

Turbomáquina



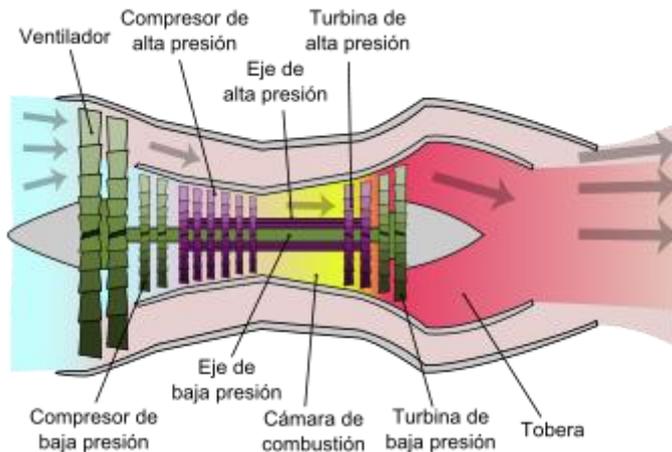
Ventilador de escritorio Westinghouse antiguo, fácilmente se puede identificar que es una turbomáquina, obsérvese que intercambia energía con el aire que impulsa y que su parte principal es una rueda con palas.

Una **turbomáquina** es una [máquina](#) cuyo elemento principal es un [rodete](#) (rotor giratorio) a través del cual pasa un [fluido](#) de forma continua, cambiando éste su [cantidad de movimiento](#) por acción de la máquina. Se da así una transferencia de [energía](#) entre la máquina y el fluido a través del momento del rotor sea en sentido máquina-fluido (como en el caso de una [bomba hidráulica](#)) o fluido-máquina (como en el caso de una [turbina](#)).

Las turbomáquinas se diferencian de otras máquinas térmicas en el hecho de que funcionan de manera continua y no discreta como es el caso de los [compresores](#) de émbolo, las [bombas de vapor](#) a pistón o los populares [motores alternativos](#) de pistón (todas ellas [máquinas de desplazamiento volumétrico](#) o positivo). Además, a diferencia de [motores rotativos](#) como el [motor Wankel](#), dicho intercambio de energía se produce por un intercambio de momento debido al giro del rotor. De forma aproximada, se suele referir a las turbomáquinas como aquellas que cumplen la [ecuación de Euler](#), si bien esta solo es exacta para el caso unidimensional:

$$\dot{W} = \dot{m} * (c_{1u} * u_1 - c_{2u} * u_2)$$

Este tipo de máquinas son muy usadas en la actualidad para [generación de energía eléctrica](#) donde se usa en casi todas las tecnologías empleadas ([turbina de gas](#), [turbina de vapor](#), [turbina eólica](#), [turbina hidráulica](#)), como mecanismo de propulsión para vehículos ([turborreactores](#), [turbohélices](#) y [turbofanés](#) en aviones, [turbinas de gas](#) para algunos ferrocarriles y barcos) y para accionar un fluido ([bombas hidráulicas](#) en sistemas de abastecimiento de agua, [turbocompresores](#) en motores para vehículos e instalaciones industriales, [ventiladores](#) de múltiples usos).



Esquema de un "turbofán", un motor que combina diversos tipos de turbomáquinas térmicas.

Índice

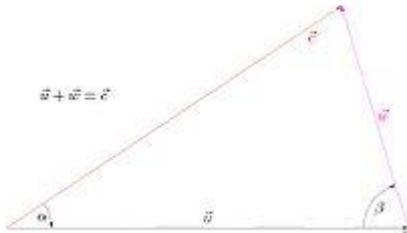
- [1 Conceptos básicos](#)
 - [1.1 Triángulo de velocidades](#)
- [2 Clasificación](#)
 - [2.1 De acuerdo con el sentido del flujo de energía](#)
 - [2.2 De acuerdo con la forma que presenta el fluido proyectado a través del rotor](#)
 - [2.3 De acuerdo con el tipo de fluido que manejan](#)
 - [2.4 De acuerdo con el cambio de presión en el rotor](#)
 - [2.5 De acuerdo con el tipo de admisión](#)
- [3 Partes de una turbomáquina](#)
 - [3.1 Partes rotativas](#)
 - [3.1.1 Rodete](#)
 - [3.1.2 Eje o árbol](#)
 - [3.2 Partes estáticas](#)
 - [3.2.1 Entradas y Salidas](#)
 - [3.2.2 Álabes directores](#)
 - [3.2.3 Cojinetes, rodamientos o rolineras](#)
 - [3.2.4 Sellos](#)
- [4 Intercambio de energía entre el fluido y la turbomáquina](#)
 - [4.1 Turbomáquinas Generadoras](#)
 - [4.1.1 Turbomáquinas radiales](#)
 - [4.1.2 Turbomáquinas axiales \(T.M.A.\)](#)
 - [4.2 Turbomáquinas Motoras](#)
 - [4.3 Consecuencias de la ecuación general de las turbomáquinas](#)
 - [4.4 Grado de reacción](#)
 - [4.5 Limitaciones de la Teoría Euleriana](#)
 - [4.5.1 Álabes largos](#)
 - [4.5.2 Álabes muy distanciados entre ellos en relación al diámetro del rotor](#)
- [5 Rendimiento de las Turbomáquinas](#)
- [6 Estudio adimensional de las turbomáquinas](#)
- [7 Bibliografía](#)

- [8 Referencias](#)
- [9 Véase también](#)

Conceptos básicos

Triángulo de velocidades

En el lenguaje de las turbomáquinas se habla de **triángulo de velocidades** para referirse al triángulo formado por tres vectores los cuales son:



Triángulo de velocidades.

- La velocidad absoluta del fluido \vec{c}
- La velocidad relativa del fluido respecto al rotor \vec{w}
- La velocidad lineal del rotor \vec{u}

Estos tres vectores forman un triángulo ya que la suma $\vec{w} + \vec{u}$ en un mismo punto es igual a \vec{c} en ese punto por leyes del movimiento relativo de la [mecánica clásica](#) ([transformación de Galileo](#) o composición de velocidades).

El ángulo entre los vectores \vec{c} y \vec{u} es denotado α y el ángulo entre los vectores \vec{w} y \vec{u} es denotado β . Esta nomenclatura será utilizada a través de todo este artículo y es [norma DIN 1331](#).

Clasificación

Las turbomáquinas pueden clasificarse de acuerdo a varios criterios como funcionamiento, composición o sentido de flujo de la energía.

De acuerdo con el sentido del flujo de energía

- **Motoras:** la energía es entregada por el fluido a la máquina, y esta entrega trabajo mecánico. La mayoría de las turbomáquinas motoras son llamadas "[turbinas](#)", pero dentro de este género también entran los molinos de viento. Posteriormente la energía mecánica puede ser transformada en otro tipo de energía, como la [energía eléctrica](#) en el caso de las turbinas eléctricas.
- **Generadoras:** la energía es entregada por la máquina al fluido, y el trabajo se obtiene de este. En este género entran las bombas, sopladores, turbocompresores, [ventiladores](#), y otros.

De acuerdo con la forma que presenta el fluido proyectado a través del rotor



Turbina Pelton, ésta es una turbomáquina transversal de admisión parcial.

- **Radial:** Si la trayectoria que sigue el fluido es principalmente normal al eje de rotación (centrífugas o centrípetas según la dirección de movimiento).
- **Axial:** Cuando la trayectoria del fluido es fundamentalmente paralelo al eje de rotación.
- **Diagonal:** Flujo diagonal al eje de rotación.

De acuerdo con el tipo de fluido que manejan

- **Térmicas:** Cuando el cambio en la [densidad](#) del fluido es significativo dentro de la máquina, como en compresores.
- **Hidráulicas:** Cuando el cambio en la densidad del fluido no es significativo dentro de la máquina, como en bombas o ventiladores.

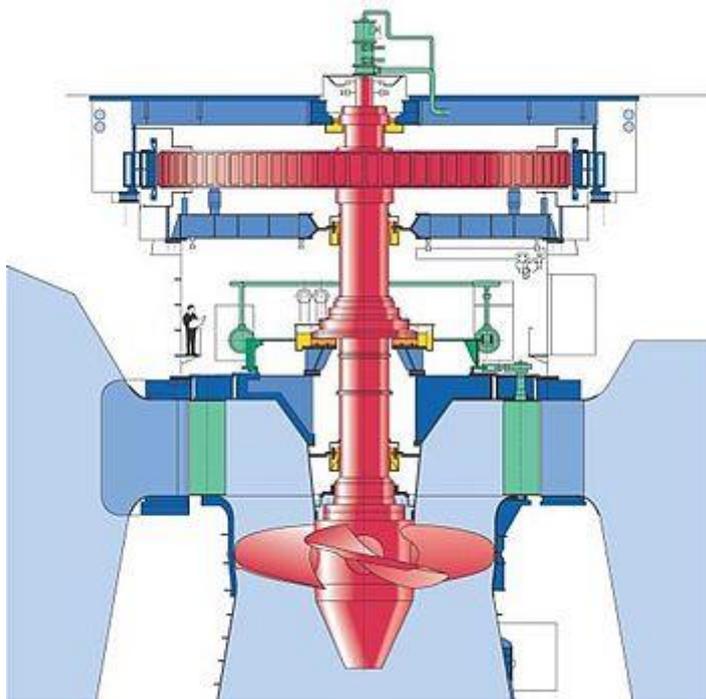
De acuerdo con el cambio de presión en el rotor

- **Acción:** no existe un cambio de [presión](#) en el paso del fluido por el rotor.
- **Reacción:** existe un cambio de presión en el paso del fluido por el rotor.

De acuerdo con el tipo de admisión

- **Total:** todo el rotor es tocado por el fluido de trabajo.
- **Parcial:** no todo el rotor es tocado por el fluido de trabajo.

Partes de una turbomáquina



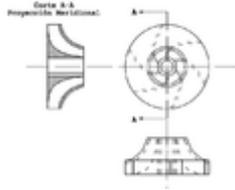
Una turbina Kaplan, ésta es una turbomáquina motora hidráulica de flujo axial. Véase en rojo las partes rotativas entre las que se encuentra un [Generador eléctrico](#) en este caso.

Una turbomáquina consta de diversas partes y accesorios dependiendo de su tipo, aplicación y diseño. Por ejemplo un ventilador puede ser una turbomáquina que sólo conste de un árbol, motor, rotor y soporte, mientras que un [compresor](#) centrífugo o una bomba semi-axial puede tener muchas partes que incluso no comparta con las demás turbomáquinas existentes. Sin embargo, la mayoría de las turbomáquinas comparten el hecho de tener partes estáticas y rotativas; y dentro de estos conjuntos puede haber diversos elementos los cuales muchas turbomáquinas comparten y una enumeración competente puede ser la siguiente:

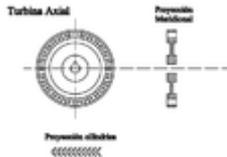
Partes rotativas

Rodete

El **Rodete** es el corazón de toda turbomáquina y el lugar donde avviene el intercambio energético con el fluido. Se suelen emplear los índices 1 y 2 para establecer la entrada y salida del rodete. Está constituido por un disco que funciona como soporte a palas, también llamadas álabes, o cucharas en el caso de las [turbinas Pelton](#). La geometría con la cual se realizan los álabes es fundamental para permitir el intercambio energético con el fluido; sobre éstas reposa parte importante del [rendimiento](#) global de toda la turbomáquina y el tipo de cambio energético generado (si la energía será transferida por cambio de presión o velocidad). Los tipos de rotores pueden ser axiales, radiales, mixtos o tangenciales, para su fácil identificación y distinción se hace uso de representaciones por proyección específicas.



Rotor radial.



Rotor axial.

Eje o árbol

Artículo principal: [Árbol de transmisión](#)

Tiene la doble función de transmitir potencia (desde o hacia el rotor) y ser el soporte sobre el que yace el rotor. En el caso de las turbomáquinas motoras éste siempre está conectado a alguna clase de [motor](#), como puede ser un [motor eléctrico](#), o incluso una [turbina](#) como es común en los [turborreactores](#), muchas veces entre el árbol y el motor que mueve a la turbomáquina se encuentra algún sistema de [transmisión mecánica](#), como puede ser un [embrague](#) o una [caja reductora](#). En el caso de las turbomáquinas generadoras, es frecuente encontrar un [generador eléctrico](#) al otro extremo del árbol, o incluso hay árboles largos que soportan al rotor en el medio y en un extremo se encuentra una turbomáquina generadora y al otro un generador.

Partes estáticas

Al conjunto de todas las partes estáticas de la turbomáquina (y en otras máquinas también) se le suele denominar **estator**.

Entradas y Salidas

Estas partes son comunes en todas las turbomáquinas, pero pueden variar de forma y geometría entre todas. Existen turbomáquinas generadoras de doble admisión, es decir, que tienen dos entradas diferenciadas y una salida única de fluido. Estas partes pueden constar de una brida en el caso de la mayoría de las bombas y compresores, pero en las turbinas hidráulicas grandes, sólo son grandes tuberías y la salida muchas veces tiene forma de difusor. En los molinos de viento, por ejemplo, la entrada y la salida sólo pueden ser superficies imaginarias antes y después del rotor. El distribuidor, es el órgano cuya misión es conducir el fluido desde la sección de entrada hacia el rodete. Se suelen utilizar los índices 0 y 1 para designar las magnitudes a la entrada del distribuidor y a la salida (entrada en el rodete). Por otro lado, el difusor es un elemento

que se encuentra a la salida del rodete y que disminuye la velocidad del fluido, además de acondicionar hidráulicamente el fluido para su conducción.

Álabes directores

También llamados palas directoras, son álabes fijos al estator, por los cuales pasa el fluido de trabajo antes o después de pasar al rotor a realizar el intercambio energético. Muchas turbomáquinas carecen de ellos, pero en aquellas donde sí figuran éstos son de vital importancia. En las turbomáquinas motoras se encargan de dirigir el fluido en un cierto ángulo, así como acelerarlo para optimizar el funcionamiento de la máquina. En las turbomáquinas generadoras se encuentran a la salida del rotor. Los álabes directores también pueden llegar a funcionar como reguladores de flujo, abriéndose o cerrándose a manera de válvula para regular el caudal que entra a la máquina.

Cojinetes, rodamientos o rolineras

Son elementos de máquina que permiten el movimiento del eje mientras lo mantienen solidario a la máquina, pueden variar de tipos y tamaños entre todas las turbomáquinas.

Sellos

Artículo principal: [Sello \(ingeniería\)](#)

Son dispositivos que impiden la salida del fluido de la turbomáquina. Cumplen una función crítica principalmente en los acoplamientos móviles como en los rodamientos. Pueden variar de tipos y ubicación dentro una turbomáquina a otra.

Intercambio de energía entre el fluido y la turbomáquina

Cuando el *fluido de trabajo* pasa a través de la turbomáquina la naturaleza del intercambio de energía es muy compleja debido a la cantidad de procesos termodinámicos irreversibles que ocurren, además de la naturaleza complicada y muchas veces caótica del movimiento del fluido en el seno del rotor. Para obtener una primera consideración de este intercambio energético se deben hacer consideraciones teóricas sobre la naturaleza del fluido y su comportamiento a través del rotor, esto con la finalidad de simplificar el modelado matemático del fluido en su paso por el rotor.

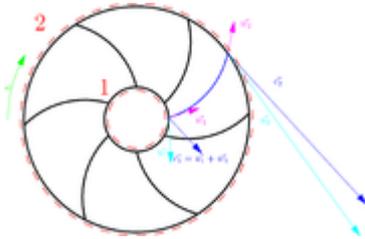
- El fluido que pasa por el rotor es un [fluido potencial](#).
- Todas las [líneas de corriente](#) tienen la misma forma que cada uno de los [álabes o paletas](#) del rotor, esto sería equivalente a decir que el rotor tiene un "infinito" número de álabes.
- Las características del régimen de flujo no varían en el tiempo, es decir, el flujo se encuentra **completamente desarrollado**, o en otras palabras, nos encontramos en **régimen permanente**.

Una vez declaradas estas simplificaciones podemos aludir a las leyes de conservación de la [mecánica](#) y a la [ecuación de transporte de Reynolds](#) de manera sencilla; pero

dependiendo de la trayectoria del flujo de fluido a través del rotor las formulaciones serán distintas.

Turbomáquinas Generadoras

Turbomáquinas radiales



Cinemática de una turbomáquina radial generadora.

- Conservación de la cantidad de movimiento lineal:

Las fuerzas que actúan sobre el volumen de control son debidas a las presiones en la entrada y en la salida del rotor, si éstas se consideran iguales en toda la salida e iguales en toda la entrada, entonces las fuerzas lineales quedan anuladas por cuestión de simetría.

- Conservación de la cantidad de movimiento angular:

En este caso se define la propiedad extensiva [momento angular](#) como

$$\vec{H} = \int (\vec{r} \times \vec{c}) dm$$
, y su análoga propiedad intensiva será $\vec{r} \times \vec{c}$, donde \vec{c} es el [campo vectorial](#) de velocidades y \vec{r} un radio vector desde la referencia hasta cada diferencial de masa dm .

La ecuación de transporte de reynolds relaciona el cambio de momento angular en el tiempo, que por leyes de la mecánica es igual a la suma de [momentos](#) aplicados, con su análoga propiedad intensiva que definimos arriba de la siguiente manera:

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \Sigma \vec{M} = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho(\vec{r} \times \vec{c}) dV + \int \rho(\vec{r} \times \vec{c}) \vec{c} d\hat{s}$$

Como se supone que la situación es de flujo estable, ningún término depende del tiempo, por lo cual el primer sumando del lado derecho de la ecuación se hace cero. El siguiente sumando es una integral que se evalúa en toda la superficie de control y se supondrá que el rotor es de una *turbomáquina generadora*:

$$\int \rho(\vec{r} \times \vec{c}) \vec{c} d\hat{s} = - \int \rho_1(\vec{r}_1 \times \vec{c}_1) \vec{c}_1 d\hat{s}_1 + \int \rho_2(\vec{r}_2 \times \vec{c}_2) \vec{c}_2 d\hat{s}_2$$

el vector \vec{c} puede escribirse en coordenadas cilíndricas como $c \sin \alpha \hat{r} + c \cos \alpha \hat{\theta}$ lo que permite llegar a la siguiente expresión:

$$\Sigma \vec{M} = - \int \rho_1 r_1 c_1 \cos(\alpha_1) c_1 \sin(\alpha_1) r_1 d\theta dz \hat{r} + \int \rho_2 r_2 c_2 \cos(\alpha_2) c_2 \sin(\alpha_2) r_2 d\theta dz \hat{r}$$

Por las suposiciones anteriores se puede considerar a la velocidad \vec{c} independiente de θ y de z ya que todas las líneas de corriente son iguales; esto permite evaluar estas integrales así:

$$\Sigma \vec{M} = -2\pi r_1 b \rho_1 c_1 \sin(\alpha_1) r_1 \cos(\alpha_1) \hat{r} + 2\pi r_2 b \rho_2 c_2 \sin(\alpha_2) r_2 \cos(\alpha_2) \hat{r}$$

Donde b es el grueso del rotor. Como el régimen es estable se cumple que la misma

masa que entra sale, es decir $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \int \rho \vec{c} d\hat{A}$. Esta integral representa el producto de la densidad del fluido por el área en la que evaluamos la integral por la componente de la velocidad normal a esta área, por lo tanto si \dot{m} es el flujo másico que circula a través del rotor se puede escribir:

$$\vec{M} = \dot{m} [c_2 r_2 \cos(\alpha_2) - c_1 r_1 \cos(\alpha_1)]$$

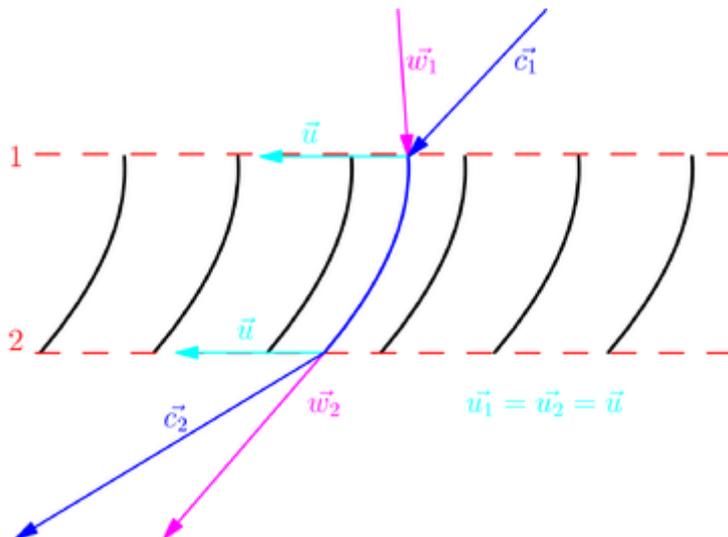
Donde \vec{M} es la totalidad de los momentos aplicados sobre el volumen de control, y se resumen en el torque aplicado por el rotor para mantener el flujo de fluido. Para obtener datos energéticos en vez de mecánicos recurrimos a la definición de [potencia](#) $N = M\omega$, donde ω es la velocidad angular y podemos reescribir la anterior relación mecánica como una relación energética:

$$N = \dot{m} [u_2 c_2 \cos(\alpha_2) - u_1 c_1 \cos(\alpha_1)]$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación general de las turbomáquinas y fue hallada por [Euler](#) en 1754.

Turbomáquinas axiales (T.M.A.)

En la formulación euleriana de las turbomáquinas axiales se supone, además de las simplificaciones teóricas declaradas más arriba, que la altura de las palas es muy pequeña en relación al diámetro del rotor. Esta suposición implica necesariamente que la diferencia de la velocidad periférica a lo largo de las palas es muy pequeña, así haremos un análisis del intercambio de cantidad de movimiento de una proyección cilíndrica imponiendo que la velocidad periférica es la misma a lo largo de cada uno de los álabes.



Triángulos de velocidades.

En vez de utilizar la [ecuación de transporte de Reynolds](#), que sería completamente válida y concluiría exactamente lo mismo, haremos un análisis de fuerzas más sencillo para dar otra perspectiva al lector. A efectos del intercambio de energía con el rotor, el cambio de cantidad de movimiento en dirección de $\vec{u}_1 = \vec{u}_1 = \vec{u}_2 = \vec{u}_2 = \vec{u}$ es el que determinan la fuerza tangenciales (F_{tan}) sobre la periferia del rotor (véase figura anexa), es decir:

$$F_{tan} = \dot{m}(|\vec{c}_2| \cos(\alpha_2) - |\vec{c}_1| \cos(\alpha_1))$$

Para determinar la potencia suministrada por la máquina al fluido (recuérdese que estamos hablando de turbomáquinas motoras), multiplicamos a ambos lados por el radio del rotor r y por la velocidad angular del mismo ω , de esta forma, en el lado derecho de la igualdad anterior se tendrá la velocidad periférica:

$$N = \dot{m}u(c_2 \cos(\alpha_2) - c_1 \cos(\alpha_1))$$

Turbomáquinas Motoras

El desarrollo hecho arriba para determinar la transferencia de energía fue hecho, como ya dijimos, para turbomáquinas motoras, es decir, la energía del fluido de trabajo aumenta luego de pasar por el rotor de la turbomáquina. Para el caso de turbomáquinas generadoras, en las cuales el fluido de trabajo le cede energía a la máquina éstas ecuaciones siguen siendo válidas, pero el signo de la potencia será negativo. Para evitar esto, es costumbre en el estudio y práctica de las turbomáquinas cambiar el signo de la ecuación invirtiendo los términos algebraicos de lado derecho de la igualdad de Euler:

- **Turbomáquinas generadoras radiales:**

$$N = \dot{m}[u_1 c_1 \cos(\alpha_1) - u_2 c_2 \cos(\alpha_2)]$$

- **Turbomáquinas generadoras axiales:**

$$N = \dot{m}u[c_1 \cos(\alpha_1) - c_2 \cos(\alpha_2)]$$

En todo caso, para turbomáquinas motoras y generadoras, se puede observar que la ecuación para las turbomáquinas radiales es completamente general.

Consecuencias de la ecuación general de las turbomáquinas

De esta ecuación fundamental se desprenden muchas interpretaciones del fenómeno de intercambio energético que se desarrolla en el rotor, el cual hemos evidenciado estar determinado por la cinemática del fluido en el rodete. **De ahora en adelante, en este párrafo nos referiremos a turbomáquinas generadoras y dejamos al lector la extrapolación de los conceptos a las turbomáquinas motoras.**

En primer lugar, el concepto de triángulo de velocidades enunciado más arriba, permite reescribir la ecuación de Euler:

$$L = [u_2 c_2 \cos(\alpha_2) - u_1 c_1 \cos(\alpha_1)]$$

Donde L se conoce como *labor* o [trabajo](#) por unidad de masa que pasa al fluido, también conocido como *trabajo específico*. Luego, si aplicamos el [teorema del coseno](#) al triángulo de velocidades obtendremos la siguiente expresión.

$$w^2 = c^2 + u^2 - 2cu \cdot \cos(\alpha)$$

$$cu \cdot \cos(\alpha) = \frac{c^2}{2} + \frac{u^2}{2} - \frac{w^2}{2}$$

Si sustituimos en la ecuación general obtendremos una expresión del trabajo específico únicamente en función de los cambios de velocidades al cuadrado, es decir formas de energía cinética:

$$L = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$



Turborreactor Rolls Royce, donde puede observarse la admisión de aire a la izquierda y el fluido que sale por los extremos del rotor hacia la cámara de combustión.

De los tres términos de esta ecuación, el primero es conocido como componente dinámico, y es el cambio de energía cinética específica sufrido por el fluido en el rotor. Los otros dos términos restantes reciben el nombre de componente estático, y para encontrar su significado se necesita recurrir a un balance entre la energía del fluido y el trabajo entregado por el rotor:

$$\underbrace{h_2 - h_1}_{\text{cambio de entalpia}} + \underbrace{\frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2}}_{\text{cambio de energia cinética}} = \underbrace{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}}_{\text{componente dinamica}} +$$

En el cambio de energía del fluido no aparece la energía potencial gravitatoria: efectivamente, los cambios de cota en el rodete son ínfimos en comparación con los demás cambios energéticos, por lo cual este término se desprecia. Además, esta ecuación es independiente del tipo de fluido que pasa por la turbomáquina, si éste fuese incompresible el cambio entálpico sería igual al cambio de presión únicamente.

La expresión anterior revela, que la componente estática de la energía suministrada al fluido por la turbomáquina, es equivalente al cambio entálpico del fluido en su paso por el rotor, y este cambio entálpico es proporcional a un cambio de presión. Es decir, *existen dos formas fundamentales en que una turbomáquina puede entregar energía a un fluido, en forma de energía cinética y en forma de presión*. Es importantísimo notar que todo cambio de presión implica un cambio de entalpía.

$$L = \underbrace{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}}_{\text{cambio de energia cinética}} + \underbrace{\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}}_{\text{cambio de presion}}$$

Consideraciones posteriores sobre esta fórmula arrojan pistas sobre qué forma debe tener la corriente de fluido en el rotor para maximizar el trabajo euleriano que se entrega al fluido, y una obvia es minimizar todos los términos que tengan un signo menos. De hecho, casi todas las turbomáquinas generadoras radiales son centrífugas y todas las turbomáquinas motoras radiales son centrípetas, así la velocidad periférica de entrada y salida se minimiza correspondientemente.

Grado de reacción

La idea de que la transferencia de energía entre el fluido y el rodete se realiza bajo forma de energía cinética y de *energía de flujo* (el término Pv , o también el cambio de presión, lo que implica un cambio de entalpía) lleva a la definición de *grado de reacción*, que es la fracción de energía total entregada al fluido que es dada en forma de presión:

$$R = \frac{\text{energía entregada en forma de presion}}{\text{energía total entregada}}$$

La magnitud física *presión* (fuerza por unidad de área) no tiene un significado energético directo, en cambio ésta está íntimamente ligada a la entalpía, la cual si tiene un grandísimo significado energético. Por esta razón en el lenguaje de las turbomáquinas es frecuente hablar de cambios de presión para referirse a cambios de entalpía o viceversa. Más aún, si la energía interna de un fluido varía poco en su paso por el rotor, el cambio de entalpía será proporcional al cambio de presión, y así es posible escribir otra definición de *grado de reacción*:

$$R = \frac{\text{energía entregada en forma de entalpía}}{\text{energía total entregada}}$$

y por las expresiones arriba mencionadas:

$$R = \frac{\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}}{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}}$$

Limitaciones de la Teoría Euleriana

La descripción dada arriba del intercambio energético dado en el paso del fluido de trabajo por el seno del rodete de la turbomáquina se conoce como teoría euleriana. Esta teoría resulta satisfactoria en muchos casos, en los cuales son válidas las suposiciones efectuadas para concluir la ecuación fundamental de las turbomáquinas. Por otro lado cuando estas suposiciones no son verificadas no es posible obtener una descripción satisfactoria a partir de la teoría euleriana, y en cada caso se deben tomar las medidas competentes para realizar un diseño correcto.

Álabes largos

Tal como ocurre en las etapas de baja presión dentro de las turbinas de vapor, en muchos casos, las palas de una turbomáquina axial pueden llegar a ser tan largas que exigen un análisis tridimensional completo del intercambio de cantidad de movimiento.

Álabes muy distanciados entre ellos en relación al diámetro del rotor

Si los álabes de una turbomáquina axial están muy distanciados, se pierde el efecto de "canal" que permite la suposición de tener un "número infinito de álabes", entonces las fuerzas intercambiadas entre el fluido y el rotor deben ser estudiadas desde la perspectiva de la [teoría alar](#).

Rendimiento de las Turbomáquinas

En las turbomáquinas el concepto de rendimiento es de suma importancia. El [rendimiento](#) o eficiencia, puede verse como la razón existente entre los beneficios que pueden obtenerse idealmente de una máquina y aquellos que son obtenidos en la realidad. En otras palabras el rendimiento *total* de una turbomáquina se define como la razón entre la potencia restituida y la potencia absorbida:

$$\eta_{total} = \frac{\text{potencia restituida}}{\text{potencia absorbida}}$$

En las turbomáquinas motoras la potencia absorbida es toda aquella entregada por el fluido de trabajo en su paso por la máquina, y la potencia restituida es aquella que se encuentra en el eje del rotor. Al contrario ocurre en las turbomáquinas generadoras, ya que la potencia absorbida se encuentra en el eje del rotor, y la energía restituida es aquella que es entregada efectivamente al fluido de trabajo.

El discurso sobre el rendimiento utiliza ampliamente los conceptos de la termodinámica. La primera ley de la termodinámica nos indica que la potencia restituida jamás podrá ser mayor a la potencia absorbida, ya que esto implicaría la creación espontánea de energía. La segunda ley de la termodinámica nos dice que la potencia absorbida siempre será mayor que la potencia restituida, ya que la energía se suministra al fluido en un número finito de etapas (es un proceso irreversible). De esta forma podemos afirmar que

$$\eta_{total} < 1$$

De esta manera, por ejemplo, para que un compresor axial entregue una cantidad $E_{entregada}$ (energía restituida por la máquina) de energía a un fluido, este deberá absorber una cantidad de energía $E_{absorbida}$ definitivamente mayor a la entregada efectivamente al fluido de trabajo. La diferencia entre la energía absorbida y la energía restituida se conoce con el nombre de pérdidas:

$$E_{absorbida} - E_{entregada} = E_{perdida}$$

Podemos escribir la misma relación para la potencia [derivando](#) respecto al tiempo:

$$N_{absorbida} - N_{entregada} = N_{perdida}$$

La potencia perdida es aquella que resulta invertida en otros fenómenos distintos a aquellos deseados para los fines de la turbomáquina, que es entregar energía útil al fluido. Así la potencia perdida resulta en el calentamiento del fluido, vencer las fuerzas viscosas dentro del fluido, etc.. Para simplificar el estudio de la eficiencia o rendimiento se clasifican diversos tipos de rendimiento, cada uno asociado a un fenómeno distinto de pérdida de energía.

Estudio adimensional de las turbomáquinas

Más arriba hemos dado luces acerca de la complejidad de la dinámica del *fluido de trabajo* en su paso por la turbomáquina, de hecho las ecuaciones que predicen el movimiento del fluido son de tal complejidad que aún no se conoce una solución general, sino soluciones particulares que requieran grandes simplificaciones, que sin embargo aportan mucha información sobre el verdadero comportamiento del fluido. A su vez, la construcción comercial de turbomáquinas ya había empezado antes de que éstas ecuaciones se conocieran, o fueran difundidas en la comunidad científica e

ingenierística, por lo cual los constructores de turbomáquinas se vieron obligados en buscar un método práctico de modelar estas máquinas. Un método obvio es la construcción de modelos, y la correlación entre modelos está determinada por la [teoría de la similitud](#) y el [análisis dimensional](#).

La *naturaleza experimental* de la construcción de máquinas lleva a la construcción de modelos, luego la correlación entre los modelos y su equivalente real está determinado por los modelos teóricos ya mencionados, especialmente a través del [Teorema de Pi-Buckingham](#).

Más aún, Baljé encontró que si dos máquinas *similes* tienen el mismo rendimiento, entonces cada tipo de turbomáquina tiene un lugar "adimensional" de máximo rendimiento.¹

Bibliografía

- MATAIX, Claudio. *Turbomáquinas Hidráulicas*. Editorial ICAI.
- DIXON, S. L.. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. Editorial Butterworth Heinemann.
- SCIUBBA, Enrico. *Lezioni di Turbomacchine*. Editorial Editrice Universitaria di Roma.

es.wikipedia.org/wiki/Turbomáquina