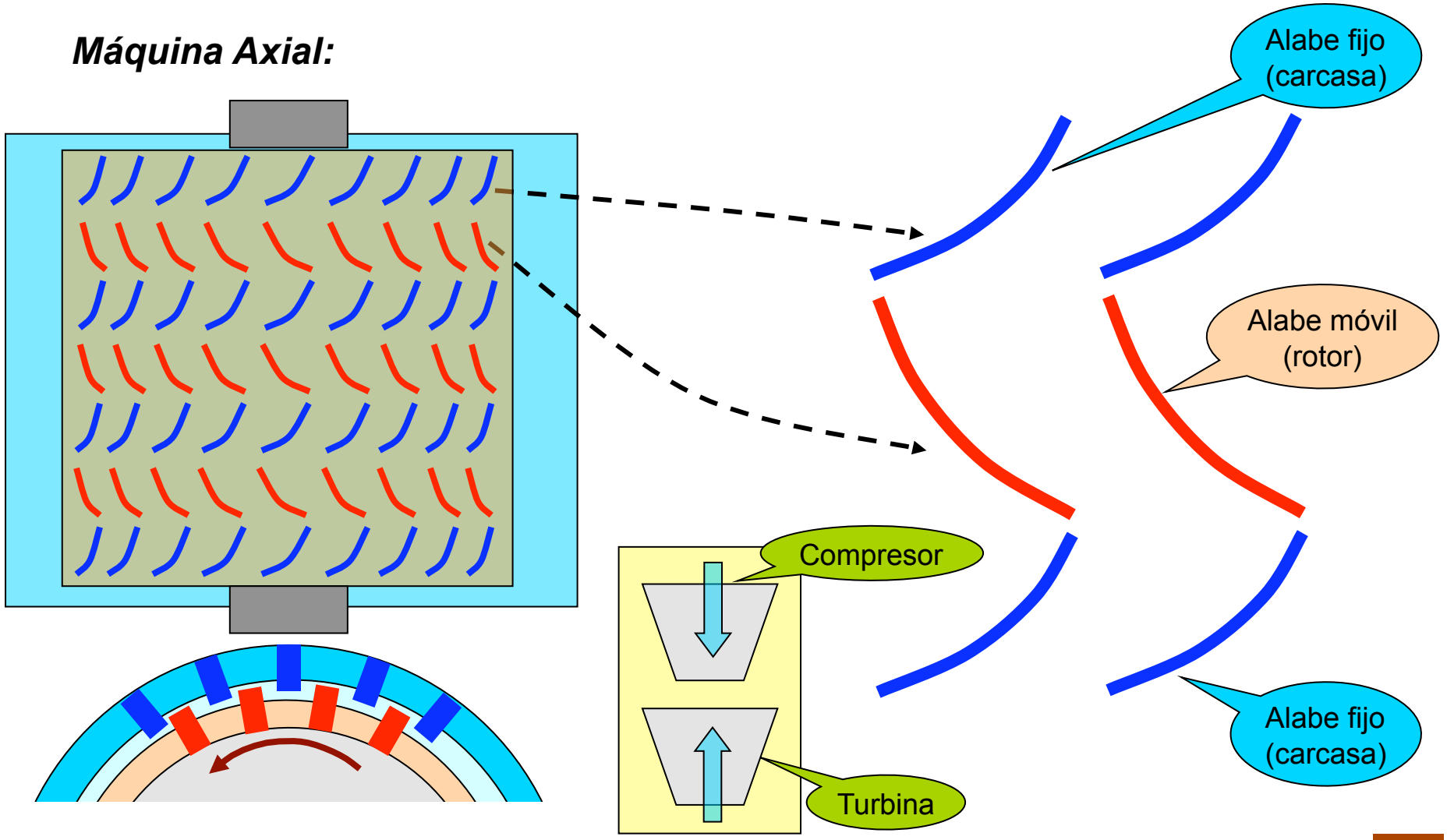
$$\left.\begin{array}{c} H_u > 0 \\ H_p <,=,> 0 \end{array}\right\} \sigma <,=,> 0$$



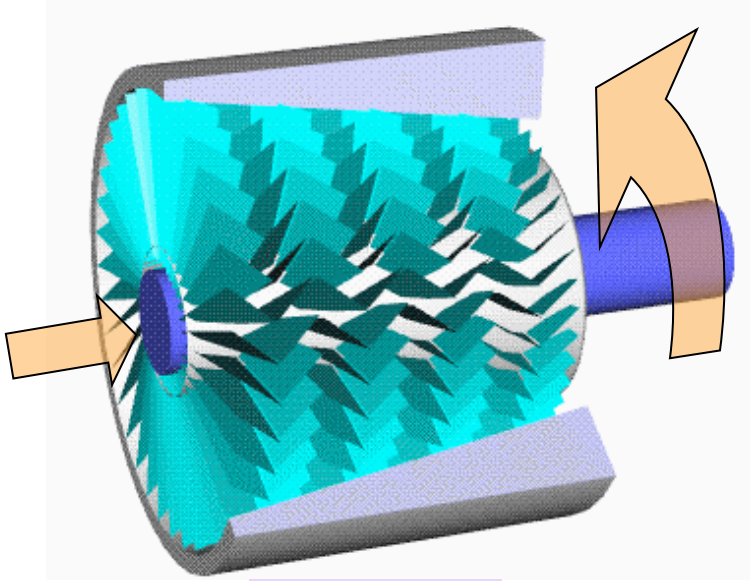
Clasificación de Turbomáquinas por la dirección del flujo en el rodete

- Máquina radial
- Máquina axial
- Máquina radio axial, mixta o semi axial

Máquina Axial:

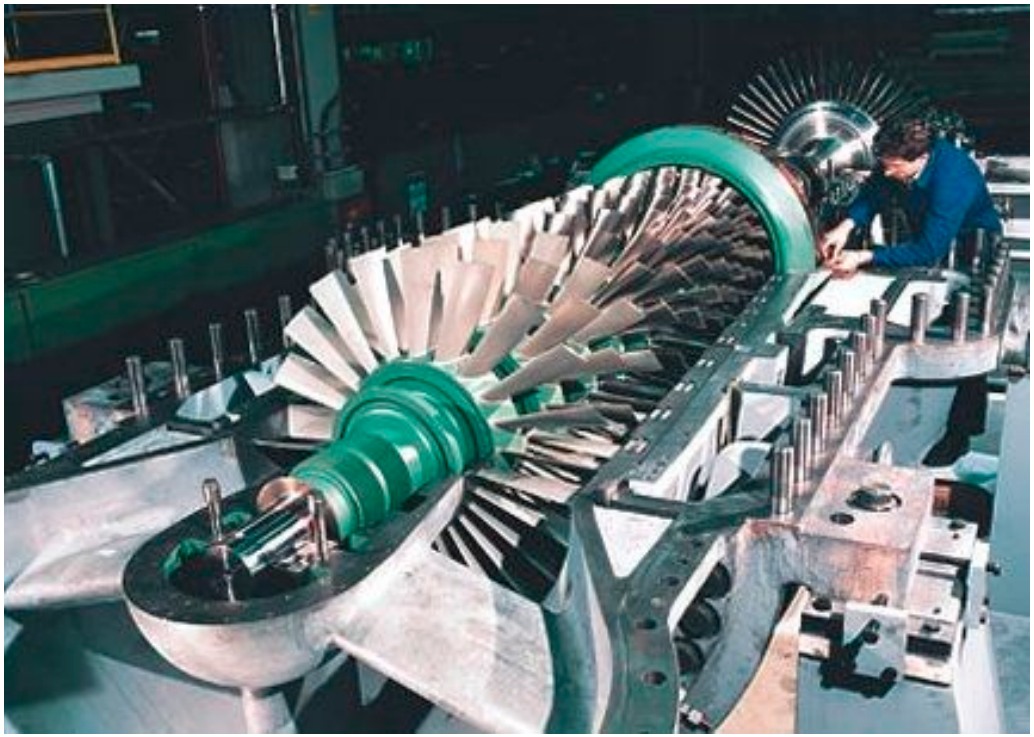


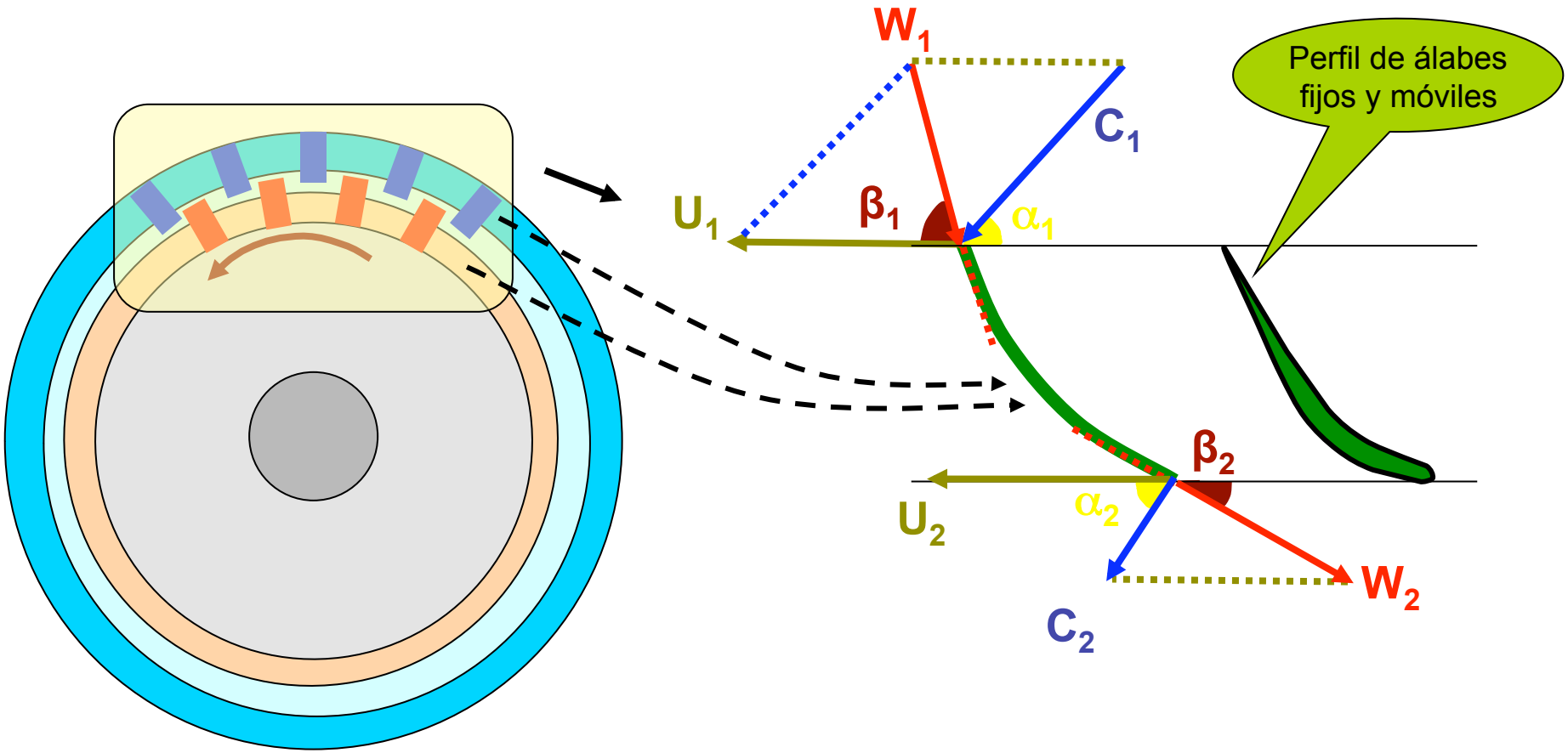
Máquina Axial:



Compresor

http://www.dav.sceu.frba.utn.edu.ar/homovidens/cmem_generico/coronel/eve_coronel_final/bombas_compresores.html



http://www.directindustry.es/prod/man-diesel-turbo/compresores-de-aire-axiales-19648-43111.html

Máquina Axial: