

J. Javier López  
F. Javier Salvador  
Jaime Martín  
Carlos Guardiola

# **Cuestiones y problemas resueltos de motores de combustión de flujo continuo**

EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Los contenidos de esta publicación han sido revisados por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València

Colección Académica

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: LÓPEZ, J. JAVIER [et al] (2015). *Cuestiones y problemas resueltos de motores de combustión de flujo continuo*. Valencia: Universitat Politècnica de València

© J. Javier López  
F. Javier Salvador  
Jaime Martín  
Carlos Guardiola

© 2015, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València  
*distribución:* Telf.: 963 877 012 / [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.: 0327\_04\_01\_01

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-9048-453-1  
Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impreso en España

# Prólogo

Me resulta muy grato presentar este libro de cuestiones y problemas resueltos de **Motores de Combustión de Flujo Continuo**, que se ha ido elaborando tras varios años de empeño y dedicación por parte de gran parte del equipo de profesores del *Departamento de Máquinas y Motores Térmicos* de la *Universitat Politècnica de València*.

Es conveniente tener en cuenta que en los motores de combustión, en general, entran en juego gran número de disciplinas de diversa índole: la mecánica, la transferencia de calor, la termodinámica, la mecánica de fluidos, la metalurgia, la química, etc. El conocimiento profundo de los procesos que ocurren dentro de ellos, que es sin duda esencial para comprender a fondo su comportamiento, es realmente difícil de conseguir, puesto que requiere un amplio abanico de conocimientos y, lo que quizás es más difícil, su integración. El presente libro ofrece al lector la posibilidad de reflexionar sobre aspectos muy diversos de los motores de combustión de flujo continuo, tratando de conectar los puntos de vista de las distintas disciplinas, con el fin de entender lo que ocurre en su interior.

Esta obra ofrece al lector una serie de recursos para satisfacer la sed de conocer y entender las claves del funcionamiento de este tipo de motores, siendo de lectura entretenida pero sin perder por ello el rigor. Las diferentes cuestiones tratan aspectos que van desde los fundamentos hasta los detalles tecnológicos, y los diversos problemas (o ejercicios numéricos) pretenden afianzar los conocimientos, brindando al lector la oportunidad de aplicarlos a casos concretos, así como ayudarle a tener órdenes de magnitud de los diferentes parámetros de interés en el contexto de estos motores.

Finalmente, el material que aquí se ofrece ha sido elaborado fundamentalmente con fines docentes, pretendiendo ser una contribución a la maduración como ingeniero del alumno, y tratando de aprovechar el gran atractivo natural del tema para consolidar en él los conocimientos básicos de un elevado número de disciplinas diferentes que constituyen el fundamento de la mayoría de las ingenierías.

José M. Desantes  
Catedrático de Universidad  
CMT – Motores Térmicos  
Universitat Politècnica de València

*Valencia, 28 de septiembre de 2015.*



# Agradecimientos

En primer lugar queremos expresar un sincero agradecimiento a todo el equipo de profesores del *Departamento de Máquinas y Motores Térmicos* de la *Universitat Politècnica de València* por su contribución directa o indirecta en esta obra que ahora sale a la luz. Son múltiples las ideas, razonamientos, figuras, esquemas, etc. que hemos podido utilizar gracias al esfuerzo y aportación de todos ellos.

En segundo lugar, agradecemos también el esfuerzo de todas aquellas personas que han contribuido a la elaboración del material gráfico. Aunque sea una contribución a primera vista accesorio, no podemos olvidar que el nivel de calidad de una obra como la presente está fuertemente marcada por la calidad de su material gráfico, por lo que podemos afirmar que a ellos debemos, en gran medida, la elevada calidad de esta obra.

En tercer lugar, agradecemos al equipo directivo del *Departamento de Máquinas y Motores Térmicos* de la *Universitat Politècnica de València* la acogida que han mostrado con respecto a esta iniciativa, así como toda la formación que nos han brindado, pues sin ella este trabajo nunca habría llegado a ser una realidad.

Finalmente, agradeceríamos al colectivo de los lectores de este libro que nos hagan llegar cualquier sugerencia, comentario o errata detectada a J. Javier López ([jolosan3@mot.upv.es](mailto:jolosan3@mot.upv.es)), con el fin de mejorar futuras ediciones del presente libro.

Los autores



# Índice general

<b>1. Clasificación de los motores de combustión</b>	<b>1</b>
1.1. Cuestiones . . . . .	1
1.1.1. Características principales de los motores de combustión . . . .	1
1.1.2. Turbina en configuración de mariposa o de doble flujo . . . . .	3
1.1.3. Motores de combustión interna y externa . . . . .	5
1.1.4. Aprovechamiento de la energía . . . . .	6
1.1.5. Miscelánea . . . . .	7
1.2. Problemas . . . . .	8
1.2.1. Consumo de una central de carbón . . . . .	8
 <b>2. Estudio termodinámico de turbomáquinas</b>	 <b>11</b>
2.1. Cuestiones . . . . .	12
2.1.1. Escalonamiento turbina axial . . . . .	12
2.1.2. Rendimientos en una turbina . . . . .	13
2.1.3. Rendimientos en un compresor . . . . .	15
2.1.4. Comparación de rendimientos de turbinas y compresores . . . .	17
2.1.5. Grado de reacción . . . . .	17
2.1.6. Expresiones de la ecuación de la energía . . . . .	18
2.1.7. Trabajo de las fuerzas centrífugas . . . . .	19
2.1.8. Proceso de compresión/expansión en un estátor . . . . .	20
2.1.9. Triángulos de velocidades en escalonamientos de turbinas axiales	21
2.1.10. Comparación turbina axial y radial . . . . .	25
2.1.11. Escalonamientos en turbocompresor axial . . . . .	27
2.1.12. Miscelánea . . . . .	28
2.2. Problemas . . . . .	29
2.2.1. Turbina axial de $h$ constante en el rotor (I) . . . . .	29

2.2.2.	Turbocompresor axial (I) . . . . .	32
2.2.3.	Turbina de dos escalonamientos (I) . . . . .	35
2.2.4.	Turbina radial (I) . . . . .	38
2.2.5.	Turbina axial de $h$ constante en el rotor (II) . . . . .	40
2.2.6.	Turbina de dos escalonamientos (II) . . . . .	43
2.2.7.	Motor turbina de gas . . . . .	46
2.2.8.	Turbina radial (II) . . . . .	48
2.2.9.	Turbocompresor axial (II) . . . . .	51
2.2.10.	Turbocompresor axial (III) . . . . .	54
2.2.11.	Turbina axial de $p$ constante en el rotor . . . . .	57
2.2.12.	Turbina de tres escalonamientos . . . . .	60
2.2.13.	Turbocompresor radial . . . . .	63
<b>3.</b>	<b>Ciclos de turbina de vapor</b>	<b>67</b>
3.1.	Cuestiones . . . . .	67
3.1.1.	Mejoras en el ciclo de Rankine . . . . .	67
3.1.2.	Regeneración. Efecto y tipologías . . . . .	71
3.1.3.	Regeneración en cascada ascendente y descendente . . . . .	74
3.1.4.	Cálculo de la extracción en un regenerador de mezcla . . . . .	76
3.1.5.	Ciclo e instalación de turbina de vapor (I) . . . . .	77
3.1.6.	Ciclo e instalación de turbina de vapor (II) . . . . .	79
3.1.7.	Ciclo e instalación de turbina de vapor (III) . . . . .	81
3.1.8.	Regeneración en turbina de vapor y en turbina de gas . . . . .	84
3.1.9.	Trabajo en una bomba de agua . . . . .	85
3.1.10.	Miscelánea . . . . .	86
3.2.	Problemas . . . . .	89
3.2.1.	Mejoras en el ciclo de Rankine . . . . .	89
3.2.2.	Ciclo de Rankine I . . . . .	95
3.2.3.	Ciclo de Rankine II . . . . .	99
<b>4.</b>	<b>Aspectos tecnológicos de los ciclos de turbina de vapor</b>	<b>105</b>
4.1.	Cuestiones . . . . .	105
4.1.1.	Esquema de una caldera convencional . . . . .	105
4.1.2.	Papel del calderín . . . . .	107



---

4.1.3.	Papel del economizador y del calentador de aire . . . . .	108
4.1.4.	Ubicación de los sobrecalentadores en una caldera convencional . . . . .	109
4.1.5.	Calderas pirotubulares y acuotubulares . . . . .	110
4.1.6.	Desaireador en instalaciones de turbina de vapor . . . . .	111
4.1.7.	Bombas de condensado . . . . .	111
4.1.8.	Caldera convencional vs. caldera de recuperación . . . . .	112
4.1.9.	Interés de las torres de refrigeración . . . . .	113
4.1.10.	Funcionamiento de las torres de refrigeración . . . . .	114
4.2.	Problemas . . . . .	116
4.2.1.	Diagrama T-L de una caldera convencional . . . . .	116
<b>5.</b>	<b>Ciclos de turbina de gas y ciclos combinados</b>	<b>121</b>
5.1.	Cuestiones . . . . .	121
5.1.1.	Comparación ciclo simple y compuesto de TG . . . . .	121
5.1.2.	Ciclo compuesto de TG . . . . .	123
5.1.3.	Elementos ciclo combinado . . . . .	125
5.1.4.	Interés de un ciclo combinado . . . . .	127
5.1.5.	Rendimiento de un ciclo combinado . . . . .	128
5.1.6.	Pinzamiento en una caldera de recuperación . . . . .	129
5.1.7.	Miscelánea . . . . .	130
5.2.	Problemas . . . . .	131
5.2.1.	Ciclo combinado I . . . . .	131
5.2.2.	Ciclo combinado II . . . . .	134
5.2.3.	Ciclo combinado III . . . . .	138
5.2.4.	Ciclo combinado IV . . . . .	142
5.2.5.	Ciclo combinado V . . . . .	148
5.2.6.	Ciclo combinado VI . . . . .	153
5.2.7.	Ciclo combinado VII . . . . .	156
5.2.8.	Ciclo combinado VIII . . . . .	162
5.2.9.	Ciclo combinado IX . . . . .	168

<b>6. Aspectos tecnológicos de turbinas de gas y ciclos combinados</b>	<b>177</b>
6.1. Cuestiones . . . . .	177
6.1.1. Diagrama $T - L$ en una caldera de recuperación . . . . .	177
6.1.2. Mapa de un turbocompresor . . . . .	180
6.1.3. Diferencias entre turbomáquinas axiales y radiales . . . . .	181
6.1.4. Refrigeración de álabes en turbinas de gas . . . . .	182
6.1.5. Diseño de cámaras de combustión en turbinas de gas . . . . .	182
6.1.6. Regeneración en turbinas de gas . . . . .	185
6.1.7. Diseño de turbomotores de aviación . . . . .	187
6.1.8. Miscelánea . . . . .	188
6.2. Problemas . . . . .	189
6.2.1. Diseño comparativo de los tres tipos de turbomotores . . . . .	189
6.2.2. Diseño de la tobera de un turborreactor . . . . .	198
6.2.3. Diseño de una caldera de recuperación . . . . .	200

# Tabla de símbolos

## *Latinos*

$a$	Velocidad del sonido
$A$	Área
$c$	Velocidad absoluta
$c_p$	Calor específico a presión constante
$c_v$	Calor específico a volumen constante
$E_C$	Energía cinética
$F$	Dosado
$F_{est}$	Dosado estequiométrico
$F_r$	Dosado relativo
$GR$	Grado de reacción
$h$	Entalpía específica (por unidad de masa)
$\dot{m}$	Caudal másico
$M$	Número de Mach
	Par
$n$	Régimen de giro (en rps)
$N$	Potencia
$p$	Presión
$q$	Calor por unidad de masa (específico)
$\dot{Q}$	Potencia calorífica
$r$	Radio
$R$	Constante particular del gas (usualmente aire)
$R_C$	Relación de compresión
$s$	Entropía
$T$	Temperatura
$u$	Velocidad de arrastre
$w$	Velocidad relativa
	Trabajo específico (por unidad de masa)
$\dot{W}$	Potencia mecánica
$y$	Porción del caudal másico extraído en la regeneración

*Griegos*

$\Delta$	Variación
$\eta$	Rendimiento
$\gamma$	Coefficiente adiabático del gas (ratio de $c_p$ y $c_v$ )
$\rho$	Densidad
$\omega$	Velocidad angular

*Subíndices y superíndices*

0	Total o de parada
A	Aire
AP	Alta Presión
B	Bomba
BP	Baja Presión
c	Crítica (referente a condiciones críticas)
C	Compresor
Carnot	Referente al ciclo de Carnot
cc	Cámara de Combustión
CC	Ciclo combinado
ciclo	Referente al ciclo
CG	Ciclo de Gas
CV	Ciclo de Vapor
E	Entrada
emp	Referente a empuje
ent	A la entrada
F	Referente a combustible (fuel)
fan	Referente al fan
fin	En la sección final
G	Gas, gases
GE	Gases de escape
H	Relativo al foco caliente (High)
helice	De la hélice
L	Relativo al foco frío (Low)
	Relativo a líquido
LS	Líquido Saturado
neto(a)	Referido al ciclo completo
prop	Propulsivo o de propulsión
r	Relativo
rotor	Referente al rotor
s	Isentrópico
S	Salida
sal	A la salida

---

t	Térmico
T	Turbina
TG	Referente al ciclo o motor turbina de gas
TE	Total a estático
TT	Total a total
TV	Referente al ciclo o motor turbina de vapor
u	Útil
V	Vapor
VS	Vapor Saturado

***Siglas***

B	Bomba
BA	Bomba de Alta presión
BC	Bomba de Condensados
C	Compresor
	Condensador
CAL	Calentador (de superficie)
CAP	Compresor de alta presión
CBP	Compresor de baja presión
CC	Cámara de combustión
CND	Condensador
CO	Monóxido de carbono
DA	Desaireador (mezclador)
ENDESA	Empresa Nacional De Electricidad S.A.
GE	Generador Eléctrico
	Gases de Escape
GR	Grado de Reacción
GV	Generador de Vapor
ID	Índice de derivación
MCIA	Motor de Combustión Interna Alternativo
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
rpm	Revoluciones por minuto
rps	Revoluciones por segundo
T	Turbina
TAP	Turbina de Alta Presión
TBP	Turbina de Baja Presión
TG	Turbina de gas
TV	Turbina de vapor
VL	Válvula de Laminación



# Capítulo 1

## Clasificación de los motores de combustión

### Contenido

---

<b>1.1. Cuestiones . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1.1. Características principales de los motores de combustión .	1
1.1.2. Turbina en configuración de mariposa o de doble flujo . .	3
1.1.3. Motores de combustión interna y externa . . . . .	5
1.1.4. Aprovechamiento de la energía . . . . .	6
1.1.5. Miscelánea . . . . .	7
<b>1.2. Problemas . . . . .</b>	<b>8</b>
1.2.1. Consumo de una central de carbón . . . . .	8

---

### 1.1. Cuestiones

#### 1.1.1. Características principales de los motores de combustión

Construir una tabla en la que aparezcan los principales motores de combustión que existen en la actualidad, indicando valores típicos de rendimiento, potencia máxima, aplicación (o aplicaciones) de cada uno de ellos y calidad de combustible que requieren. Coméntese brevemente el contenido de la tabla.

Los datos que se piden se resumen en la Tabla 1.1. En referencia al rendimiento, en los motores en los que varía fuertemente la carga durante su operación (como es el caso de los motores diésel y gasolina usados en automoción), el valor que se proporciona se corresponde con el rendimiento máximo. Los comentarios que se pueden hacer a la vista de la tabla son los siguientes:

Parámetro	Turbina de Vapor	Turbina de Gas	Motor Diésel	Motor Gasolina
$\dot{W}_{neta}$ máx.	1000 MW	150 MW	50 MW	1 MW
$\eta$ máx.	0.3 - 0.4	0.2 - 0.35	0.35 - 0.5	0.2 - 0.3
Aplicación	Generación Electricidad	Gen. Elect. Aviación	Automoción Maq. Pesada	Automoción Maq. Ligera
Calidad del Combustible	Media Baja	Alta	Alta	Alta

Tabla 1.1: Características de los principales motores de combustión que existen en la actualidad.

- La turbina de vapor es el motor de combustión que se utiliza en las aplicaciones que requieren las mayores potencias. Por el hecho de trabajar con vapor de agua, y existir un cambio de fase, la temperatura de aporte de calor al ciclo está fuertemente limitada, y ello se refleja (según el teorema de Carnot) en un rendimiento energético mediocre. Una manera de paliar esta limitación es utilizarla conjuntamente con una turbina de gas, en los llamados ciclos combinados (de los que se habla en el capítulo 5), de manera que se aprovecha el calor residual de la turbina de gas en la turbina de vapor. La aplicación más usual del motor turbina de vapor es la generación de electricidad, formando parte de las llamadas centrales de base, que son aquellas que están en funcionamiento continuo. Esto es así dada la enorme dificultad que supone arrancar y parar la instalación. Como se verá en el siguiente punto, existen otras centrales, denominadas de punta, que únicamente se conectan cuando hay un incremento puntual de la demanda eléctrica. Este otro tipo de centrales requiere el uso de un motor que pueda ser arrancado y parado con mayor facilidad, como es el caso de la turbina de gas. Finalmente, en cuanto a la calidad del combustible requerida, al tratarse de un motor de combustión externa, el combustible puede ser de calidad media o baja (ver Cuestión 1.1.3).
- La característica más destacable del motor turbina de gas es su elevada potencia específica, esto es, que desarrolla mucha más potencia que cualquier otro motor para un peso dado del mismo. Esta característica lo hace idóneo para la aplicación aeronáutica, ya que ahí el minimizar el peso del motor es muy importante. Otro aspecto interesante de este tipo de motor es su facilidad de puesta en marcha y de parada, lo que lo hace adecuado para su uso en centrales de punta (entran en funcionamiento para abastecer puntas en la demanda eléctrica). En cuanto al nivel de rendimiento de la conversión energética, éste no es excesivo, si bien cada vez van haciéndose mayores a medida que mejoran los materiales utilizados (como se verá en 6.1.4, la parte más crítica es la entrada de la turbina de alta presión, justo a la salida de la cámara de combustión). Otra manera de mejorar este aspecto es hacer un uso combinado de este tipo de motor con una turbina de vapor, como se ha comentado en el punto anterior. Finalmente, al



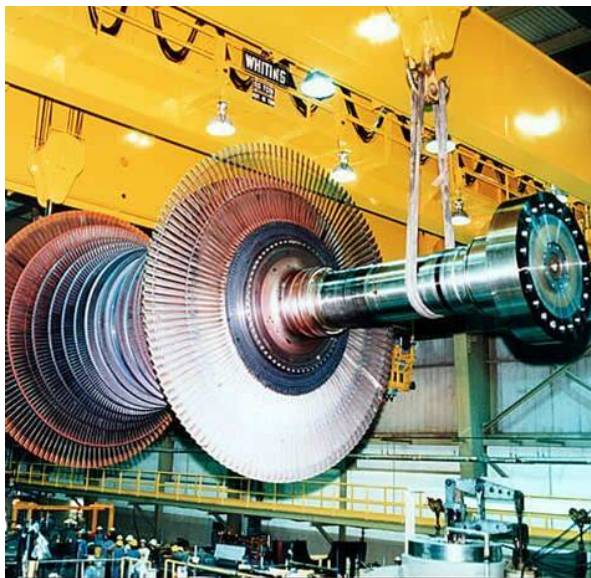
tratarse de un motor de combustión interna (al igual que los otros dos motores que se comentarán a continuación), el combustible debe ser de elevada calidad, puesto que sería peligroso para la integridad de la instalación que existieran residuos de la combustión circulando por el interior de los elementos del motor (ver Cuestión 1.1.3).

- El punto más destacable de los motores diésel es su elevado rendimiento. Es un motor que puede llegar a ser bastante grande (mucho más que los motores de gasolina, por ejemplo), y su aplicación más habitual es la automoción (tanto para vehículos ligeros como pesados) y la maquinaria pesada, en la que es de agradecer el uso de un motor de elevada eficiencia (y, por tanto, de menor consumo).
- El motor de gasolina es considerablemente menos eficiente que el diésel, y las potencias que puede dar son pequeñas. Se hace notar que esto no significa que, para un mismo tamaño de motor diésel y motor de gasolina este último tenga las de perder (más bien es al contrario, ya que la potencia específica suele ser mayor en los motores de gasolina), sino que es imposible construir motores de gasolina de gran tamaño, principalmente por problemas de autoencendido de la mezcla, que destruyen el motor. No obstante se puede destacar la mayor simplicidad del motor de gasolina respecto al diésel, lo que lo hace apto para su uso en maquinaria ligera, donde se aprecia el menor coste y mantenimiento del motor.

### 1.1.2. Turbina en configuración de mariposa o de doble flujo

En la Figura 1.1 se muestra el rotor de una determinada máquina. Contéstese brevemente a estas preguntas:

- a) ¿De qué máquina se trata? Clasificarla atendiendo a cuatro criterios diferentes.
  - b) Dibujar un pequeño esquema en el que se muestre por dónde entra el fluido en la máquina y cómo evoluciona a lo largo de ella.
  - c) Mediante ese diseño y configuración se buscan dos objetivos: ¿cuáles son?
- a) En la imagen se observa un rotor de gran tamaño, formado por dos conjuntos de coronas de álabes ubicados de manera simétrica. Ésta es una configuración típica de las turbinas de vapor de baja presión, denominada *configuración en mariposa* o de doble flujo. Se trata, por tanto, de una turbina de vapor, con lo que se puede clasificar de la siguiente manera:
- Máquina térmica, puesto que opera con un fluido que varía su densidad a su paso por la máquina.



*Figura 1.1: Rotor de una máquina.*

- Turbomáquina (en contraposición a máquina volumétrica o de desplazamiento positivo), puesto que es de flujo continuo.
  - Motora, puesto que en ella se extrae energía al fluido para obtenerla como energía mecánica en el eje de la máquina.
  - Axial, dado que el fluido circula en la máquina paralelamente al eje de la misma.
- b) El esquema de circulación del flujo se muestra en la Figura 1.2. Se puede observar que el flujo entra por el plano de simetría de la turbina y, tras dividirse en dos, se desplaza en la dirección del eje, saliendo por ambos extremos.
- c) Los dos objetivos buscados se detallan a continuación:
- A su paso por la turbina, el vapor confiere al rotor no sólo un movimiento de rotación, sino también esfuerzos axiales (debido a diferencias de presión entre las dos caras de los álabes, especialmente en escalonamientos de reacción) que deben ser soportados por los cojinetes. Uno de los objetivos de la configuración de mariposa es precisamente compensar este empuje axial.
  - Durante la expansión el vapor incrementa mucho su volumen específico (debido a la disminución de presión y a la consecuente disminución de densidad), lo que origina que las secciones de paso deban ser cada vez más grandes, lo que se consigue utilizando álabes que son cada vez más largos a medida que el fluido se acerca al final de la expansión. La configuración de mariposa, al dividir el caudal en dos, permite que las dimensiones de

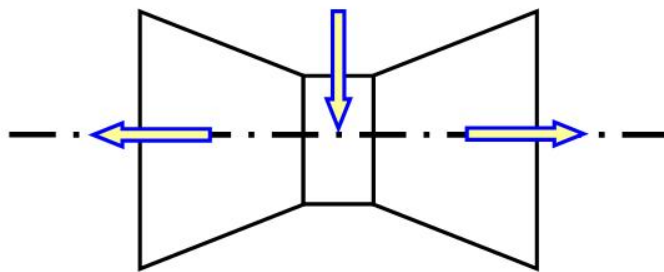


Figura 1.2: Esquema de circulación del flujo de vapor en una turbina de configuración de mariposa.

los álabes sean más “practicables”, especialmente en la etapa final de la expansión, evitando problemas mecánicos debido a esfuerzos centrífugos, flexión o vibración de los álabes.

### 1.1.3. Motores de combustión interna y externa

Discutir de manera ordenada las ventajas e inconvenientes que tienen los motores de combustión interna y externa en relación el uno con el otro.

En un motor de combustión interna, la combustión tiene lugar en el seno del propio fluido de trabajo, cambiando su composición química a su paso por el motor, mientras que en uno de combustión externa la combustión tiene lugar en un fluido que no es el de trabajo, recibiendo éste el calor a través de un intercambiador de calor. Las ventajas o inconvenientes de un motor de combustión interna (por ejemplo una turbina de gas) en contraposición a uno de combustión externa (como por ejemplo una turbina de vapor) son los siguientes:

- Al realizar la combustión en el seno del propio fluido de trabajo no es necesario el uso de un intercambiador de calor para incrementar la energía del fluido. Esto tiene principalmente dos consecuencias positivas:
  - a) El aporte de calor al fluido de trabajo es efectivo al 100 %, puesto que todo el calor que se libera en la combustión está ya disponible en el fluido de trabajo.
  - b) El motor sale mucho más compacto, pues todo intercambio de calor requiere una superficie de contacto relativamente grande para que éste sea efectivo.
- Debido a que la combustión es interna, y que por tanto los productos de la combustión circulan por algunos elementos del motor, es necesario asegurar una combustión de buena calidad, para lo que el combustible ha de ser de calidad elevada. La ventaja que esto tiene es que la combustión es más limpia (de mejor calidad y con menos emisiones contaminantes, especialmente hollín y otros contaminantes sólidos), mientras que se tiene el inconveniente de que se

está muy limitado en el tipo de combustible a usar (por lo general únicamente se pueden utilizar combustibles caros).

En referencia a esto, un motor de combustión externa tiene la ventaja de que puede funcionar con cualquier combustible (por ejemplo, la biomasa), permitiendo incluso el aprovechamiento de calores residuales (los gases de escape de una turbina de gas, por ejemplo, tal y como se efectúa en un ciclo combinado).

- Al tener lugar la combustión en el seno del propio fluido de trabajo, dado que el tiempo de residencia de éste en el interior de la cámara de combustión es reducido (esto viene impuesto por la necesidad de que exista un caudal de fluido elevado para que el motor desarrolle una potencia elevada), el tiempo disponible para la combustión es pequeño, con lo que puede existir el riesgo de tener una combustión incompleta. Por otro lado, si bien en el punto anterior se ha hecho alusión a que la combustión suele ser más limpia en los motores de combustión interna, también es cierto que suele haber más restricciones en el uso de sistemas de post-tratamiento de los productos de la combustión, puesto que (1) necesariamente la temperatura de los gases será más baja (ya que los gases de la combustión son el fluido de trabajo, que se expande antes de finalizar el ciclo), lo que afecta fuertemente al rendimiento de éstos sistemas, y (2) no se puede añadir sustancias que permitirían purificar los gases de escape (por ejemplo, para desulfurar, como se hace en determinadas calderas), ya que podrían dañar componentes mecánicos del motor al circular por el interior de ellos.
- Finalmente otra consecuencia que tiene el hacer la combustión de manera interna es que el ciclo ha de ser forzosamente abierto, puesto que el fluido que sale es distinto al que había entrado (se ha transformado en el interior del motor, cambiando sus propiedades físico-químicas). Por tanto, en un motor de combustión interna el fluido de trabajo se está renovando continuamente, mientras que en uno de combustión externa el fluido de trabajo es siempre el mismo (aquí sí que existe un ciclo cerrado). Esto puede tener un aspecto positivo y otro negativo. El *aspecto negativo* es que al tomar siempre un fluido del exterior (usualmente aire), es necesario utilizar continuamente un sistema de purificación del mismo (un filtro de aire, por ejemplo), que requiere un mantenimiento permanente. Esto en principio no hace falta usarlo en un motor de combustión externa (aunque sí se utiliza algún sistema paralelo, si bien requiere menos mantenimiento). El *aspecto positivo* es que, al estar renovando continuamente el fluido de trabajo, no existen problemas de degradación del mismo, pues no permanece en el interior del motor el tiempo suficiente como para que esto llegue a ocurrir. En contraposición a esto, en un motor de combustión externa el fluido de trabajo es siempre el mismo (por ejemplo el agua en un ciclo de turbina de vapor), y se ha de someter a una serie de tratamientos químicos para evitar su degradación y la corrosión de los elementos internos del motor.

#### 1.1.4. Aprovechamiento de la energía

Una de las aplicaciones de la turbina de gas es la cogeneración (si bien también se utilizan otros tipos de motores para esta aplicación). Comentar

en qué consiste esta aplicación, así como el fundamento del aprovechamiento energético asociado a ella.

Como su nombre indica, la cogeneración hace referencia a la generación simultánea de dos tipos de energía, que habitualmente son la eléctrica y la térmica. En determinadas industrias en las que existe una importante demanda de estos dos tipos de energía, la solución tradicional consiste en comprar, por un lado, la energía eléctrica, y por otro algún combustible fósil para obtener energía térmica a través de una caldera. La cogeneración ofrece una manera más ingeniosa y eficiente de afrontar el problema.

En efecto, como la producción de energía eléctrica (que pasa por la obtención de energía mecánica) mediante un motor de combustión cualquiera, inevitablemente conlleva una cesión de calor (a más baja temperatura que el aporte de calor), si estamos interesados en producir energía mecánica (para después producir electricidad) y energía térmica simultáneamente, es mucho más inteligente utilizar un motor térmico para producir la electricidad que se necesita, utilizando después el calor residual para abastecer la demanda de energía térmica. Esto es lo que se consigue con la cogeneración que, como se puede ver, plantea una *solución de conjunto* para ambas demandas energéticas a la vez.

El concepto de cogeneración se incluye dentro de otro concepto más general que se denomina *poligeneración*. La poligeneración hace referencia a generar varias formas de energía a partir de una única fuente. Dentro de la poligeneración, si bien lo más extendido es la cogeneración, también es muy importante la trigeneración, que es la producción simultánea de electricidad, calor y frío. En este caso, esta última forma de energía (el frío) se consigue a través de máquinas de absorción, que funcionan con el calor residual del motor térmico que ha servido para la producción de electricidad.

Para finalizar, conviene subrayar que, como se puede observar, estas técnicas contribuyen a incrementar el rendimiento energético de manera global, si bien para la industria que haga uso de ella supone una inversión inicial que no es en absoluto despreciable. Por esta razón existen ciertas subvenciones por parte de las entidades públicas (como norma general, aunque últimamente las cosas están cambiando), para así estimular la implantación de estos sistemas por parte de las empresas particulares y así mejorar el rendimiento energético en su conjunto.

### 1.1.5. Miscelánea

Indicar si las siguientes afirmaciones son ciertas o falsas, justificando la respuesta:

- a) Todas las máquinas térmicas generadoras producen trabajo útil, generalmente a través de un eje.
- b) En las máquinas térmicas la energía se obtiene principalmente por la variación de la energía cinética del fluido que las atraviesa.

- c) Todos los motores de combustión interna trabajan según un ciclo abierto.
  - d) En las máquinas volumétricas, el flujo del fluido que las atraviesa es continuo.
  - e) Los motores turbina de vapor no se emplean en automoción por su baja potencia.
- a) Esto es **falso**. En una máquina generadora (que es lo opuesto a una máquina motora) no se produce trabajo, sino que se absorbe. Es necesario darle energía a la máquina (en forma de trabajo), para que ésta la transfiera al fluido.
- b) La afirmación es **falsa**. En las máquinas térmicas, como en cualquier otra máquina de fluido, existe un intercambio de energía (en general, no únicamente cinética) entre el fluido y la máquina. A modo de ejemplo, en una turbina el fluido entra a elevada presión pero prácticamente sin energía cinética, y sale a baja presión y también casi sin energía cinética. Lo que se ha aprovechado es la *energía total* del fluido, principalmente térmica (asociada a la presión y a la temperatura) y en menor medida cinética, no únicamente esta última.
- c) Esta afirmación sí es **cierta**. En efecto, por el hecho de que el motor es de combustión interna, existe una transformación química del fluido de trabajo, de manera que no puede reaprovecharse para iniciar nuevamente el ciclo. Un motor de estas características, por tanto, forzosamente debe operar en ciclo abierto.
- d) La afirmación es **falsa**. Las máquinas volumétricas (o de desplazamiento positivo) trabajan con porciones definidas de fluido, de manera que “trocean” (o aíslan momentáneamente) el flujo. Las únicas máquinas que operan con flujo continuo son las turbomáquinas.
- e) La afirmación es totalmente **falsa**. Si bien es cierto que el motor turbina de vapor no se utiliza en automoción, la razón no es, en absoluto, porque sean de baja potencia; al contrario, los motores de turbina de vapor son, de entre todos los tipos de motores existentes, los que más potencia son capaces de dar. La razón por la que no se usan en automoción es por el enorme tamaño que tienen, lo que los hace poco prácticos para esta aplicación.

## 1.2. Problemas

### 1.2.1. Consumo de una central de carbón

Se conocen los siguientes datos de la central de ENDESA ubicada en Andorra (Teruel):

- Combustible utilizado: carbón de tipo lignito, con un poder calorífico inferior (*PCI*) de  $28400 \text{ kJ/kg}$  y una densidad de  $1050 \text{ kg/m}^3$ .

- Tiene 3 grupos de turbinas de vapor de 362  $MW$  cada uno.
- El rendimiento de la central es de un 23.6 %<sup>1</sup>.

Se pide calcular el consumo diario de carbón para hacer funcionar la central, teniendo en cuenta que está funcionando las 24 horas del día.

¿Cuál sería el consumo diario si la central operara con queroseno, que tiene un  $PCI$  de 43400  $kJ/kg$ , si en este caso la central tuviera un rendimiento de un 35 %<sup>2</sup>?

El primer parámetro a calcular es la potencia total que produce la central. Al tratarse de 3 grupos de 362  $MW$ , en total son 1086  $MW$ , con lo que estamos hablando de una central de gran tamaño. Teniendo en cuenta el rendimiento de la central, se puede determinar la potencia térmica que se aporta con la combustión:

$$\eta = \frac{N_{\text{eléctrica}}}{N_{\text{combustión}}} \quad \Rightarrow \quad N_{\text{combustión}} = 4601.7 \text{ MW} \quad (1.1)$$

Esta potencia es la que se libera durante el proceso de combustión en la caldera. Conociendo la energía por unidad de masa que encierra el combustible (el  $PCI$ ) se puede determinar el caudal másico de combustible:

$$N_{\text{combustión}} = \dot{m}_F \cdot PCI \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_F = 162 \text{ kg/s} \quad (1.2)$$

Con este caudal másico, en un día se consumen ¡¡14000  $Tn$  de carbón!!

En el caso de operar con queroseno, los valores que salen son, obviamente, menores:

- $N_{\text{combustión}} = 3102.9 \text{ MW}$ .
- $\dot{m}_F = 71.5 \text{ kg/s}$ .
- 6177  $Tn$  de combustible diarias.

A la vista de estos resultados caben estos comentarios:

- El uso de combustibles de mayor calidad supone una reducción en el consumo, si bien un mayor coste económico (esta es la razón básica por la que esa central opera, de hecho, con carbón).

<sup>1</sup>Este rendimiento es tan bajo porque el carbón que se recibe ha de ser triturado antes de ser usado en la caldera, y este proceso consume mucha energía.

<sup>2</sup>El rendimiento ahora sería mayor por el hecho de estar utilizando un combustible de mucha mayor calidad, no siendo necesario ningún gasto de energía para preparar el combustible para su uso, que es lo que ocurría en el caso anterior. No obstante, si bien en este caso queda justificado que existirá un aumento en el rendimiento, los valores concretos que se han propuesto aquí no tienen porque ser del todo realistas.

- En aplicaciones en las que el factor peso es importante (como, por ejemplo, la aeronáutica), es de gran interés usar esos combustibles de alta calidad. De hecho, el queroseno es el combustible que se utiliza en las turbinas de gas de aviación.
- El orden de magnitud del consumo de una central térmica es astronómico... 14000 toneladas diarias de carbón son ¡¡350 camiones de 40 toneladas cada uno!!



# Capítulo 2

## Estudio termodinámico de turbomáquinas

### Contenido

---

<b>2.1. Cuestiones . . . . .</b>	<b>12</b>
2.1.1. Escalonamiento turbina axial . . . . .	12
2.1.2. Rendimientos en una turbina . . . . .	13
2.1.3. Rendimientos en un compresor . . . . .	15
2.1.4. Comparación de rendimientos de turbinas y compresores .	17
2.1.5. Grado de reacción . . . . .	17
2.1.6. Expresiones de la ecuación de la energía . . . . .	18
2.1.7. Trabajo de las fuerzas centrífugas . . . . .	19
2.1.8. Proceso de compresión/expansión en un estátor . . . . .	20
2.1.9. Triángulos de velocidades en escalonamientos de turbinas axiales . . . . .	21
2.1.10. Comparación turbina axial y radial . . . . .	25
2.1.11. Escalonamientos en turbocompresor axial . . . . .	27
2.1.12. Miscelánea . . . . .	28
<b>2.2. Problemas . . . . .</b>	<b>29</b>
2.2.1. Turbina axial de $h$ constante en el rotor (I) . . . . .	29
2.2.2. Turbocompresor axial (I) . . . . .	32
2.2.3. Turbina de dos escalonamientos (I) . . . . .	35
2.2.4. Turbina radial (I) . . . . .	38
2.2.5. Turbina axial de $h$ constante en el rotor (II) . . . . .	40
2.2.6. Turbina de dos escalonamientos (II) . . . . .	43
2.2.7. Motor turbina de gas . . . . .	46
2.2.8. Turbina radial (II) . . . . .	48
2.2.9. Turbocompresor axial (II) . . . . .	51
2.2.10. Turbocompresor axial (III) . . . . .	54
2.2.11. Turbina axial de $p$ constante en el rotor . . . . .	57
2.2.12. Turbina de tres escalonamientos . . . . .	60
2.2.13. Turbocompresor radial . . . . .	63

---

## 2.1. Cuestiones

### 2.1.1. Escalonamiento turbina axial

Represéntese cualitativamente en un diagrama  $h-s$  la evolución de un gas en un escalonamiento de una turbina axial con entalpía constante en el rotor, representando en él todas las magnitudes relevantes. ¿Cuál es el grado de reacción del escalonamiento?

Un escalonamiento de turbina axial con entalpía constante en el rotor es un escalonamiento de acción, con lo que toda la expansión del fluido tiene lugar, principalmente, en el estátor. El diagrama correspondiente se muestra en la Figura 2.1. A la vista del diagrama se pueden hacer los siguientes comentarios:

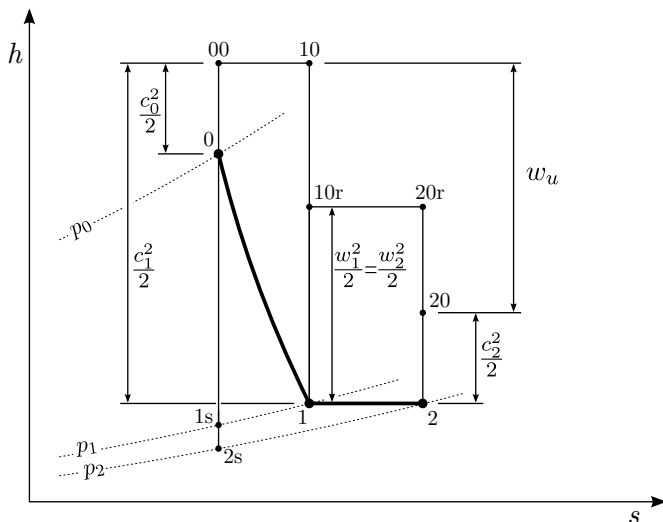


Figura 2.1: Diagrama  $h-s$  de un escalonamiento de turbina axial con entalpía constante en el rotor.

- Los puntos de parada correspondientes a cada punto se corresponden con las condiciones que se tendrían tras haber parado, de manera adiabática y reversible, el flujo (para lo que se haría uso de un difusor ideal). Estos puntos se obtienen, entonces, de la siguiente manera: a la entalpía del punto se le suma la energía cinética ( $c^2/2$ ), y el punto se ubica en la misma vertical (es decir, a entropía constante, puesto que se asume que el proceso de parada es adiabático y reversible).
- En el estátor tiene lugar la expansión del fluido (se reduce, por tanto, su presión), pero la energía total del mismo se conserva. Por esta razón, si bien el punto 1 se encuentra en una isóbara más baja que el punto 0 (y por tanto  $h_1$  es menor que  $h_0$ ), los puntos de parada están en la misma altura (tienen la misma entalpía de parada). Esto implica que la energía cinética en 1 es mucho mayor que en 0, lo que concuerda perfectamente con el hecho de que se está expandiendo el fluido.

- El punto 2 está a una presión ligeramente inferior que el punto 1. Esto quiere decir que para mantener la entalpía del fluido, éste se ha tenido que expandir ligeramente. Esto se puede justificar de la siguiente manera: si el proceso hubiera sido a presión constante (que es el otro escalonamiento de acción típico en turbinas),  $h_2$  hubiera crecido debido a los rozamientos del fluido, los cuales tienden a elevar su temperatura (y, como se justificará después, la velocidad relativa habría disminuido por esta misma causa). Para evitar que suba la temperatura, la solución es expandir un poco el fluido, con el fin de que la temperatura se mantenga.
- El trabajo útil del escalonamiento es la diferencia entre la entalpía de parada a la entrada y a la salida, y es un trabajo que se obtiene en el rotor del escalonamiento.
- Al tratarse de un escalonamiento axial las velocidades de arrastre son iguales. Por esta razón, en la ecuación de la energía para la referencia móvil no existe el término asociado al trabajo de las fuerzas centrífugas. Por tanto, se da la conservación de la entalpía de parada relativa. Esto, junto al hecho de que el rotor tenga entalpía constante, implica que tanto  $w_1$  como  $w_2$  sean iguales. Este resultado es totalmente coherente: si en el rotor no se da prácticamente expansión (puesto que el escalonamiento es de acción) la velocidad relativa se ha de mantener constante en el rotor (es como si el observador se ubicase en la referencia móvil: en esa referencia no existe trabajo en el rotor, con lo que para el observador es como si fuera un estátor; si no hay expansión “útil” en ese elemento, la velocidad –relativa– se ha de mantener constante).
- La ubicación de los puntos de parada relativos ha de ser de manera que en el punto 1 la velocidad relativa sea inferior a la absoluta, y en el punto 2 la relativa sea superior a la absoluta. La demostración de esta condición se podría realizar de manera teórica, pero ello sería un tanto elaborado. Alternativamente, en la Figura 2.8 mostrada en la página 24, ésta se puede demostrar cualitativamente a la vista del triángulo de velocidades del escalonamiento.

Finalmente, en cuanto al grado de reacción, éste compara el nivel de expansión que se da en el rotor con el que se da en todo el escalonamiento:

$$GR = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{20}} \quad (2.1)$$

Se puede observar que el grado de reacción es nulo, ya que  $h_1$  es idéntico a  $h_2$ , indicando que se trata de un escalonamiento de acción pura.

### 2.1.2. Rendimientos en una turbina

Considérese un escalonamiento de turbina. Se pide:

- Dibujar en un diagrama  $h$ - $s$  el proceso global en el escalonamiento (entre la entrada del estátor y la salida del rotor).



**Para seguir leyendo haga click aquí**