

Turbomáquinas



Autores: Profs. Antonio Lecuona y José Ignacio Nogueira,
Dpto. De Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid.

Referencia básica:

Turbomáquinas. Procesos, análisis y tecnología. A. Lecuona y J. I. Nogueira,
2000. Editorial Ariel.

Para ampliación:

The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines, 2nd ed. D. G.
Wilson, T. Korakianitis , 1998. Prentice Hall.

La información contenida en este documento sirve de propósito exclusivo como apuntes para alumnos en la enseñanza de la asignatura indicada y ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido. Por ello no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. En caso de detectar algún error, rogamos nos lo comuniquemos e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.

Capítulo 1: Introducción

Objetivos: Dar respuesta a las siguientes cuestiones

- ¿Qué es una turbomáquina?, definición.
- ¿Cuál es el principio físico de su funcionamiento?
- ¿Cómo es una turbomáquina?
- ¿Qué clases de ellas hay?
- ¿Dónde se aplican y para qué sirven?
- ¿Cómo reconocerlas?
- ¿Qué tamaño tienen?

Índice del capítulo. En las transparencias no se encontrará una división clara.

- Definición y clases
- Principios de funcionamiento
- Morfología y arquitectura de turbomáquinas por aplicaciones: en la industria y de turbomáquinas usadas combinadamente y generalmente asociadas a motores térmicos: la turbina de gas, la de vapor y la turboalimentación.

Capítulo 1: Introducción

Objetivos: Dar respuesta a las siguientes cuestiones

¿Qué es una turbomáquina?, definición.

¿Cuál es el principio físico de su funcionamiento?

Conceptos:

- La turbomáquina como una fuerza tangencial F_{θ} ejercida por el flujo (f_l) sobre los álabes del rotor (f_l/ro) por la velocidad angular de un rotor.
- El álabe como elemento básico. El perfil aerodinámico.
- La turbomáquina como dispositivo que produce un salto de presión en el flujo.

Introducción a las turbomáquinas

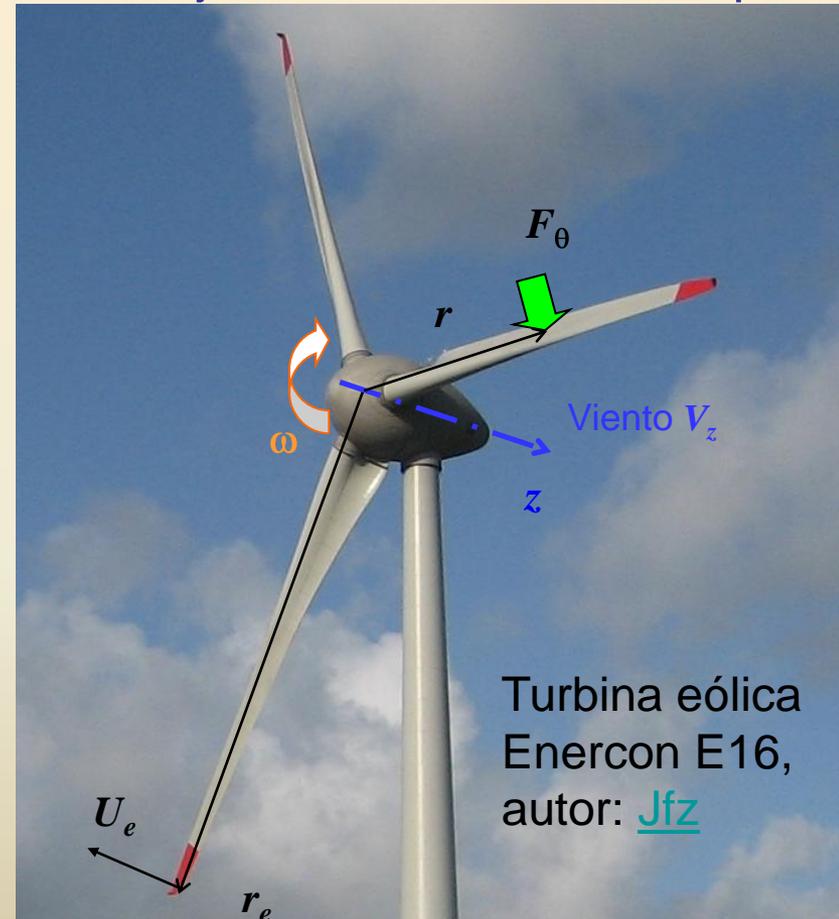
- Definición. Son **máquinas de flujo** en las que existe comunicación continua entre la entrada y la salida de fluido. La cesión de potencia mecánica al exterior W_{ex} se logra por medio de un eje al que va adosada una pieza de forma adecuada, denominada *rotor*. Si el fluido ejerce sobre el rotor un par $C_{fl/ro}$ según el giro:

$$W_{ex} = C_{fl/ro} \omega$$
$$\omega = 2\pi n$$

- Este par es causado por fuerzas del fluido sobre el álabe con componente tangencial:

$$C_{fl/ro} = \sum_{r_i}^{r_e} F_{\theta} r$$

- Generalmente hacen uso de las **fuerzas de inercia en el fluido** por lo que se denominan *máquinas rotodinámicas*.
- Hacen uso de las *fuerzas de presión*, que se aplican perpendicularmente a la superficie. Por lo que los álabes han de tener superficies con cierta orientación tangencial.



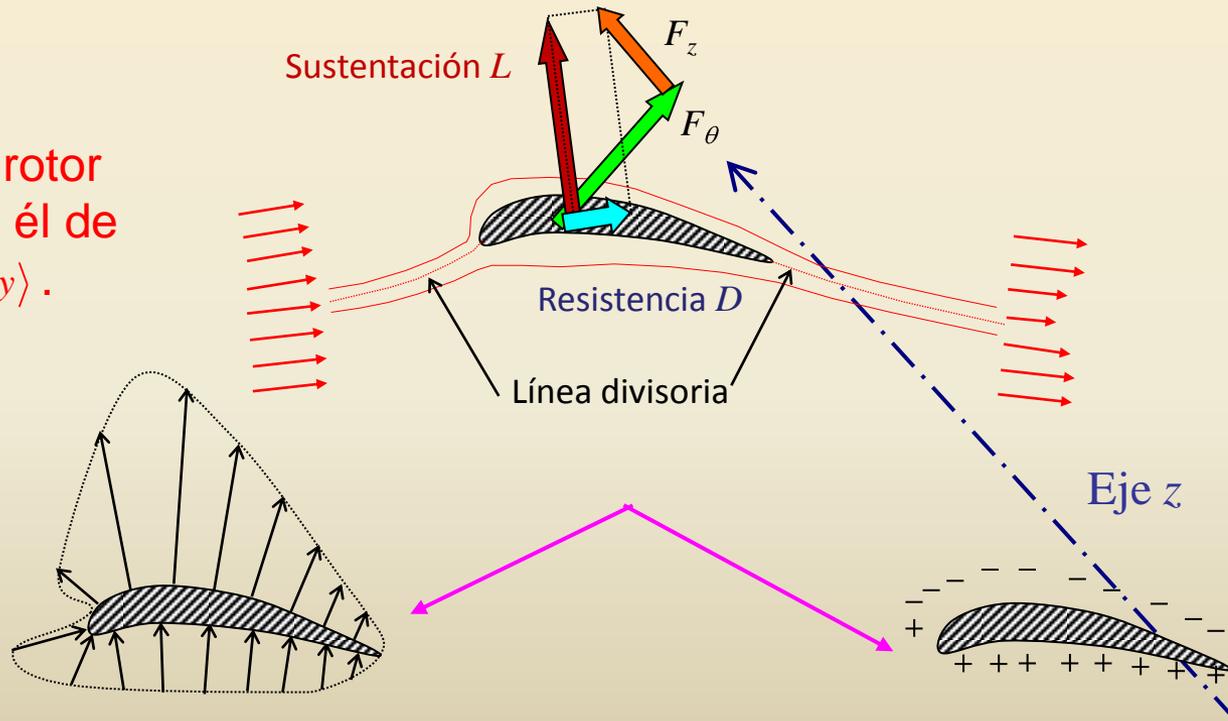
Turbina eólica Enercon E16, autor: [Jfz](#)

Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/E_126_Georgsfeld.JPG

Introducción a las turbomáquinas

- La resultante sobre los álabes (carga) se suele descomponer en dos componentes: Sustentación L y resistencia D aerodinámicas. Generalmente $L \gg D$.
- L es perpendicular a la corriente media y D es paralela.
- También se puede descomponer en una fuerza axial F_z y otra tangencial F_θ .
- Si tomamos una rebanada de superficie $r = \text{cte}$. obtenemos el perfil del álabe.

La corriente incidente a un rotor es la relativa a él de velocidad $W(x, y)$.



Dos maneras de visualizar la distribución de presiones sobre la superficie.

Capítulo 1. Objetivos: Dar respuesta a las siguientes cuestiones

¿Cuál es el principio físico de su funcionamiento?

- Los álabes del rotor, al girar sienten una corriente incidente (que indicaremos con color rojo) que es la composición del flujo incidente (que indicaremos en color azul) y de la velocidad de giro (que indicaremos en negro).
- Este flujo relativo interacciona con el álabe, el cual cambia la dirección media del flujo (**acción**).
- La **reacción**, igual y contraria, es una fuerza sobre el álabe F . Esta fuerza se debe primordialmente a la distribución de la presión sobre su superficie, aunque la fricción cuenta también.
- Este cambio de dirección se debe a la orientación del álabe con respecto a la corriente incidente.
- Si se desprecian los efectos de la viscosidad la presión sobre la superficie del álabe se puede estimar ...

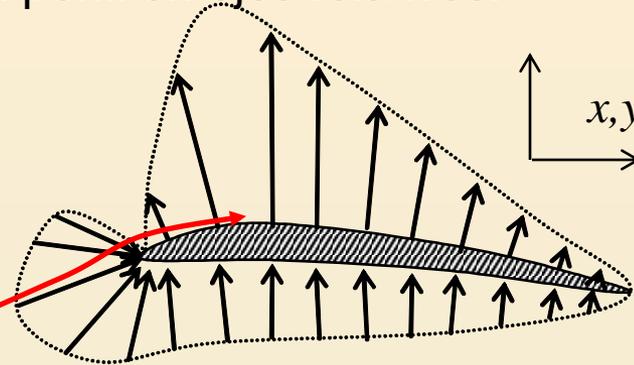
Introducción a las turbomáquinas

- Si aplicamos la ecuación de Bernoulli al campo fluido incompresible y estacionario 2D ideal alrededor de un perfil en ejes relativos:

(1.1)

$$P\langle x, y \rangle + \frac{1}{2} \rho W^2 \langle x, y \rangle = \text{cte.}$$

Trayectoria

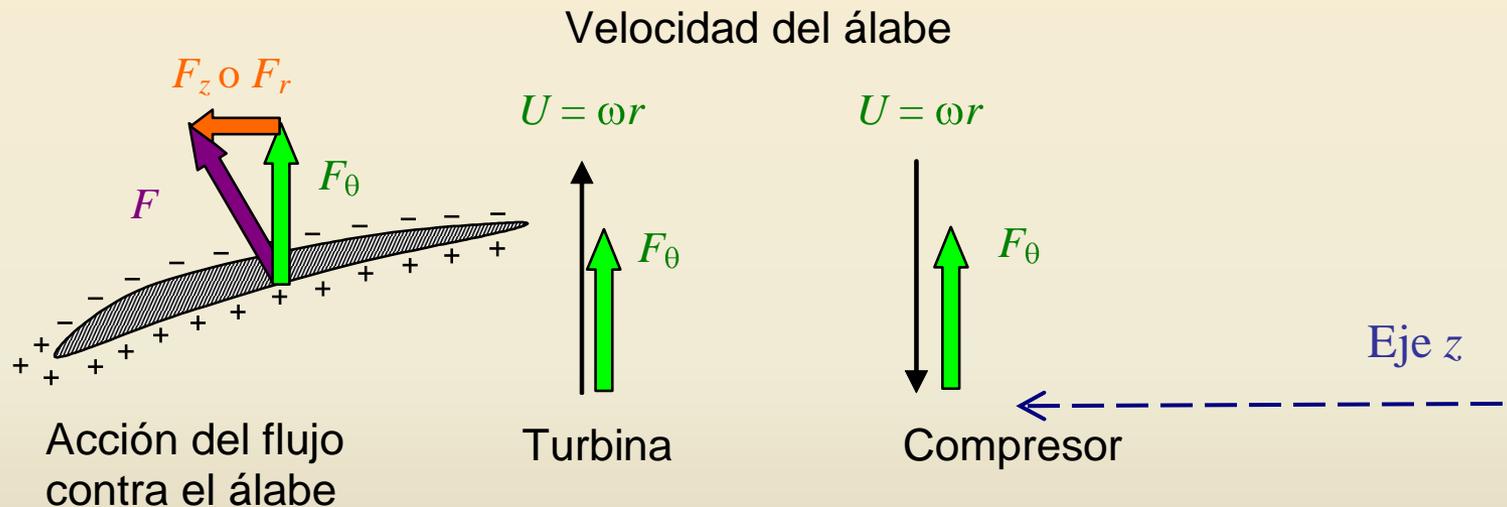


La aplicabilidad de la ecuación de Bernoulli se explica en el [cap. 3](#), si bien en la [transpa. 24 del cap 2](#) se introduce.

- P es la presión, llamada estática. W es la velocidad alrededor del perfil y ρ es la densidad, constante, del fluido.
- $P_{-\infty}$ y $W_{-\infty}$ son la presión y velocidad corriente arriba, cuando la presencia del perfil es inapreciable. Luego en la [ec. \(1.1\)](#) : $\text{cte.} = P_{-\infty} + \rho W_{-\infty}^2 / 2$ (1.2)
- La consecuencia es que al aumentar la velocidad en la superficie, la presión cae, luego las zonas de succión del perfil (flechas salientes de su superficie o signo -) ésta será grande porque el perfil logra aumentar mucho la velocidad en esa zona.
- Las zonas de sobrepresión se deben a que el perfil remansa la corriente en ellas.
- Para cuantificar este efecto se define el **coeficiente de presión**: $C_p = \frac{P - P_{-\infty}}{\rho W_{-\infty}^2 / 2} = 1 - \left(\frac{W}{W_{-\infty}} \right)^2$
- Donde hay **succión** $C_p < 0$ y donde hay **sobrepresión** $C_p > 0$. En el punto del morro del perfil (borde de entrada) donde el fluido se detiene al chocar contra él, es $W = 0 \Rightarrow C_p = 1$.
- Los mínimos y máximos de C_p se alcanzan en la superficie del álabe. Lejos de él decae C_p .

Introducción a las turbomáquinas

- El resultado de las fuerzas sobre el perfil es una fuerza $\vec{F} = \vec{L} + \vec{D}$. Generalmente $D \ll L$, con lo que nos interesa primordialmente la componente según θ de L .
- Como en los perfiles L aproximadamente es perpendicular a la línea que une borde de entrada con borde de salida, la orientación y el movimiento del álabe determina si F_θ va en la dirección del movimiento (turbina) extrayendo trabajo de la corriente o en dirección contraria (compresor) aportándolo.



- Suele convenir combinar el **rotor** con 1 o incluso 2 **estatores** (uno delante y uno detrás del rotor), que son coronas de álabe estacionarios, para constituir un **escalón**.

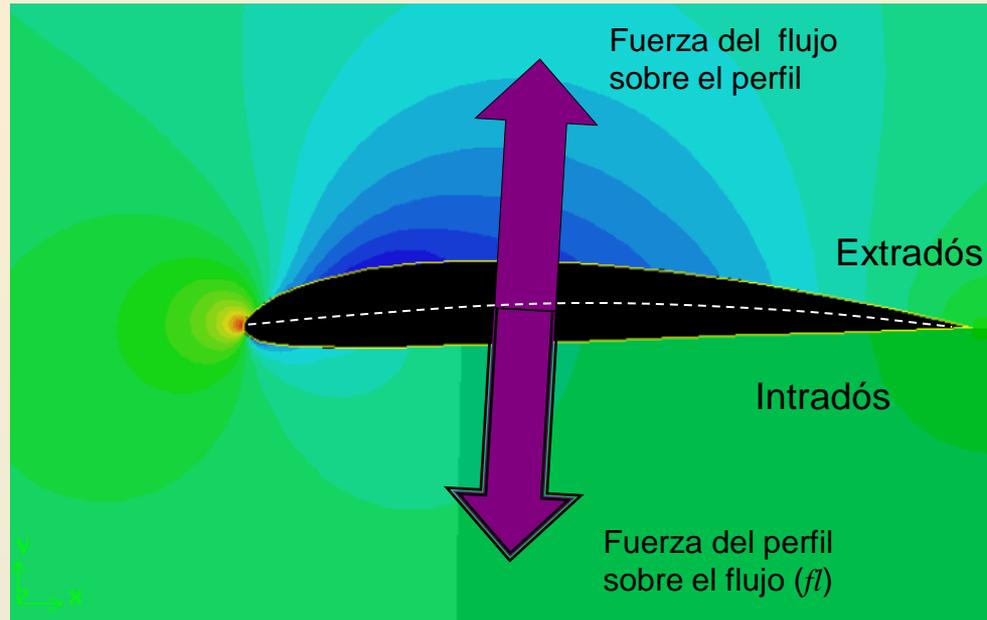
Introducción a las turbomáquinas

- Para obtener sustentación es necesario *deflectar* la corriente; esto es, cambiarla de dirección. Esta deflexión se traduce en una succión en el **extradós** del perfil y una sobrepresión en el **intradós**, ya vistas con flechas y signos + y -.

$C_p < 0$ azul

$C_p > 0$ amarillo

$C_p = 1$ rojo



El borde de salida afilado marca la dirección del flujo



- La corriente ha de entrar con poca **incidencia**, que es el ángulo de la corriente con respecto a la **línea media** del perfil en su borde de entrada (indicada con líneas de trazo).
- Tras el álabe queda una capa con defecto de cantidad de movimiento, denominada *estela*, resultado del efecto de la viscosidad en capas *límite*, que rodean el cuerpo.
- La dirección de la corriente es aproximadamente la tangente a la **línea media** en el borde de salida, aunque algo inclinada hacia el extradós.

Actividad 1.1: Teniendo en cuenta que se hace uso de las fuerzas de inercia ¿De que parámetros del flujo y geométricos depende la fuerza sobre el álabe F ? ¿Cómo? Sugerencia: hacer uso de la ecuación de Bernouilli.

Capítulo 1. Objetivos: Dar respuesta a las siguientes cuestiones

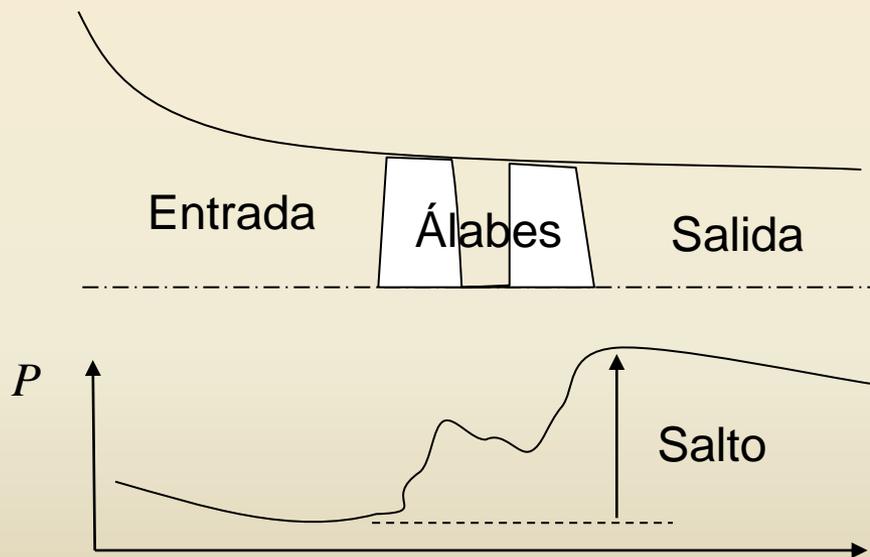
¿Cómo es una turbomáquina?

¿Cómo reconocerla?

- Las turbomáquinas pueden estar encerradas en un tubo (**cerradas**) o ser **abiertas**.
- Las diferencias entre ambas no son sustanciales, aunque las cerradas tienen la posibilidad de ser más eficientes.
- Todas provocan un salto de presión entre la entrada y la salida, salvo casos excepcionales (p. e. turbina Pelton).
- Al rotor le suele acompañar al menos un estator para formar un conjunto que produce un salto de presión, llamado **escalón**.

Introducción a las turbomáquinas

- Característica fundamental: una turbomáquina básica compuesta de rotor, o rotor + estator (escalón), provoca un salto de presión en el flujo entre entrada y salida sin que cambie la velocidad, luego no es a costa de la en. cinética del flujo sino del par en el eje.
- El que esto sea posible depende de la configuración de los álabes.



El **aumento de presión ΔP** es con **aporte de potencia** y la **disminución** es con **extracción**.

Los álabes tienen una cara de succión y una de sobrepresión, su orientación determinará si el salto es positivo o negativo (esto se podrá ver en detalle en la práctica de arquitectura de turbomáquinas). Si sus caras de succión se orientan corriente arriba y las de sobrepresión se orientan corriente abajo, se trata de un compresor, al sumarse la acción de todos los álabes.

$1 < \pi = \text{Relación de presiones} = \text{Presión a la salida} / \text{presión a la entrada. o al revés si es turbina}$

Introducción a las turbomáquinas

- Estando establecido que el par se obtiene por diferencias de presión entre intradós y extradós, es razonable pensar que la diferencia de presión entre la cara orientada corriente arriba y la cara corriente abajo de una corona de álabes se deba a la suma de las acciones de todos ellos, promediándose su efectos al alejarnos.
- Así, los compresores tienen sus álabes orientados de tal manera que la cara de succión mira corriente arriba y la de sobrepresión mira corriente abajo, siendo lo contrario en las turbinas.
- Otra visión de lo mismo es que la carga originada por la diferencia de presión a través de la corona de álabes se reparte entre ellos. Así, si la diferencia de presión es pequeña, se podrán instalar pocos álabes, pues bastarán pocos para soportarla, ejemplo: turbina eólica.
- Hay turbomáquinas que no engendran diferencia de presión en el rotor; se les llama “de impulso” y se estudian en el **Capítulo 2**. Tienen los álabes con la parte de succión mirando en dirección tangencial. Pero hay un salto de presión en el estator.
- La carga que soporta el álabe está limitada y especialmente lo está en compresores, pues el fluido se encontrará con que a la salida se tiene más presión que a la entrada, tratando por ello el fluido de invertir su movimiento, simplemente por reacción a esta fuerza. Solo el manejo adecuado de la inercia del fluido consigue evitar esto. Las zonas donde la inercia sea menor, que son aquellas donde la velocidad ha disminuido por efecto de la fricción con el álabe, son las más proclives a la detención del flujo. La aglomeración de fluido resultante de ello ocasiona el fenómeno de la **separación del flujo y entrada en pérdida**.

Capítulo 1. Objetivos: Dar respuesta a las siguientes cuestiones

¿Cómo es una turbomáquina?

¿Cómo reconocerla?

¿Dónde se aplican y para qué sirven?

- Las turbomáquinas forman parte de los motores térmicos más habituales.
- El ciclo Brayton generalmente se implementa con un turbocompresor y una turbina de potencia para formar una turbina de gas o llamada también turbina de combustión.
- En una turbina de gas se consume combustible y aire y se obtiene potencia en un eje.
- Cuando el flujo es paralelo al eje, las turbomáquinas se denominan axiales.
- Indicaremos con azul las velocidades absolutas, con rojo las relativas y con negro la de arrastre, siempre tangencial $U = \omega r$.

Introducción a las turbomáquinas

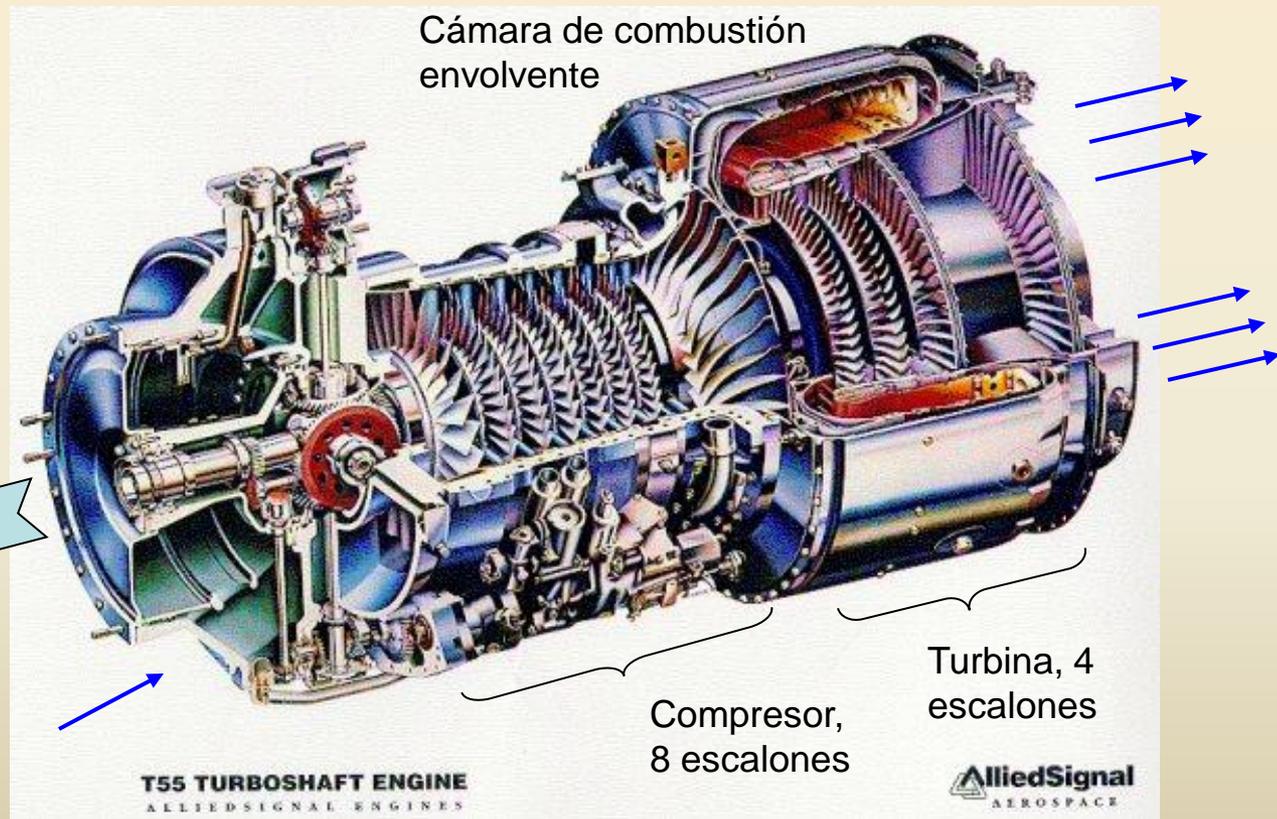
El salto de presión de una corona de álabes puede resultar insuficiente, por lo que se colocan en serie las turbomáquinas, formando n escalones.

P. e. numerosos escalones en un *turbosje* de helicóptero c. u. de ellos formado por rotor y estator (etapas) Fuente, <http://www.enginehistory.org/Gallery/KCollenge/T-55-L-712.JPG>:

$$\Delta P = \sum_1^n \Delta P_i$$

Potencia neta

W_{ex}



Un turbosje es una turbina de gas para aviación, de muy ligera construcción.

Introducción a las turbomáquinas

Capítulo 1. Objetivos: Dar respuesta a las siguientes cuestiones

¿Qué clases de ellas hay?

¿Dónde se aplican y para qué sirven?

¿Cómo reconocerlas?

¿Qué tamaño tienen?

NOTAS:

Se indican los escalones con números romanos desde la entrada.

Un escalón puede contener una o varias etapas de turbomáquina.

Introducción a las turbomáquinas

- Solo puede obtenerse una elevada eficiencia agregando un **estator** o corona de álabes estática al rotor. Se verá a lo largo de la asignatura
- Las turbomáquinas que obtienen una potencia al eje se denominan *motoras* o *turbinas*.
- Las que la absorben se denominan *generadoras*: *turbocompresores*, *ventiladores* y *turbobombas*.
- Pueden ser *reversibles*. Esto es, una bomba se puede convertir en una turbina hidráulica con pequeños cambios.
- Las que solo transmiten par se denominan transmisoras, p. e. *convertidor de par* de las cajas de cambio automáticas de los automóviles: p. e. http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_de_par
- Hay turbomáquinas cuya geometría es variable, para adaptarse al flujo incidente. Po ejemplo, las turbinas eólicas tienen paso variable.

Introducción a las turbomáquinas

- Cuando la variación de densidad del fluido es diminuta se denominan “*de flujo incompresible*”.
- Cuando la variación es apreciable se denominan *de flujo compresible o térmicas*.
- La termodinámica nos dice que el flujo será apreciablemente compresible cuando $M > \sim 0,6$.

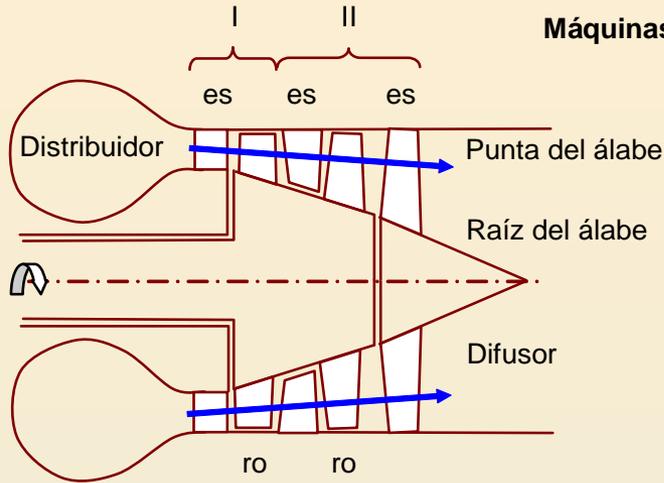
$$M = \frac{\text{Velocidad del fluido}}{\text{Velocidad del sonido}}$$

- Hay turbocompresores en los que M llega a valer 1,4.
- ¡La presión causada por cada álabe se homogeniza inmediatamente corriente arriba y corriente debajo de las coronas de álabes!. Un experimento de la vida cotidiana sirve para comprobar esto, basta con situarse en la corriente creada por un ventilador. No se nota el paso de cada álabe.

Ejemplos:

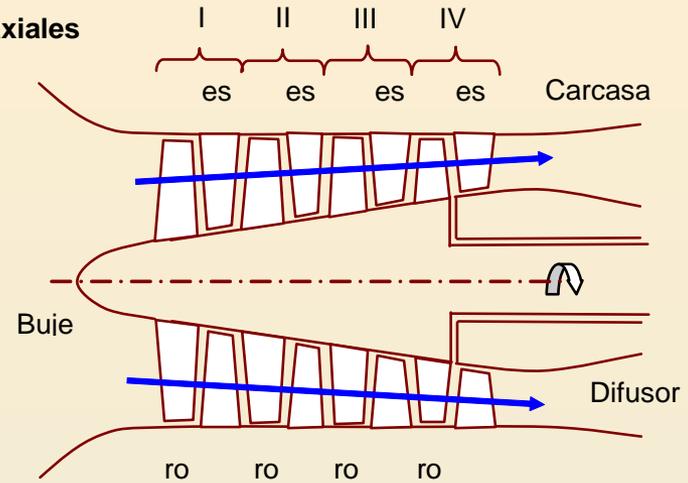
- <http://www.turbostream-cfd.com/>
- [CERFLOW](#)

Introducción a las turbomáquinas: cortes meridianos $\theta = \text{cte.}$



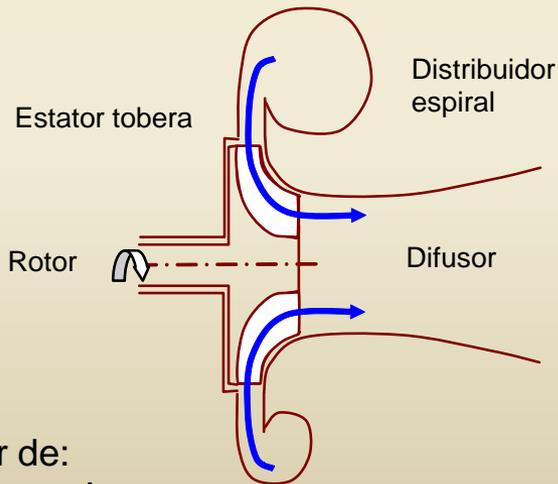
Turbina

Máquinas axiales

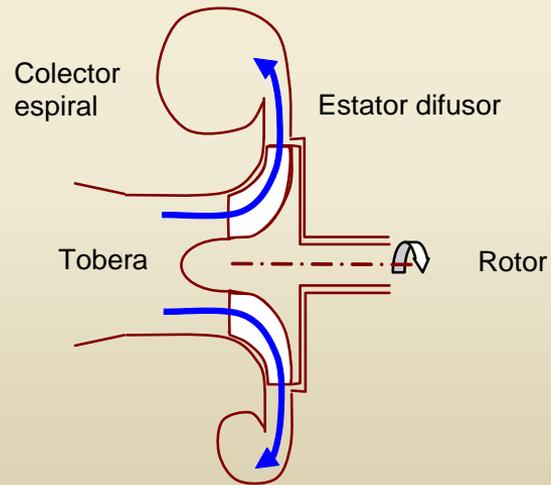


Compresor

Máquinas radiales-mixtas



Turbina



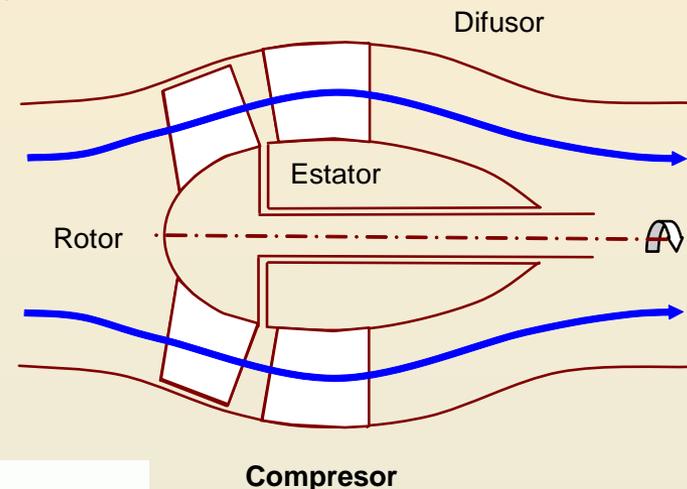
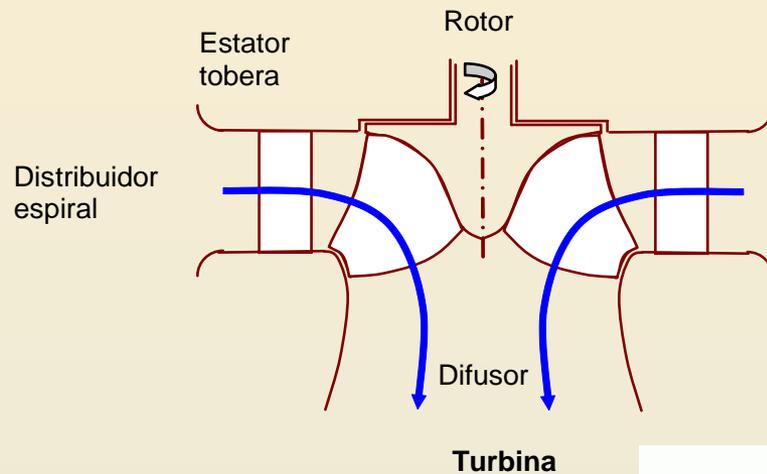
Compresor

Elaborado a partir de:
Turbomáquinas. Lecuona A. y
Nogueira J. I., 2000, Ed. Ariel.

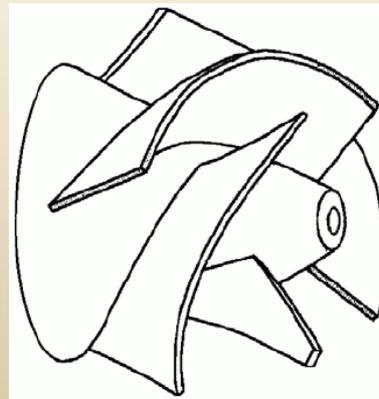
Introducción a las turbomáquinas

- Las ventajas e inconvenientes de las axiales y las radiales son compartidas por las **mixtas**.
- Son de geometría altamente 3D, por lo que suelen resultar costosas de fabricar.

Máquinas diagonales y/o mixtas



Actividad 1.2: En una turbomáquina real o en un dibujo de ella medir el área de salida y de entrada y ver si cambia y anticipar porqué.

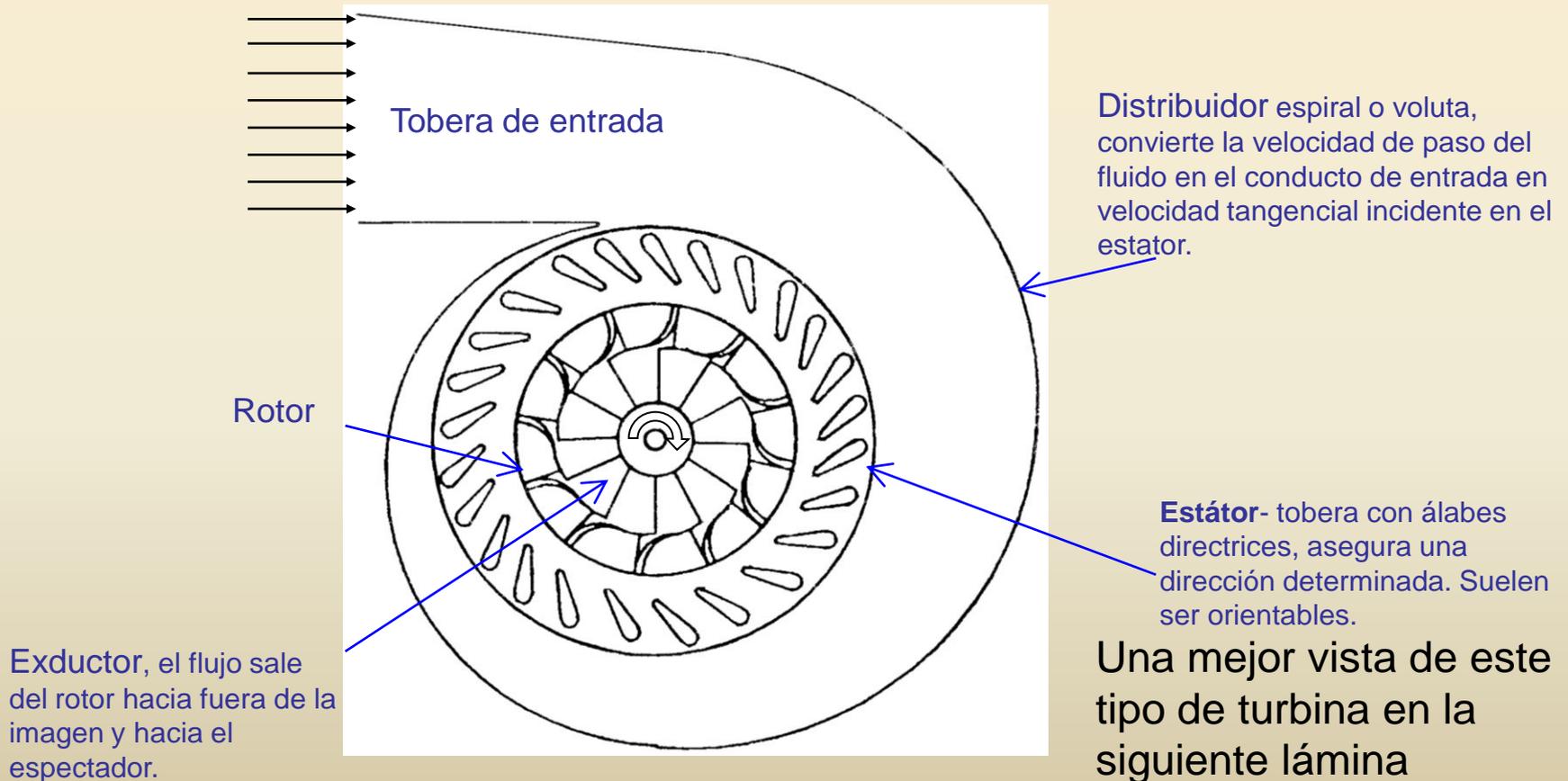


Elaborado a partir de:
Turbomáquinas. Lecuona A. y
Nogueira J. I., 2000, Ed. Ariel

Rotor de bomba
diagonal centrífuga

Introducción a las turbomáquinas: corte $z = \text{cte}$.

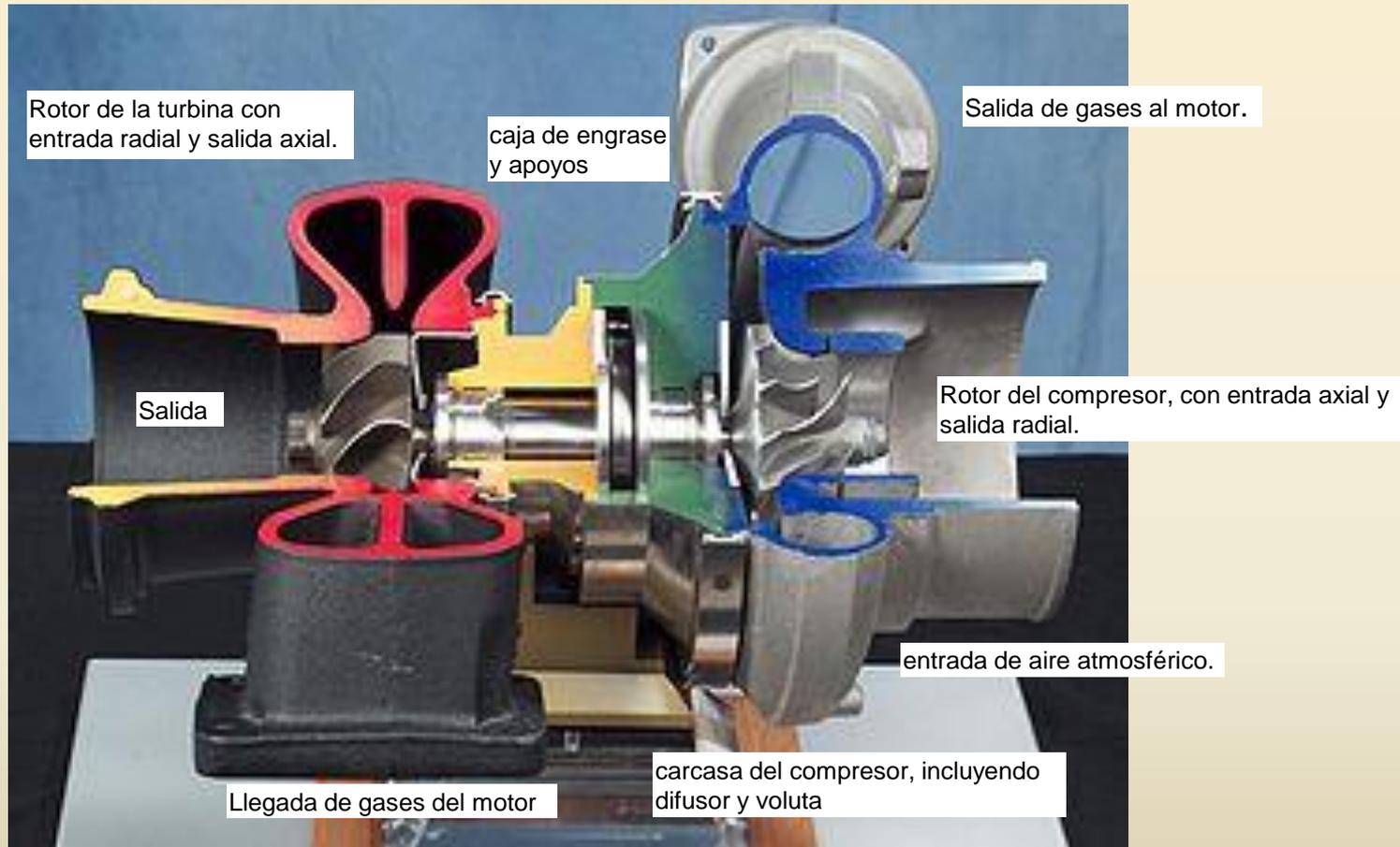
- Una turbina centrípeta de tipo mixto, como las que dotan a los turbocompresores de turbo-alimentación de motores alternativos, vista del plano z - r . Entrada al rotor radial y salida axial.



Fuente: Turbomáquinas Térmicas M. Muñoz, M. Valdés, M. Muñoz 2001, p.418. ISBN 84-7484-143-7

Introducción a las turbomáquinas

Grupo turbocompresor (turbina centrípeta-mixta unida a un compresor centrífugo-mixto)



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Turbocompresor>

Introducción a las turbomáquinas: admisión parcial.



Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Generaci3n_de_electricidad

Ejemplo de rotor de turbina Pelton mostrando la flecha la direcci3n del chorro de agua. Es de admisi3n parcial de forma natural, al no recibir caudal de forma homog3nea en toda la periferia.

Introducción a las turbomáquinas

- Hay turbomáquinas que no están encerradas en un conducto, llamadas *abiertas*. P. e. *hélices de avión*.

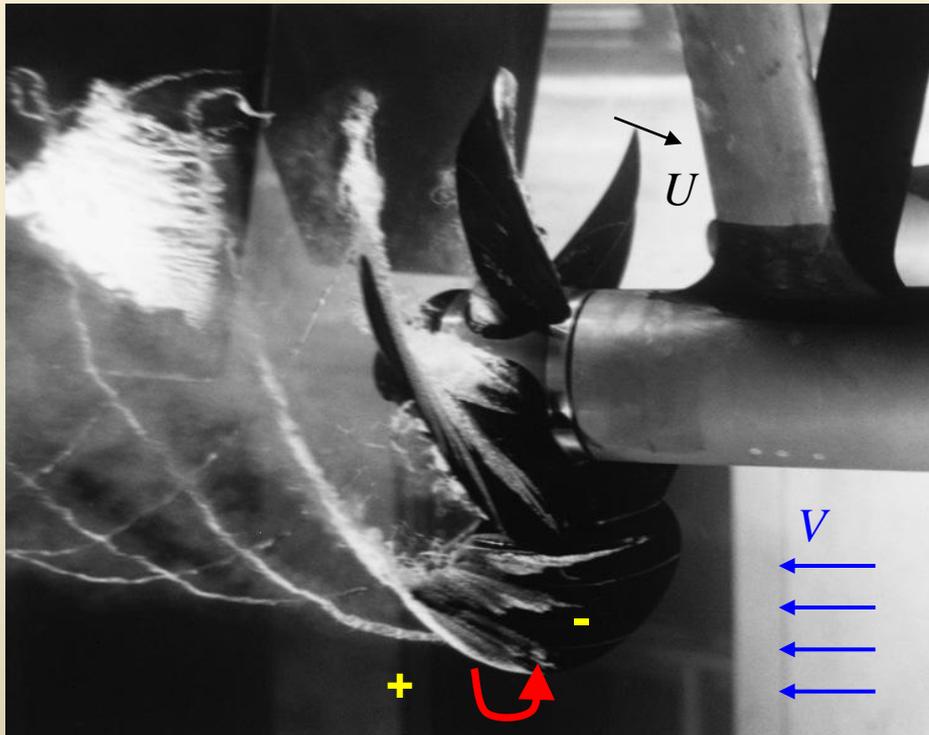
Fuente: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/Hercules.propeller.arp.jpg>



En ellas existe un conducto virtual que no es de forma fija, formado por la superficie divisoria entre el caudal que pasa por la turbomáquina y el exterior. Solamente el que pasa a través de ella sufre su acción. Dan menos rendimiento al carecer de estator y además, al ser abiertas existen fugas de intradós a extradós en la punta de los álabes (véase la siguiente transparencia).

Introducción a las turbomáquinas

- Ejemplo de turbomáquina abierta, *hélice de barco*. En este caso está cavitando ligeramente, por lo que de las puntas de los álabes se desprenden hilos de vapor, habida cuenta de que se forman torbellinos que crean succión en su centro de giro, capaz de hacer hervir el líquido a temperatura ambiente.
- Son del más pequeño diámetro posible por falta de espacio (aumenta el calado del buque). La **robustez** se prima poniendo pocos álabes de cuerda ancha.



Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cavitating-prop.jpg>

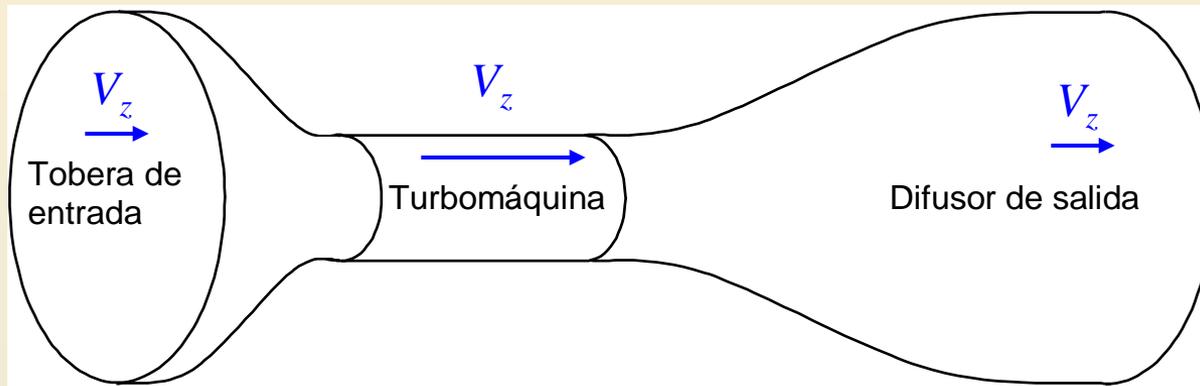


Fuente:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Ship-propeller.jpg>

Introducción a las turbomáquinas

- Debido a que suele hacer falta una velocidad de giro U importante para producir el efecto deseado, la velocidad axial V_z se necesita que sea alta. El flujo corriente arriba suele ser a velocidad moderada. Por ello se suele provocar una aceleración en la corriente axial a través de la turbomáquina, estrechando el flujo en la turbomáquinas cerradas con una **tobera**.



- Se restaura la velocidad original con un **difusor** a la salida, que es un aumento muy suavemente progresivo ($< 10^\circ$) del área de paso.

Actividad 1.3 : Aplicando ecuaciones de conservación a un VC en un conducto 1D deducir qué hace que el fluido se acelere o decelere.

Introducción a las turbomáquinas

- Un escalón está compuesto por hasta 3 etapas.
 - **Estator** de entrada (llamada etapa de álabes-guía en compresores)
 - **Rotor**, intercambia potencia
 - **Estator** tras el rotor.
- 1. En turbinas:
 - El estator antecede al rotor y sirve para acelerar la corriente y deflecartarla.
 - En turbinas hidráulicas sirve también de control del caudal.
 - Puede haber un estator tras el rotor para eliminar el giro remanente de la corriente saliente al exterior (último escalón).
- 2. En compresores:
 - Los álabes guía se usan para modular la potencia del rotor.
 - El estator (tras el rotor) sirve para enderezar la corriente, es decir, quitar el giro de la misma a la vez que hace de difusor.
 - Si el giro de la corriente es pequeño (ventiladores axiales) se ahorra coste eliminando el estator.
 - Los compresores centrífugos pueden no tener estator con álabes, sino diáfano, y la voluta que forma puede hacer de estator.

La forma de operar cada etapa se verá más adelante.

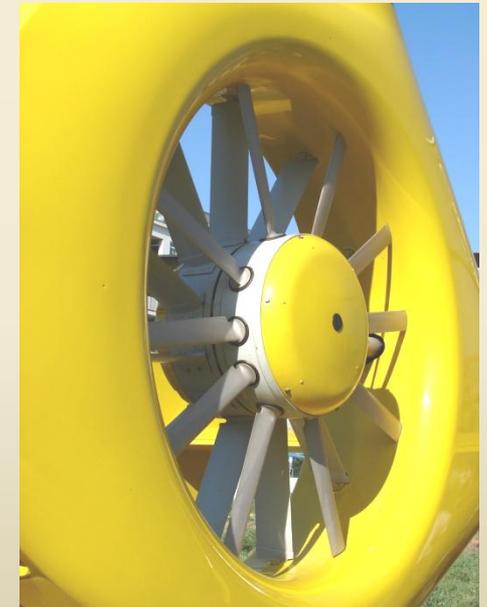
- ¿Dónde se aplican y para qué sirven?
 - **Actuando solas:** ventiladores, bombas, turbinas hidráulicas ... en lo que denominaremos **industria**.
 - **Actuando combinadamente:** turbina de gas y turbina de vapor, turbocompresor de sobrealimentación, generalmente para producir **potencia mecánica o eléctrica en configuración de motor térmico**.

Aplicaciones de las turbomáquinas en la industria, ventiladores axiales



↓ Rotor anti-par de un helicóptero, tipo cerrado, llamado “fenestron”. En primer plano el rotor y tras él, el estator. Fuente:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Turbine_%28198949702%29.jpg



↑ Ventilador del tunel de viento del Langley Research Center de la NASA. Rotor en primer plano y estator detrás, ambos de madera. Fuente:

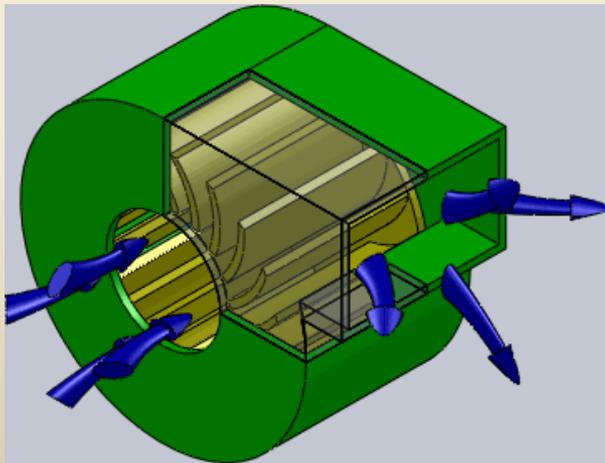
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Man_examining_fan_of_Langley_Research_Center_16_foot_transonic_wind_tunnel.jpg

Aplicaciones de las turbomáquinas en la industria, ventiladores axiales



Ventilador industrial axial arrastrado directamente por un motor eléctrico de alterna. El estator tras el rotor no es visible.

Fuente: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Axialventilator.jpg&filetimestamp=20061213134101>

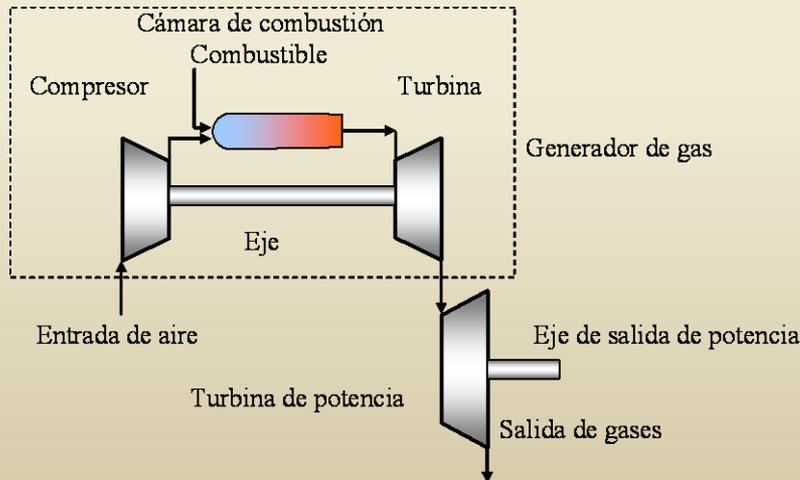
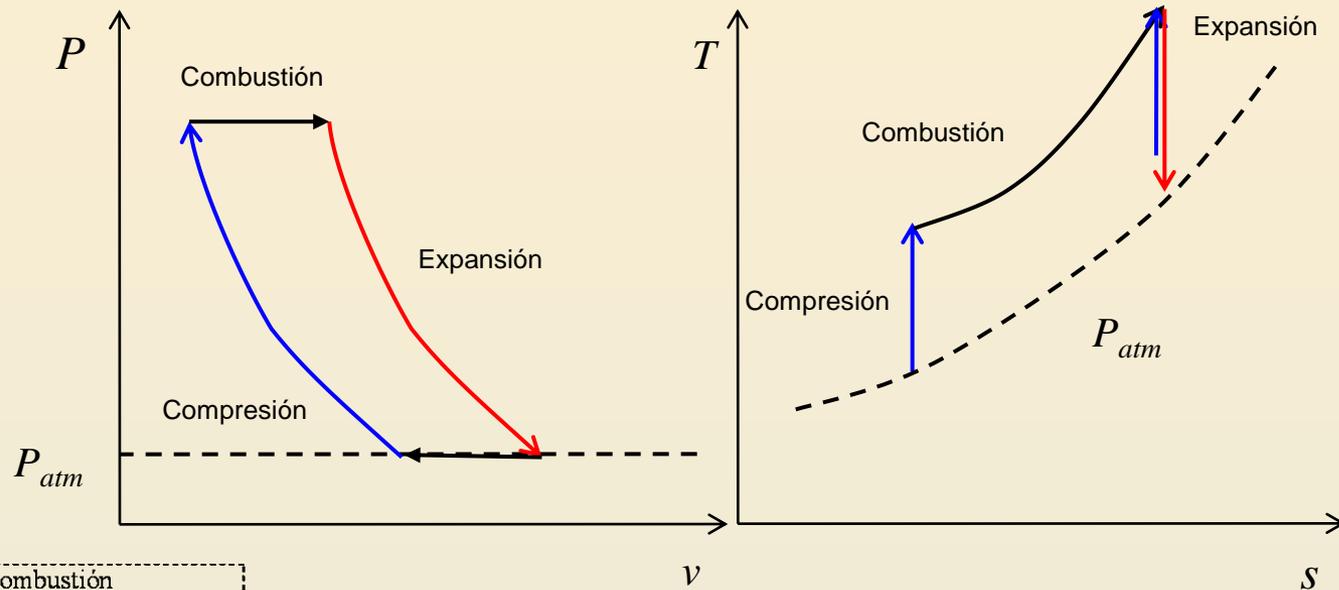


Esquema de un ventilador centrífugo industrial. El conducto con forma de caracol actúa de estator sin álabes.

Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Centrifugal_fan.gif

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Turbinas de gas.

• La turbina de gas. Ciclo Brayton simple.



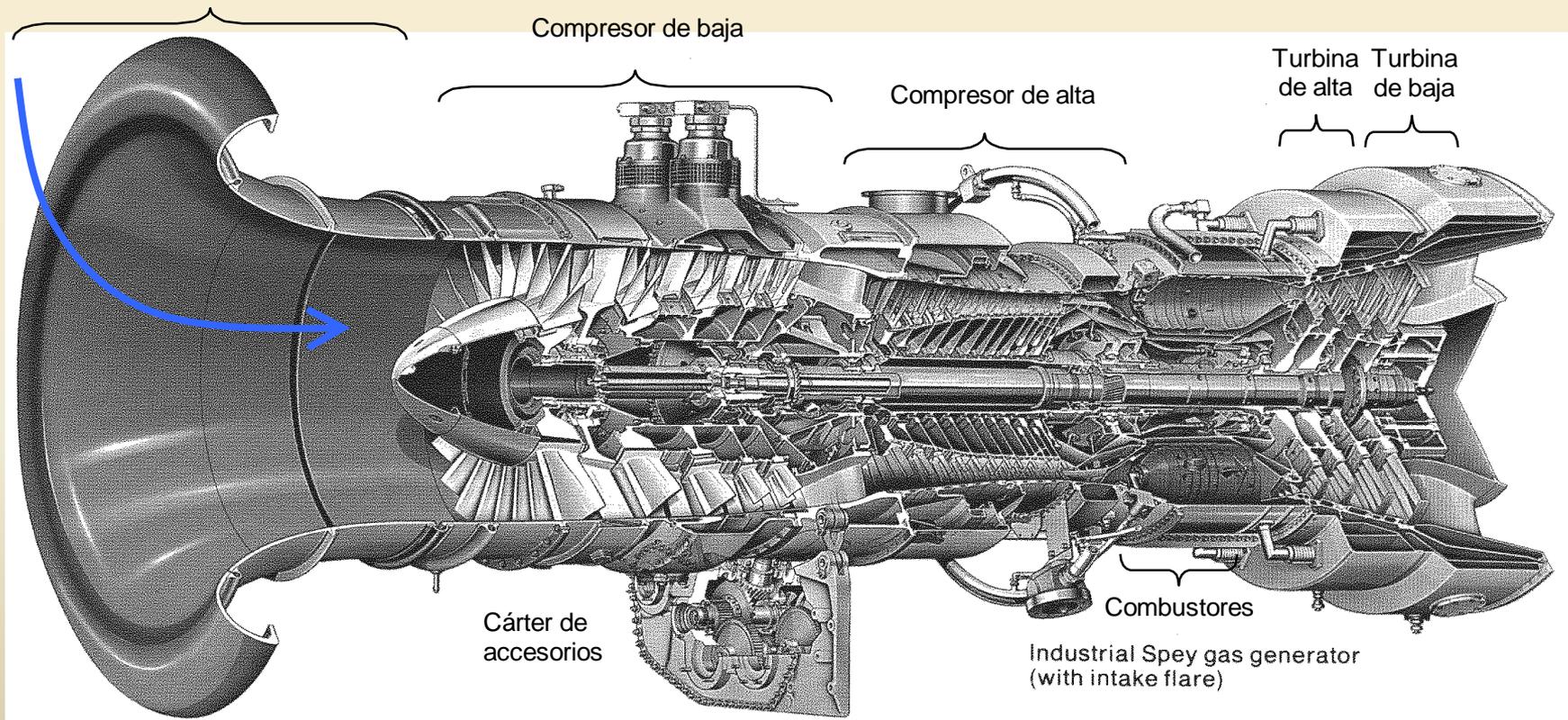
En el ciclo Brayton se alcanza:

- Temperatura máxima entre 900 °C y 1.400 °C.
- Presión máxima entre 4 bar y 45 bar.

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Turbinas de gas.

- Turbina industrial de gas Rolls Royce **aeroderivada**. Eficiencia hasta el 40% con ciclo simple (sin regenerador ni recalentamiento). Al disminuir el tamaño de las TG disminuye su eficiencia al disminuir el número de Reynolds. Más información en http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine#Aeroderivative_gas_turbines

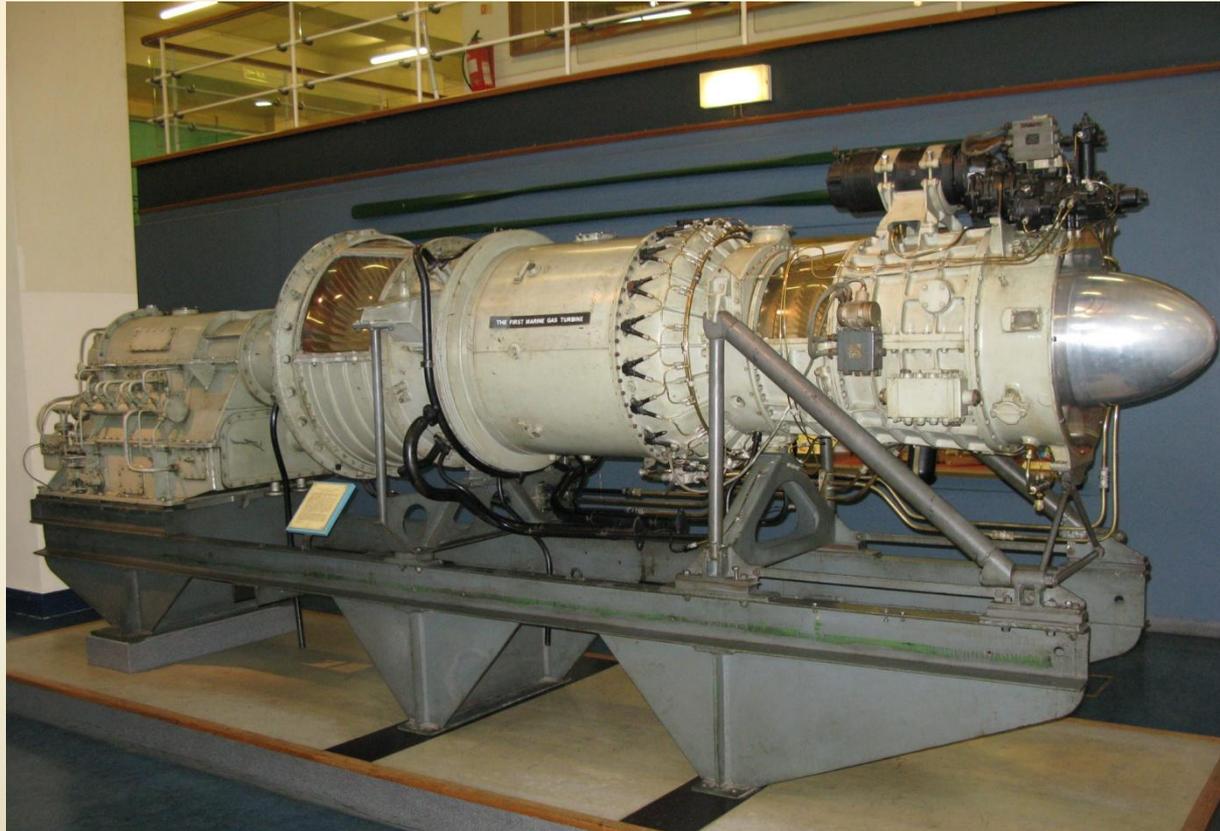
Tobera de entrada (*entry bell*)



Fuente: Por cortesía de Rolls-Royce PLC www.rolls-royce.com/

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Turbinas de gas.

- La primera turbina de gas en propulsar un navío, el MGB 2009, en 1947. Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gas_turbine_from_MGB_2009.jpg



Las turbinas de gas proporcionan una elevada potencia por unidad de peso y de volumen.

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Turbinas de gas.

- **Microturbinas de gas:** basadas en la tecnología de turbocompresores de sobrealimentación de motores y generador eléctrico directamente acoplado de velocidad variable. La frecuencia de la red se sintetiza (inversor). Electrónica de potencia muy elaborada. Usan ciclo Brayton regenerativo.

Capstone fabrica microturbinas para cogeneración de electricidad y agua caliente de 60 a 200 kW. Por ejemplo, la C60 CHP de 60 kW_e. Eficiencia eléctrica del 28% en ciclo regenerativo. Tiene un peso entre 800 y 1.200 kg. Incorpora recuperador de calor de los gases de escape. Revisiones cada 8.000 horas, 40.000 horas de vida de la parte rotatoria. 9 a 15 ppmv de NOx, de 150 ppmv de CO y de HC. Ausencia absoluta de lubricante y un eje mueve directamente el rotor del generador, sin reductor. Sistema de control completo incluyendo seguridades y protecciones, arranques, marcha automática en isla o en red, capacidad de monitorizado y control remoto. Posibilidad multi-combustible. www.capstoneturbine.com.

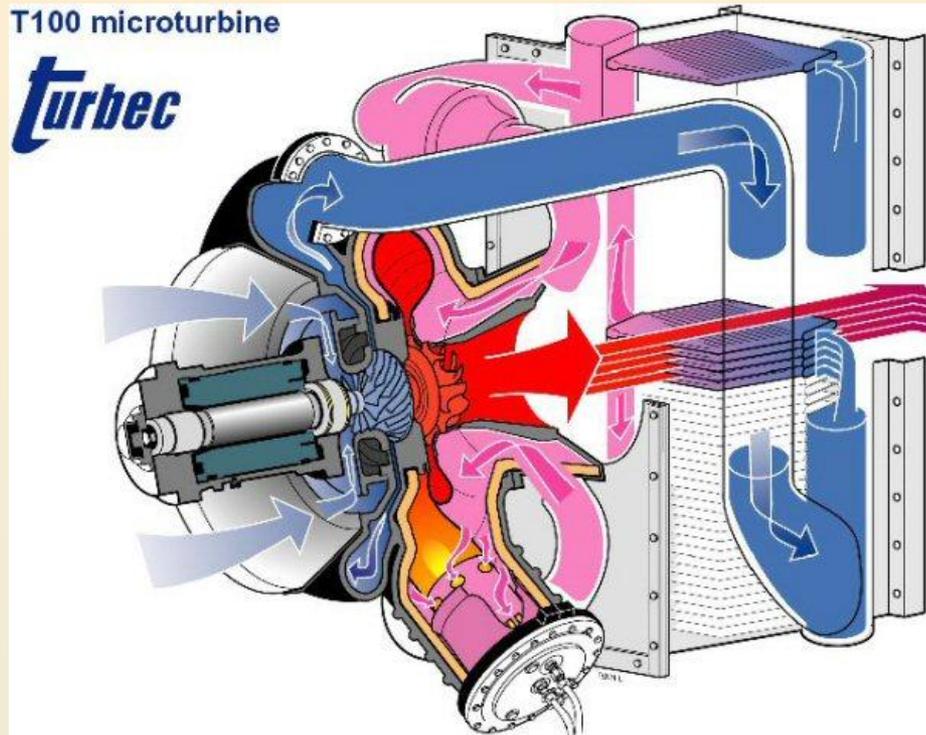
Las microturbinas se ofrecen como un sistema de generación eléctrica distribuida en esquema de cogeneración de pequeño tamaño para edificios. Ejemplo: http://www.mtt-eu.com/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=41.

Su capacidad multicomcombustible les permite aprovechar gases residuales, emanaciones y biogases, ejemplo: <http://www.dresser-rand.com/products/microturbines/>.

Unas de ellas usan un regenerador de calor de placas. Ejemplo: Microturbina comercial Turbec T100 de 100 kW_e. Destaca el gran tamaño del regenerador. Fuente: <http://www.turbec.com/>.

Otro ejemplo son las microturbinas de origen Elliott Energy Systems: <http://www.calnetix.com/microturbines.cfm>

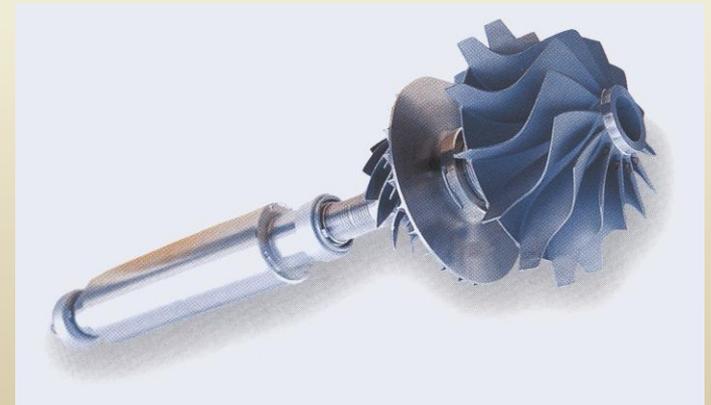
Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Turbinas de gas.



Microturbina comercial Turbec T100 de 100 kWe. Destaca el gran tamaño del regenerador. Fuente: <http://www.turbec.com/>

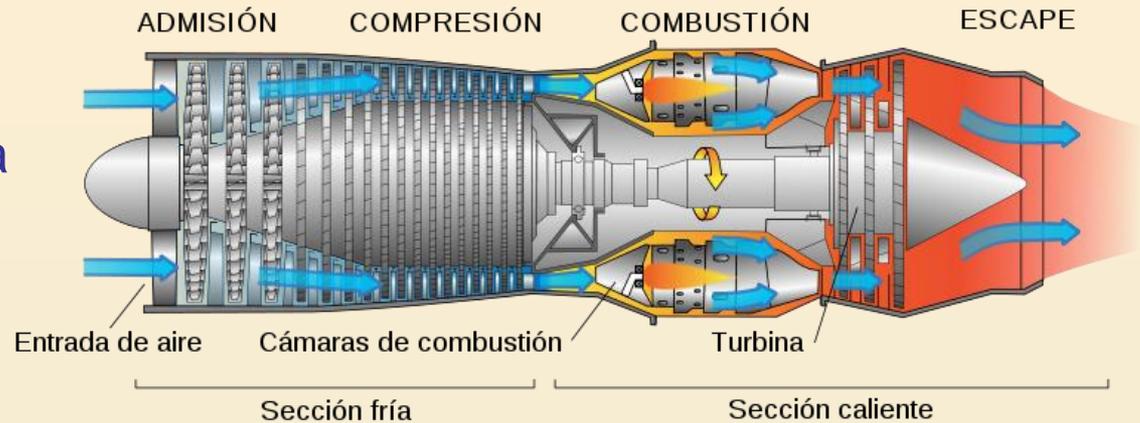
Rotor con imán permanente, fuente: <http://www.elliottmicroturbines.com>

Otro fabricante: <http://www.opra.nl/en/OPRA-WEB---Products---Products/How-the-turbine-works/>

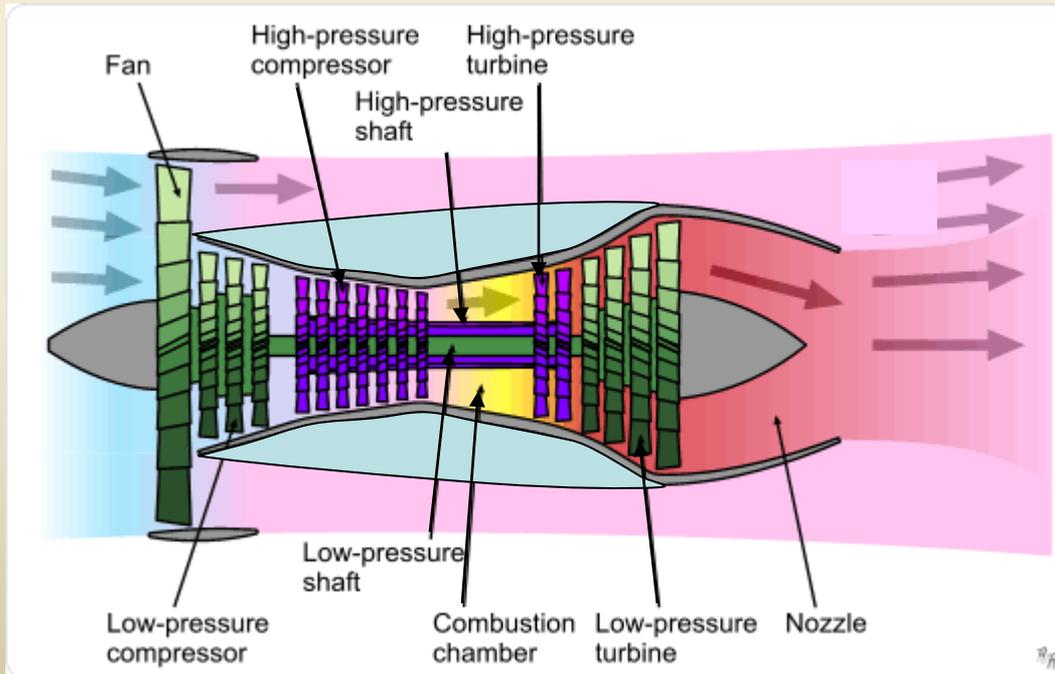


Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Aerorreactor.

- Turborreactor puro, toda la potencia remanente se usa para acelerar los gases de la combustión en una **tobera convergente**, para producir empuje.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_reacci%C3%B3n



- Turborreactor con derivación de aire frío o turbofán (menor velocidad en el chorro caliente y más masa en movimiento).

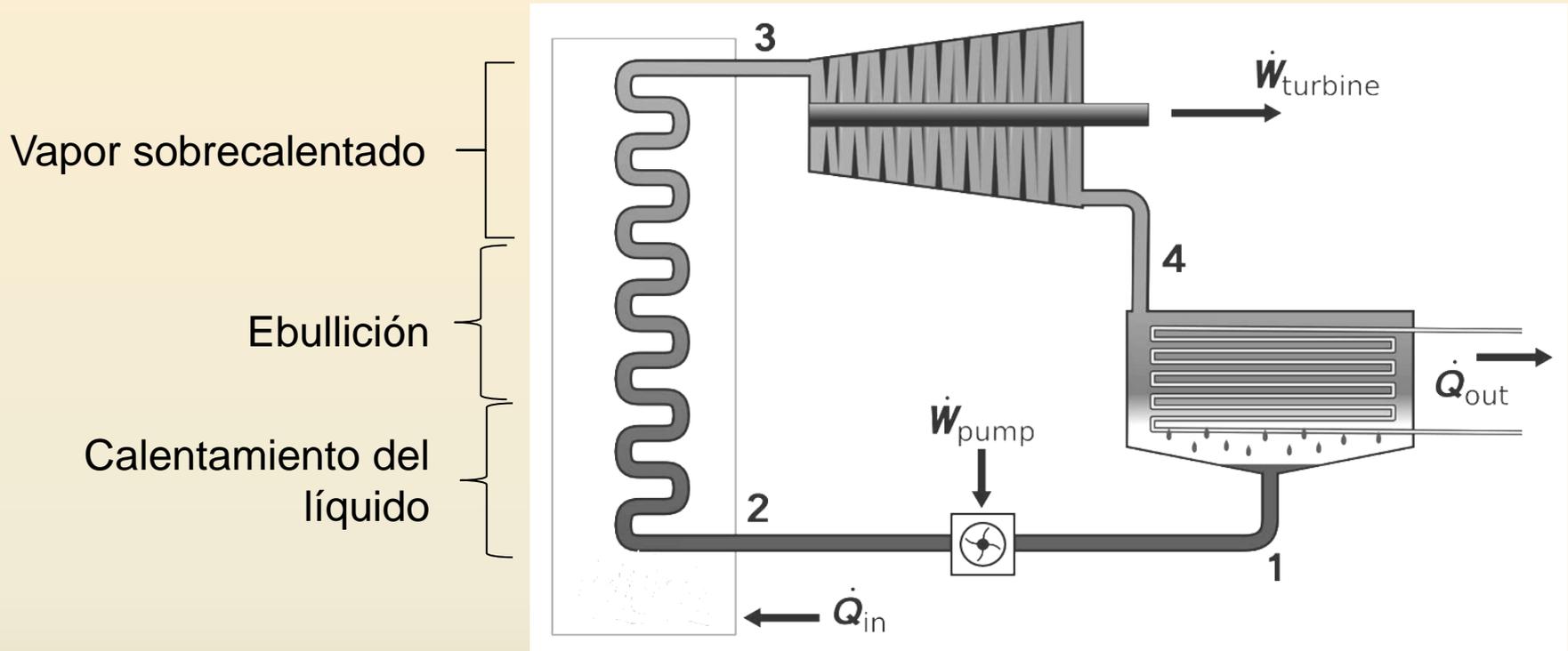
Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbofan>

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Ciclo Rankine.

- El vapor sobrecalentado (a temperatura superior a la de ebullición) saliente de la turbina se expande hasta que alcanza una temperatura ligeramente superior al sumidero térmico (la atmósfera o un río) que permita la condensación. Así se aprovecha al máximo el salto térmico.
- La presión de vapor saturado resultante es del orden de 0,01 atmósfera.
- Como la presión en caldera puede ser superior a 100 atmósferas, el salto de presión a través de la turbina resulta gigantesco. $100/0,01=10^4$
- Ello reclama numerosos escalones, que se suelen asociar en **grupos** (de alta, de media y de baja presión) a los que se les dota de diseños diferentes.
- El gran tamaño alcanzado (potencias de hasta 1 GW) origina una inercia térmica importante, que solo permite cambios de temperaturas muy lentos.
- El régimen de giro es fijo, por la frecuencia de la red eléctrica.
- La producción de electricidad se acopla a la demanda con la intensidad de la electricidad. Ésta viene determinada por el par de la turbina y éste viene determinado por el caudal que atraviesa la turbina. El caudal es regulado con válvulas o con admisión parcial, pues no se dispone de geometría variable.

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Ciclo Rankine.

La turbina muestra un área de paso al flujo creciente para adaptarse a un mayor volumen específico, resultado de la expansión del vapor.



Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rankine_cycle_layout.png

Debido a los elevados saltos de presión, las turbinas de vapor se suelen separar en turbinas multi-escalón independientes, llamadas grupos, y el grupo de menor presión, debido al elevado caudal volumétrico, se suele desdoblar en los llamados cilindros, que pueden incorporar una o dos turbinas. Con este ciclo se alcanzan eficiencias entre el 30% y el 45%.

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Ciclo Rankine.

Sala del grupo-turbina de vapor Siemens serie SST6000 con tres cilindros de turbina en paralelo.

Fuente: Wikipedia, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbogenerator01.jpg>, por cortesía de Siemens Germany, copyright "Siemens Pressebild" <http://www.siemens.com>

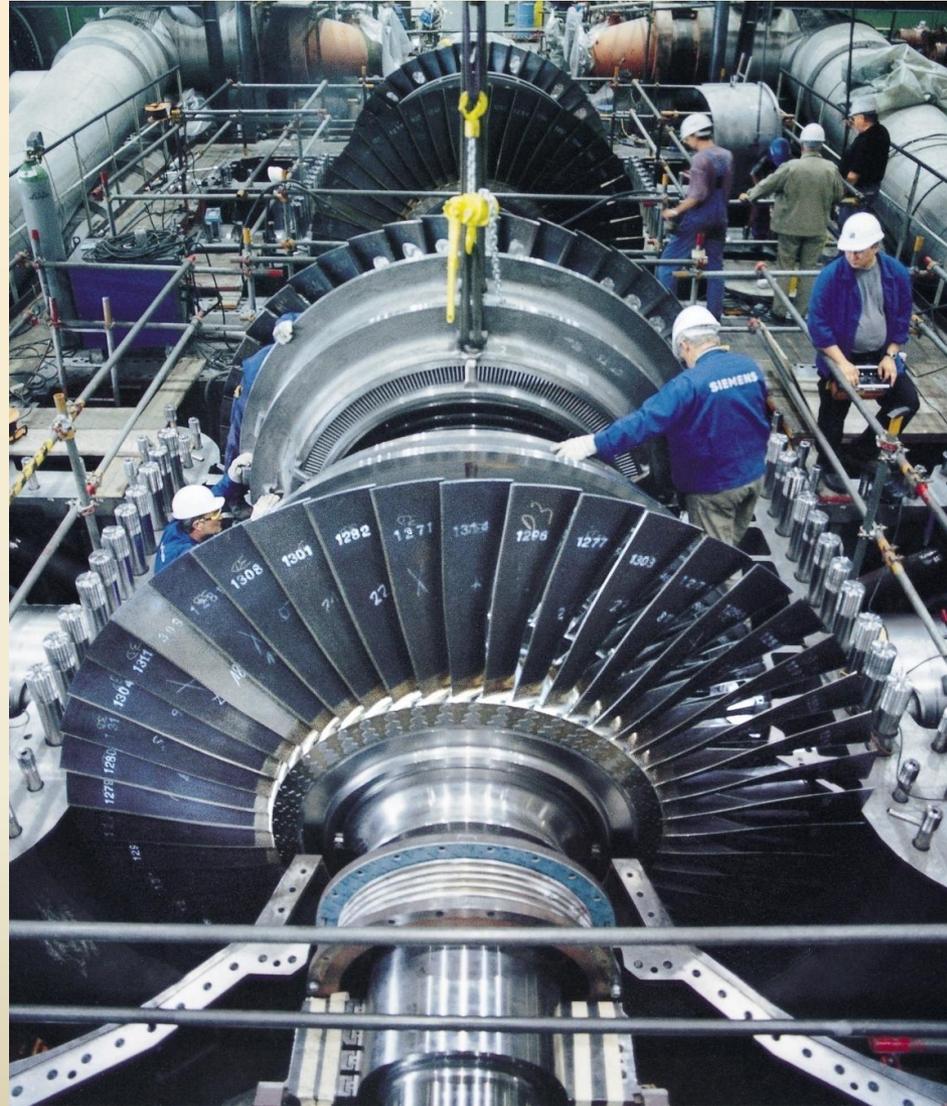
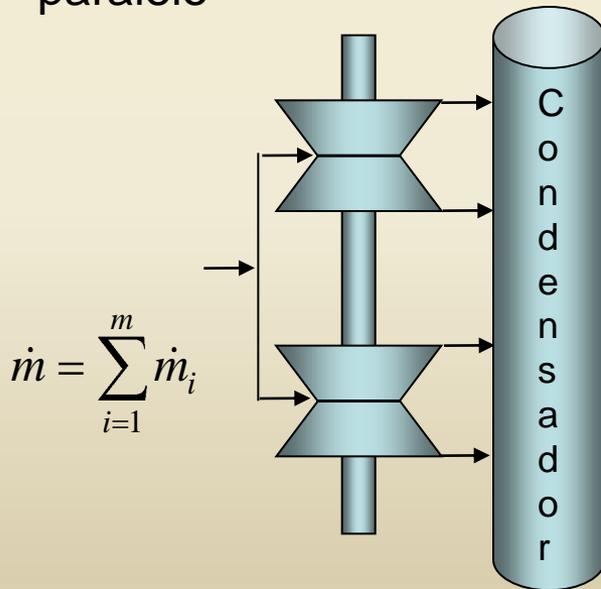


Se construyen en grupos de alta, media y baja presión hasta llegar a 1.200 MW.

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Ciclo Rankine.

- Grupo de baja presión, de turbina de vapor de condensación con cilindros coaxiales y en paralelo 2 a 2.

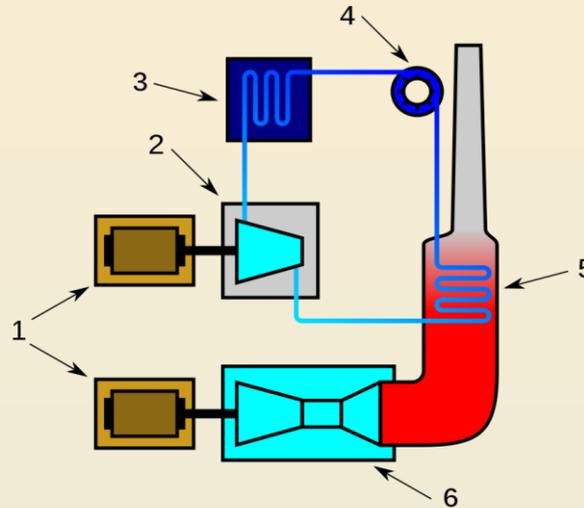
Grupo con 2 cilindros en paralelo



Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dampfturbine_Montage01.jpg. Cortesía de Siemens Germany Copyright "Siemens Pressebild" <http://www.siemens.com>

Turbomáquinas asociadas a motores térmicos. Ciclo combinado.

- Se aprovechan los gases a la salida de la turbina de gas (6) a unos 400-600 °C para producir vapor (5) y turbinarlo (2) sin consumo de calor extra. Se llega a eficiencias de conversión del calor del combustible a electricidad del 50% al 60%.



(1) generadores eléctricos, (3) condensador y (4) bomba de alimentación.

Fuente: Wikipedia, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/03/COGAS_diagram.svg/1000px-COGAS_diagram.svg.png

Resumen del capítulo 1, las turbomáquinas ...

- Son ligeras y de suave funcionamiento, pues solo giran.
- Gran diversidad de formas.
- Muy diferentes tamaños.
- Aplicaciones por doquier y muy variadas.
- Fluidos de trabajo diferentes.
- Presiones y temperaturas muy diferentes.
- Flujo incompresible y compresible.
- Muy simples y baratas y otras muy sofisticadas.

Se basan en hacer impactar un flujo uniforme sobre superficies esbeltas y afiladas, los álabes, haciendo que el flujo transite por ellas con la mínima creación de turbulencia posible. Guían la corriente deflectándola.

Resumen

Continuación del capítulo 1, las turbomáquinas ...

¿Hay quien logre dominar esta generalidad en una asignatura?

NO parece, pero se pueden establecer las bases para un dominio futuro por simple auto-aprendizaje.

Los conceptos y herramientas que se pueden conseguir son válidos para todas estas turbomáquinas.

Objetivo: Vencer las barreras conceptuales y adquirir competencias. Por ejemplo:

Resumen

Resumen del capítulo 1, las turbomáquinas (continuación)

... por ejemplo:

- ¿Sabe Ud. Calcular el par que ejerce una corona de álabes sobre el fluido?
- ¿Sabe Ud. El incremento de presión que imprime una corona de álabes al fluido?
- ¿Sabe Ud. Estimar el caudal que proporciona un ventilador?
- ¿Sabe Ud. La eficiencia esperable de una turbomáquina?
- ¿Sabe cual es la orientación adecuada de un álabe?
- ¿Sabe Ud. Especificar una turbomáquina?
- ¿Si no se cumplen las condiciones operativas previstas, cómo se va a comportar?

Al cursar con aprovechamiento la asignatura se sabrá ...

Continuación

- ¿Qué nos falta?

- Una teoría válida para todo tipo de turbomáquinas
- Que no necesite mucha información de ella para ser completa y operativa.
- Cabe esperar que sea de tipo global.
- Nos basaremos en:
 - Ecuación de cantidad de movimiento de donde se deducirá el par: transferencia de trabajo al eje, **Cap. 2**.
 - Ecuación de la energía, de donde se deducirá el cambio de entalpía total: transferencia de energía, **Cap. 3**.
 - Ecuación de la entropía, no la estudiaremos, pues necesita mucho detalle.
 - .. Además de la conservación de la masa.

El **Capítulo 4** será una contraste con la realidad y las prestaciones se entienden mucho mejor si se dispone de una teoría.

Ayuda al aprendizaje

- Cuestionario de autoexamen (contestar indicando los enunciados y entregar antes de la clase)
 1. ¿Por qué el área de paso al fluido (meridiana) crece/decrece corriente abajo dentro de una turbina/compresor de flujo compresible?
 2. ¿Que efecto del fluido produce la sustentación aerod. sobre un perfil de álabe?
 3. ¿Que efecto del fluido produce la resistencia aerod. sobre un perfil de álabe?
 4. ¿Qué tipo de máquina imprime más cambios de dirección al flujo globalmente, las axiales o las radiales? ¿Qué se puede derivar de ello?
 5. ¿Se usa siempre un gran número de álabes o un pequeño número de álabes? ¿Cuántos tiene el motor de aviación R&R Trent 1000 en compresor/turbina por escalón? ¿y una turbina eólica?.
 6. ¿Cuantos escalones tienen las turbinas hidráulicas? ¿porqué?
 7. En una turbina de gas axial, ¿cuantos menos escalones tiene la turbina con respecto al compresor?
 8. ¿Para que sirve una tobera y para qué un difusor?
 9. ¿Las toberas cambian el área de paso tan rápidamente (ángulo de las paredes) como los difusores?
 10. ¿Porqué se usa la geometría variable en las turbomáquinas?
 11. ¿Porqué se usan cilindros de turbinas de vapor en paralelo?
 12. ¿Qué orientación tienen que tener los perfiles de los álabes para ocasionar el salto de presión adecuado a) en un compresor y b) en una turbina?
 13. Comente la diferencia entre el salto de presión que produce un difusor y el que produce un escalón de compresor. ¿A costa de qué energía se produce el mismo?
 14. ¿Porqué las trayectorias del fluido al atravesar una corona de rotor atraviesan aparentemente los álabes?

Actividades globales propuestas:

1. Buscando en Internet localice una turbomáquina y encuentre:

- Relación de presiones (Presión a la salida/presión a la entrada)
- Caudal másico o volumétrico.
- Régimen de giro en r.p.m. y diámetro del rotor.

Describa su aplicación y funcionamiento, adjunte imágenes y/o planos y curvas de prestaciones, si están disponibles.

Si se hace en grupo, la calificación necesita de una entrevista con cita previa con la totalidad del grupo para determinar grado de participación.

2. Efectúe un listado razonado de mejoras posibles en el tema.

3. Comparar una turbina de gas con un motor alternativo de igual potencia.

Consideraciones generales:

¿Es demasiado teórica esta asignatura?

Es teórica porque trataremos de “enseñar a pescar” en lugar de “ofrecer el pescado” para comer.

Pero, trataremos de enseñar también el pez que hay que pescar y como hacerlo, a través de ayudas a la docencia, problemas, aplicaciones ...

El que sea teórica no significa que sea memorística. Antes bien, será conceptual.