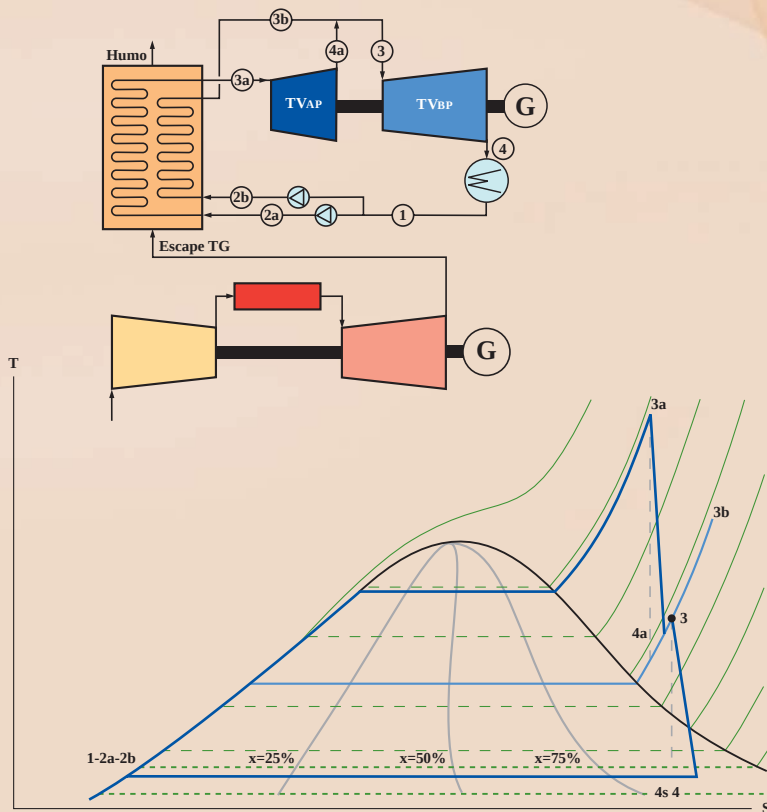


Máquinas Térmicas

Marta Muñoz Domínguez

Antonio José Rovira de Antonio



Máquinas Térmicas

MARTA MUÑOZ DOMÍNGUEZ
ANTONIO JOSÉ ROVIRA DE ANTONIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

MÁQUINAS TÉRMICAS

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamos públicos.

© Universidad Nacional de Educación a Distancia
Madrid 2014

www.uned.es/publicaciones

© Marta Muñoz Domínguez y Antonio José Rovira de Antonio

Todas nuestras publicaciones han sido sometidas a un sistema de evaluación antes de ser editadas.

ISBN electrónico: 978-84-362-6886-7

Edición digital: marzo de 2014

ÍNDICE

PREFACIO

BLOQUE TEMÁTICO I GENERALIDADES

CAPÍTULO 1. MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS. GENERALIDADES

CAPÍTULO 2. PROCESOS EN FLUÍDOS COMPENSIBLES

CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

**CAPÍTULO 4. COMBUSTIBLES EMPLEADOS EN SISTEMAS Y MOTORES
TÉRMICOS**

BLOQUE TEMÁTICO II MÁQUINAS Y MOTORES VOLUMÉTRICOS

**CAPÍTULO 5. GENERALIDADES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN IN-
TERNA ALTERNATIVOS**

**CAPÍTULO 6. EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LOS MOTORES DE
ENCENDIDO PROVOCADO Y EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR
COMPRESIÓN**

CAPÍTULO 7. COMPRESORES VOLUMÉTRICOS

BLOQUE TEMÁTICO III PLANTAS DE POTENCIA BASADAS EN TURBOMÁQUINAS

CAPÍTULO 8. TURBINAS DE GAS PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIA MECÁNICA I

CAPÍTULO 9. TURBINAS DE GAS PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIA MECÁNICA II

**CAPÍTULO 10. INSTALACIONES DE POTENCIA BASADAS EN TURBINAS
DE VAPOR**

CAPÍTULO 11. INSTALACIONES DE CICLO COMBINADO GAS-VAPOR

BLOQUE TEMÁTICO IV TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS

CAPÍTULO 12. CONCEPTOS BÁSICOS GENERALES SOBRE TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS

CAPÍTULO 13. TURBINAS AXIALES

CAPÍTULO 14. COMPRESORES AXIALES

ANEXOS

ANEXO I. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN EN EQUILIBRIO QUÍMICO

A1.1. Cinética química y constantes de equilibrio

A1.2. Cálculo de la composición de los productos de la combustión suponiendo equilibrio químico

ANEXO II. EFICIENCIA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE SUPERFICIE.

ANEXO III. CORRELACIONES DE PERDIDAS EN TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS

A3.1. Turbinas axiales

A3.2. Turbocompresores axiales

ANEXO IV. TABLAS DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y ENTALPÍAS DE FORMACIÓN

BIBLIOGRAFÍA

LISTA DE SÍMBOLOS

Volver pág. ant.

PREFACIO

El presente texto se ha elaborado con el objetivo de constituir el material base que debe permitir, a los alumnos de la Universidad Nacional de Educación a Distancia, abordar el estudio de la asignatura *Máquinas Térmicas*, que se imparte en el Grado de Ingeniería Mecánica (4.º curso), en el Grado en Ingeniería Eléctrica (3.º curso) y en el Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (4.º curso). Se pretende, por tanto, que sea un material que permita al alumno asimilar los contenidos de manera autónoma, sin requerir las explicaciones de un profesor, para lo cual el presente texto se apoya en un manual de ejercicios prácticos: *Problemas resueltos de Máquinas y Motores Térmicos*, también editado por la UNED y en el manual *Prácticas Virtuales de Ingeniería Térmica*¹.

La asignatura *Máquinas Térmicas* se dedica al estudio de la generación de energía térmica a través del proceso de combustión, así como al análisis de las características de diseño de los equipos en los que se aprovecha la energía térmica generada, prestando especial atención al estudio de las plantas de potencia y los motores térmicos.

Dentro del plan de estudios, la presente asignatura forma parte de la materia denominada Ingeniería Térmica. Esta materia incluye asimismo a la asignatura Termodinámica, y en el caso de los Grados en Ingeniería Mecánica y en Ingeniería en Tecnologías Industriales, también incluye la asignatura Termotecnia. Dichas asignaturas son previas en el diseño del plan de estudios.

Para valorar la importancia que tienen para la sociedad los contenidos abordados en Máquinas Térmicas, cabe destacar que en la actualidad la gran mayoría de la energía mecánica y eléctrica consumida en el mundo se genera a través de motores térmicos. Por el momento, en la mayoría de los casos,

¹ N. García Herranz, M. Muñoz Domínguez, *Prácticas virtuales de Ingeniería Térmica*, Colección Cuadernos de Prácticas UNED 2005.

la energía generada proviene de la energía primaria asociada a los combustibles fósiles, a través de un proceso de combustión, pero no hay que olvidar que, aunque todavía con menor incidencia, otras fuentes de energía renovables también generan fluidos con elevada energía térmica que se transforma en energía mecánica en un motor térmico (biocombustibles, energía solar térmica y energía geotérmica). Asimismo en el caso de la energía nuclear, la energía liberada en el reactor es evacuada por un fluido que adquiere un elevado nivel térmico y se aprovecha posteriormente en una planta de potencia de las estudiadas en esta materia. De todo ello se desprende la importancia de la presente asignatura, que aborda el diseño y principio de funcionamiento de las máquinas y motores encargados de transformar la energía térmica generada a partir de diferentes fuentes de energía primaria en energía mecánica y eventualmente, a través de un alternador, en energía eléctrica.

Estructura del texto. Breve análisis del contenido

La materia está estructurada en cuatro bloques temáticos. El primer bloque temático, que podría denominarse «generalidades», está constituido por cuatro capítulos. Comienza con un capítulo en el que se presenta una panorámica general de los distintos tipos de máquinas y motores térmicos, destacando algunas diferencias básicas en su principio de funcionamiento y revisando los principales campos de aplicación en cada caso. Se trata de poner de manifiesto el papel fundamental que juegan los motores térmicos en el contexto de las transformaciones energéticas.

A continuación se incluye un capítulo, al que se ha denominado *procesos en fluidos compresibles*, en el que se revisan los conceptos que se consideran fundamentales para llegar a entender, en profundidad, el principio de funcionamiento de los equipos y las máquinas térmicas que se estudian en la asignatura, así como de los ciclos en las que éstos intervienen. Estos conceptos previos imprescindibles se han debido abordar fundamentalmente en la asignatura previa de termodinámica, aunque también es conveniente haber cursado con anterioridad una mecánica de fluidos básica y transmisión de calor o termotecnia. No obstante, con el objetivo de facilitar el estudio y de poner de relieve qué conocimientos son indispensables para asimilar adecuadamente la materia, se ha incluido este segundo capítulo de

repaso. En cualquier caso, si el alumno comprueba que sus lagunas en los conocimientos previos requeridos son importantes y no le es suficiente con estudiar dicho capítulo del texto base, deberá recurrir a manuales específicos de termodinámica, mecánica de fluidos y transmisión de calor, donde estos conceptos se expliquen de forma más detallada.

En el tercer capítulo de este primer bloque se analizan los distintos tipos de procesos de combustión desde una perspectiva general. Dicho capítulo pretende servir de referencia para el estudio de los equipos concretos en los que tiene lugar el proceso de combustión: motores de combustión interna alternativos, cámaras de combustión y calderas, e incluye una primera parte en la que se presentan los fundamentos de básicos de la combustión. Para terminar este bloque temático, el capítulo 4 revisa las propiedades fundamentales de los diferentes combustibles que liberan su energía mediante un proceso de combustión, comenzando por acometer una clasificación de los mismos atendiendo a distintos criterios.

El segundo bloque temático está dedicado a las máquinas y motores volumétricos: los motores de combustión interna alternativos (capítulos 5 y 6) y los compresores volumétricos (capítulo 7). En relación con los primeros, no obstante, sólo se presentan los conceptos fundamentales que consideramos que es imprescindible que conozca un futuro Graduado en Ingeniería, entre los que cabe destacar: clasificación de los motores de combustión interna alternativos atendiendo a diferentes criterios, ciclos de trabajo, curvas características y particularidades de los procesos de combustión en los motores de encendido provocado y en los motores de encendido por compresión. El alumno que tenga interés por esta materia tendrá ocasión de profundizar en el diseño de estos motores cursando la asignatura optativa: *Motores de Combustión Interna*.

El segundo bloque temático finaliza con el estudio de los distintos tipos de compresores volumétricos, máquinas térmicas generadoras que se utilizan en muy variadas aplicaciones. Ha parecido conveniente acometer el estudio de estas máquinas a continuación de los motores de combustión interna alternativos dado que una parte importante del capítulo se dedica al análisis de los compresores de tipo alternativo, que tienen ciertos parámetros y aspectos de diseño en común con los anteriores.

El tercer bloque temático, más homogéneo en contenido, consta de cuatro capítulos que se dedican al estudio de las turbinas de gas (capítulos 8 y

9) incluyendo ciertas nociones sobre cámaras de combustión, las instalaciones de potencia basadas en turbinas de vapor (capítulo 10) incluyendo la descripción de las calderas asociadas y las plantas de ciclo combinado gas-vapor (capítulo 11), haciendo referencia, en este caso, a las calderas de recuperación de calor.

El cuarto y último bloque temático se dedica al análisis del principio de funcionamiento y criterios básicos de diseño de las turbomáquinas térmicas —turbinas y compresores— (capítulos 12, 13 y 14). Se trata de dar una visión general, profundizando, en cierta medida, en el diseño de las turbomáquinas de tipo axial, que son las más empleadas.

Por último, cabe resaltar que, como se ha mencionado anteriormente, el presente texto está especialmente diseñado para estudiantes que pretenden abordar el estudio de la asignatura de manera autónoma. Para lograr este objetivo se han establecido los objetivos fundamentales de los distintos capítulos al inicio de éstos y se insiste de manera particular en las conclusiones más importantes a lo largo de los diferentes temas. Asimismo, el texto incluye 56 ejemplos, de diversa extensión, insertados en los distintos capítulos, explicados paso a paso, de forma que el texto incluye aproximadamente 95 páginas en total dedicadas a este fin.

BLOQUE TEMÁTICO I

GENERALIDADES

Capítulo 1. MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS. GENERALIDADES

Marta Muñoz Domínguez

Capítulo 2. PROCESOS EN FLUJOS COMPRESIBLES

Marta Muñoz Domínguez

Capítulo 3. FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

Marta Muñoz Domínguez

**Capítulo 4. COMBUSTIBLES EMPLEADOS EN SISTEMAS Y MOTORES
TÉRMICOS**

Antonio J. Rovira de Antonio

Capítulo 1

Máquinas y motores térmicos. Generalidades

Objetivos fundamentales del capítulo

1.1. Introducción

1.2. Concepto de máquina térmica

1.2.1. Clasificación de las máquinas de fluido

1.2.2. Distinción entre máquina hidráulica y máquina térmica

1.2.3. Clasificación de las máquinas térmicas

1.3. Motores térmicos de combustión interna y de combustión externa. Distinción entre máquina térmica y motor térmico

1.4. Rendimiento de los motores térmicos

1.4.1. Rendimiento del ciclo y rendimiento de la instalación

1.4.2. Rendimiento exergético

1.5. Cogeneración

1.6. Campos de aplicación de los motores térmicos

OBJETIVOS FUNDAMENTALES DEL CAPÍTULO

- Distinguir entre máquina hidráulica y máquina térmica
- Distinguir entre máquina térmica motora y motor térmico.
- Entender la diferencia entre motor de combustión interna y externa.
- Que el alumno tenga clara la clasificación de las máquinas térmicas y los motores térmicos, entendiendo en qué se diferencian unos tipos de otros en cuanto a su principio de funcionamiento y esquema constructivo.
- Conocer cómo se define el rendimiento en el caso de los motores de combustión externa y en el caso de los de combustión interna.
- Que el alumno conozca los principales campos de aplicación de los distintos tipos de motores y máquinas térmicas, así como las razones por las cuales entran en competencia en las distintas aplicaciones, pudiendo justificar cuáles son más idóneos en cada caso.
- Comprender el papel que juegan los equipos térmicos, generadores de vapor y cámaras de combustión, en las instalaciones de potencia.

1.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a presentar una panorámica general de los distintos tipos de máquinas y motores térmicos destacando algunas diferencias básicas en su principio de funcionamiento y revisando los principales campos de aplicación en cada caso. A pesar de que este capítulo se lee con cierta facilidad lo cierto es que algunas de las ideas que se presentan no se asimilan correctamente si no se repasan ciertos conceptos estudiados en Termo-

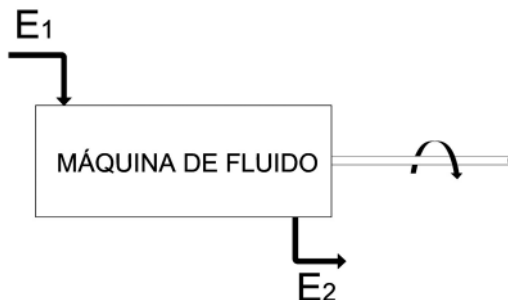


Figura 1.1. Esquema de máquina de fluido.

dinámica, algunos de los cuales se han sintetizado en el capítulo 2. Por otra parte, las razones por las cuales, por ejemplo, unos tipos de motores son más adecuados para determinados campos de aplicación, no se entenderán en profundidad hasta que no se haya abordado el estudio del fundamento y diseño de las máquinas y motores térmicos que se realiza en posteriores capítulos. No obstante, ha parecido conveniente empezar el estudio con este capítulo de generalidades, si bien se considera imprescindible volver sobre el mismo una vez estudiado el resto de la materia, ya que al releerlo, se analizará, sin duda, con otra perspectiva.

1.2. CONCEPTO DE MÁQUINA TÉRMICA

1.2.1. Clasificación de las máquinas de fluido

Antes de exponer el concepto de *máquina térmica* es conveniente aclarar que estas máquinas están englobadas dentro de un conjunto de máquinas más amplio, bajo la denominación de *máquinas de fluido*. Se va a empezar por indicar qué se entiende por máquina de fluido para poner de manifiesto qué particularidades tienen las máquinas térmicas que las distinguen de otro tipo de máquinas de fluido.

Se denomina *máquina de fluido* a toda máquina por la que circula un fluido (fluido de trabajo) de forma que el conjunto de elementos que la constituyen permiten que se realice un intercambio de energía mecánica con el exterior, generalmente a través de un eje, por variación de la energía disponible en el fluido que atraviesa la máquina.

Las máquinas de fluido se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios:

- *Dependiendo de si el fluido disminuye o aumenta su energía a su paso por la máquina:*

— *Motoras $E_1 > E_2$*

El fluido disminuye su energía¹ a su paso por la máquina, y en consecuencia se obtiene energía mecánica aprovechable en forma de par motor en el eje de la máquina.

Ejemplos: turbina térmica, turbina hidráulica, máquina de vapor.

— *Generadoras $E_1 < E_2$*

El fluido aumenta su energía a su paso por la máquina debido a que la máquina absorbe energía mecánica del exterior mediante un par de accionamiento.

Ejemplos: bomba centrífuga, compresor axial, compresor alternativo, compresor rotativo de paletas, etc.

- *Dependiendo si el fluido de trabajo es incompresible o compresible:*

— *Máquinas hidráulicas $\rho_1 \cong \rho_2$*

El fluido que evoluciona por la máquina es incompresible o se comporta como tal, lo que tiene importantes implicaciones, como se pone de manifiesto en el epígrafe siguiente.

Ejemplos: bomba, turbina hidráulica, ventilador.

— *Máquinas térmicas $\rho_1 \neq \rho_2$*

El fluido que evoluciona por la máquina es compresible y varía su densidad de forma significativa al atravesar la máquina.

Ejemplos:

— *Motoras $\rho_1 > \rho_2$: turbina térmica, máquina de vapor.*

— *Generadoras $\rho_1 < \rho_2$: turbocompresor, compresor volumétrico de lóbulos, etc.*

¹ Desde otro punto de vista se podría decir que disminuye su exergía al atravesar la máquina.

- *Dependiendo de si el fluido circula de manera continua o en cada instante evoluciona una cantidad bien definida de fluido:*

— *Dinámicas o turbomáquinas*

Ejemplos: turbina, bomba centrífuga, turbocompresor.

— *Volumétricas o de desplazamiento positivo*

Ejemplos: bomba alternativa, compresor alternativo, compresor rotativo de paletas, compresor rotativo de tornillo, etc.

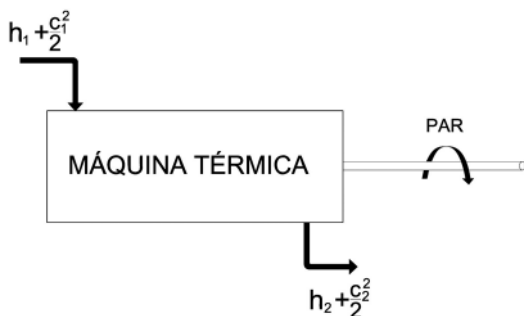


Figura 1.2. Ejemplo de máquina térmica dinámica.

1.2.2. Distinción entre máquina hidráulica y máquina térmica

Como puede verse, tanto las máquinas hidráulicas como las máquinas térmicas pueden ser motoras o generadoras, volumétricas o turbomáquinas; lo que diferencia a ambos tipos de máquinas es concretamente qué tipo de fluido, compresible o incompresible, evoluciona por su interior. En ese sentido hay que destacar que la compresibilidad del fluido juega un papel fundamental en el intercambio energético que tiene lugar entre el fluido compresible y el exterior, tal como se expone en el capítulo 2, basándose en la ecuación del Primer Principio de la Termodinámica. En los fluidos compresibles es posible transformar energía térmica en energía mecánica expandiendo el fluido, así como aumentar la energía térmica de un fluido, y por tanto su nivel de presión, comprimiendo el fluido. Como consecuencia de ello, al distinguir entre máquinas térmicas y máquinas hidráulicas se está diferenciando qué tipos de energías estarán presentes en el término que se ha denominado genéricamente «E», en la clasificación de las máquinas de fluido. Las máquinas térmicas utilizan *fluidos compresibles* y en ellas es

posible transformar parte de la energía térmica de estos fluidos en energía mecánica y viceversa; por tanto, «E» incluirá energía térmica y energía cinética, ya que la variación de la energía potencial entre la entrada y la salida de la máquina puede despreciarse. En los *fluidos incompresibles* esta transformación no es posible, de forma que sólo se podrá aprovechar su energía mecánica, en concreto su energía cinética. Por tanto, si a la entrada de una máquina hidráulica el fluido tiene una energía térmica asociada, que se puede incrementar por la fricción a su paso por la máquina, ésta no interviene en el intercambio energético y no será aprovechada.

1.2.3. Clasificación de las máquinas térmicas

- *Turbomáquinas o máquinas dinámicas (sistemas abiertos):*
 - *Máquinas motoras (turbinas):* Debido a la compresibilidad del fluido, dicho fluido transforma su energía térmica en energía cinética mediante un proceso de expansión. Dicha energía cinética será aprovechada para generar un par motor en el eje de la máquina.

Posteriormente, en el capítulo 13, se analizará cómo son las turbinas térmicas internamente, es decir, cuál es su diseño constructivo para que se pueda realizar esa transformación de energía térmica en energía mecánica y que a su vez, posteriormente, la energía mecánica se manifieste en forma de par motor en el eje de la máquina. Se puede, no obstante, anticipar que en este tipo de máquina, el fluido atraviesa en la mayoría de los casos conductos convergentes.

- *Máquinas generadoras (turbocompresores):* De forma análoga, un par de accionamiento conseguirá incrementar la velocidad del fluido y, debido a la compresibilidad de éste y al diseño específico de la máquina, esta energía cinética se transformará mediante un proceso de difusión (deceleración) en energía de presión, incrementándose, por tanto, su nivel térmico.

También tendrá el alumno ocasión de estudiar cuál es el diseño interno de estas máquinas (capítulo 14), pero se puede anticipar que en el caso de los turbocompresores, el fluido atraviesa a su paso por la máquina conductos en su mayoría divergentes.

- *Máquinas térmicas volumétricas (Sistemas cerrados):*
 - *Máquinas motoras (máquina de vapor):* Un fluido con elevada energía térmica, en concreto, vapor de agua, se introduce en la máquina y su elevada presión provoca el desplazamiento de un émbolo, generando un par motor debido al mecanismo biela-manivela. Al modificarse el volumen ocupado por el fluido en el proceso de expansión el fluido está disminuyendo su energía térmica, debido a su compresibilidad.
 - *Máquinas generadoras (compresores volumétricos):* El incremento de energía térmica (aumento de temperatura) y/o de *exergía* (aumento de presión)² se produce por disminución del volumen³, compresión que se realiza absorbiendo trabajo del exterior.

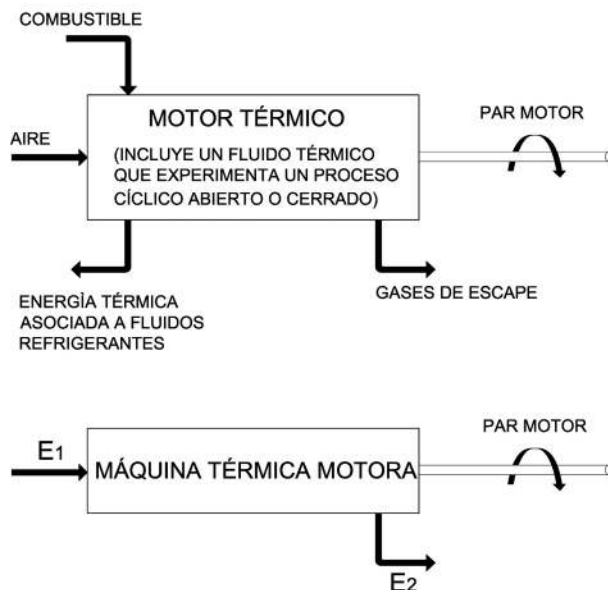


Figura 1.3. Esquema general de un motor térmico en contraposición al esquema de una máquina térmica motora.

² En un compresor refrigerado con compresión isoterma no se eleva la energía térmica del fluido, al permanecer la temperatura constante. Sin embargo, el incremento de presión a T constante disminuye la entropía, incrementándose en consecuencia la exergía.

³ En ciertos compresores volumétricos esto no es exactamente correcto como se tendrá ocasión de analizar en el capítulo 7.

1.3. MOTORES TÉRMICOS DE COMBUSTIÓN INTERNA Y DE COMBUSTIÓN EXTERNA. DISTINCIÓN ENTRE MÁQUINA TÉRMICA Y MOTOR TÉRMICO

La gran mayoría de las fuentes de energía primaria (combustibles fósiles, combustibles nucleares, biomasa, energía solar térmica y energía geotérmica) para ser aprovechadas transforman previamente su energía potencial en energía térmica asociada a un fluido de trabajo. Por ejemplo, la energía asociada a la estructura molecular de los combustibles fósiles o de la biomasa se libera en la mayor parte de los casos mediante un proceso de combustión, generándose gases con un elevado nivel térmico. En el caso de un reactor nuclear, la energía liberada por la fisión del núcleo del átomo del combustible nuclear es evacuada del reactor mediante un fluido refrigerante que adquiere una elevada energía térmica. En todos estos casos, será posible mediante una máquina térmica motora transformar dicha energía térmica asociada al correspondiente fluido de trabajo en energía mecánica utilizable.

Cuando el conjunto de elementos mecánicos que permiten obtener energía mecánica a partir del estado térmico de un fluido de trabajo incluye el equipo donde tiene lugar la generación de dicho estado térmico, a dicho conjunto de elementos se le denomina *motor térmico* o *planta de potencia*.

Es habitual que exista una confusión entre los conceptos de máquina térmica motora y de motor térmico. Cabe destacar que, en algunos casos el motor térmico incluye una o varias máquinas térmicas, mientras que en otros no es posible establecer tan claramente la distinción. Para esclarecer la cuestión es importante distinguir entre dos tipos de motores térmicos: *motores de combustión externa* y *motores de combustión interna*.

Motores de combustión externa

En estos motores el fluido experimenta un proceso cíclico cerrado que incluye, tanto el proceso en el que el fluido adquiere un elevado nivel térmico, como el proceso en el que se transforma la energía térmica adquirida en energía mecánica. Además, en este tipo de motores dichos procesos siempre tienen lugar en equipos diferentes; por ejemplo, el fluido adquiere su energía térmica en un intercambiador de calor, generador de vapor o caldera, siempre por transmisión de calor a través de una pared, y cede su energía térmica en una máquina térmica motora. Es importante resaltar que en

este tipo de motores el fluido térmico no interviene en el proceso de combustión, no experimentando, por tanto, transformación química, de ahí su denominación de *combustión externa*.

A los motores de combustión externa también se les denomina máquinas térmicas cíclicas⁴ o motores caloríficos, porque el fluido de trabajo absorbe calor de un foco caliente y cede calor a un foco frío.

- *De fluido que se condensa en la instalación*

Un ejemplo de este tipo de motor puede ser el *ciclo de vapor de Rankine* que se analiza en el capítulo 10. En él, la energía liberada en el proceso de combustión se aprovecha para producir vapor en una caldera. Dicho vapor será el fluido de trabajo (también llamado fluido motor) que luego atravesará la turbina de vapor (máquina térmica motora) cediendo gran parte de su energía térmica, energía que se proyectará al exterior en forma de par motor en el eje de la turbina. El fluido motor no experimentará transformaciones químicas y evolucionará usualmente según un ciclo cerrado. En este caso, en el ciclo más elemental, para completar su evolución el fluido atravesará un condensador y una bomba para retornar de nuevo a la caldera en forma de agua líquida a alta presión.

La *instalación con máquina de vapor* es otro ejemplo de este tipo de motores, aunque en la actualidad está prácticamente en desuso.

- *De fluido que no se condensa*

Turbinas de gas de ciclo cerrado (capítulo 8): El fluido se comprime en un compresor, a continuación se calienta a expensas de un foco caliente, atravesando un intercambiador de calor, posteriormente se expande desarrollando trabajo en la turbina, parte del cuál se emplea en accionar el compresor, y finalmente el fluido retorna a su estado inicial cediendo calor a un foco frío en un segundo intercambiador de calor.

⁴ Es frecuente, especialmente en terminología inglesa, utilizar la denominación *máquina térmica cíclica* (*cyclic heat engine*), para denominar al conjunto de elementos que constituyen el motor térmico incluyendo sólo los tubos de la caldera (que recibirán calor del foco caliente) y los del condensador (que cederán calor al foco frío) y *planta de potencia* si se considera el conjunto de la caldera y el condensador.

Motores Stirling: Son motores de los denominados de combustión externa de tipo alternativo. El gas que evoluciona (por ejemplo, helio, nitrógeno, o simplemente aire) se calienta mediante una fuente de energía primaria y al expandirse en el interior del cilindro, desarrolla trabajo. Posteriormente debe ceder energía térmica a un foco frío para reanudar el ciclo. Estos motores, muy poco utilizados industrialmente, están siendo utilizados en instalaciones solares térmicas con discos parabólicos. La luz solar recogida por el disco se concentra en su zona focal, donde se sitúa el motor, aprovechando dicha energía para calentar el fluido de trabajo.

Motores de combustión interna

En este tipo de motores son los propios reactantes y posteriormente gases de la combustión los que constituyen el fluido motor. Al sufrir transformaciones fisicoquímicas, el fluido motor no podrá evolucionar según un ciclo cerrado, dado que no puede retornar a su estado inicial. Sin embargo, dado que el fluido sí experimenta una secuencia de procesos que se repiten en el tiempo, su evolución podrá asimilarse a un ciclo termodinámico, que se denominará ciclo abierto, el cual incluye un proceso de admisión de aire fresco y combustible, así como un proceso de escape de los productos de la combustión, una vez que han cedido buena parte de su energía térmica, transformándola en par motor. Por otra parte, el ciclo termodinámico básico incluye los procesos de compresión del fluido motor, determinante para la obtención de un elevado rendimiento, combustión y expansión.

A los motores de combustión interna también se les denomina motores adiabáticos porque, en principio, el fluido de trabajo no tiene por qué intercambiar calor con ningún otro fluido en el interior del motor⁵.

- *De tipo alternativo (MCIA)*

Los gases de resultantes de la combustión, con elevada energía térmica y nivel de presión, desplazan un pistón con movimiento alternativo, desarrollando potencia mecánica durante el proceso de expansión (*motores Otto o de encendido provocado (MEP) y diesel o de encendido por compresión (MEC)*) estudiados en los capítulos 5 y 6). En

⁵ La necesidad de refrigerar el cilindro, en el caso de los MCI alternativos, viene motivada por exigencias mecánicas: para controlar la dilatación de las piezas y la temperatura del aceite.

este caso no es posible distinguir la máquina térmica motora del motor térmico.

- Motores de encendido provocado, ciclo Otto (MEP)
- Motores de encendido por compresión, diesel (MEC)

- *De tipo rotativo*

- *Turbina de gas*: Los propios gases de la combustión se introducen directamente en la turbina (máquina térmica motora) para ceder su energía térmica y obtener potencia mecánica en el eje de la máquina. Antes de introducirse en la *cámara de combustión*, el aire comburente debe comprimirse en un compresor (máquina térmica generadora) para que luego dichos gases puedan expandirse en la turbina (capítulos 8 y 9).
- *Motor Wankel*: se trata de un motor rotativo volumétrico.

El principio de funcionamiento es en gran medida similar al de los motores MCIA, pero en este caso un rotor triangular de caras convexas gira de forma excéntrica en el interior de una cámara, de manera que los tres volúmenes libres existentes entre las caras del rotor y las paredes interiores de dicha cámara varían con el giro, permitiendo los procesos de admisión, compresión, expansión y escape. Son motores muy compactos que, sin embargo, tienen problemas a la hora de conseguir la necesaria estanqueidad y una correcta lubricación, por lo que tienen la desventaja, frente a los de tipo alternativo, de un elevado consumo de aceite, además de mayores emisiones contaminantes.

- *De reacción*

Los gases de la combustión transforman parte de su energía térmica en energía mecánica, pero ésta no se manifiesta en forma de par motor en un eje sino en forma de energía cinética, obteniéndose una propulsión por chorro debido a la salida de los gases de la combustión a gran velocidad debido a su expansión en una tobera.

- *Motores cohete*

La energía primaria del combustible que utilizan se libera mediante una reacción química que no precisa el aporte de oxígeno desde el exterior.

— *Aerorreactores*

Toman aire del exterior como comburente para la reacción de combustión.

- Con compresor (*turboreactor, turbofan y turbohélice*)
- Sin compresor (*estatorreactor y pulsorreactor*)

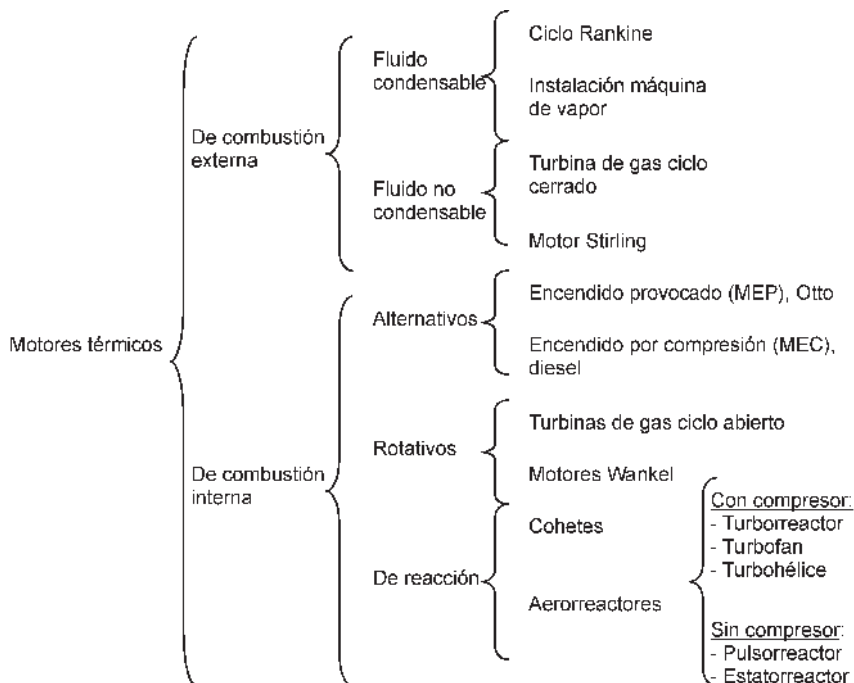
El principio básico de funcionamiento de los turborreactores se estudia en el capítulo 8. Los alumnos que deseen profundizar en el funcionamiento y características de diseño de los distintos tipos de turbinas de gas de aviación, deberán cursar la asignatura optativa *Motores de Combustión Interna*, dedicada a estos motores así como a los de tipo alternativo.

Para acabar de clarificar conceptos, poniendo de manifiesto la distinción entre motor térmico y máquina térmica motora, analice la figura 1.4 en la que se presenta el papel de los motores térmicos y las máquinas térmicas motoras en el contexto de las transformaciones energéticas. Puede observarse que los motores térmicos no constituyen el único sistema de obtener energía mecánica a partir de un combustible, ya que mediante una *pila de combustible* se puede aprovechar la energía química asociada a la estructura molecular del hidrógeno para generar directamente energía eléctrica mediante un proceso inverso al de la electrolisis⁶. Posteriormente la energía generada se podría utilizar para accionar un motor eléctrico con el fin de producir energía mecánica. Las pilas de combustible, actualmente en fase de desarrollo, tienen todavía baja incidencia, de manera que los motores térmicos son los sistemas utilizados de manera generalizada para llevar a cabo la transformación en energía mecánica de la energía contenida en los combustibles fósiles y en los combustibles nucleares.

Analizando la figura 1.4 y a modo de resumen se puede concluir que las máquinas térmicas permiten transformar energía térmica en mecánica o viceversa, mientras que los motores térmicos permiten transformar la energía primaria asociada a la constitución de la materia (enlaces químicos en la molécula o fuerzas asociadas al núcleo del átomo) en energía mecánica. Para ello se produce una primera transformación de la energía primaria en energía térmica asociada a un fluido de trabajo. Se incluye dentro del motor

⁶ Dado que el hidrógeno no está disponible en la naturaleza, es necesario obtenerlo previamente, en general a partir de combustibles fósiles como el gas natural.

térmico el equipo donde tiene lugar el proceso de liberación de la energía contenida en la fuente primaria (motores de combustión interna) o bien el equipo donde el fluido motor recibe energía térmica, a través de una pared, procedente de otro fluido, fuente primaria o proceso (motores de combustión externa).



Esquema 1.1. Clasificación de los motores térmicos.

Debido a la complejidad y volumen de los motores de combustión externa de fluido condensable, constituidos por gran número de equipos (capítulo 9) es habitual denominar a estas instalaciones *plantas de potencia*, empleando la denominación de *motores térmicos* fundamentalmente en el caso de los motores de combustión interna, que son instalaciones más compactas.

Conviene insistir en que pesar de la denominación empleada de *motores de combustión interna o externa*, los motores térmicos pueden aprovechar diferentes tipos de energía primaria: combustible fósil (reacción de combustión), combustible nuclear (reacción de fisión), energía solar (aprovechando

esta energía para producir vapor o calentar un fluido, como por ejemplo aceite), biomasa (transformándola previamente en un combustible líquido o gaseoso, o bien aprovechándola directamente mediante un proceso de combustión).

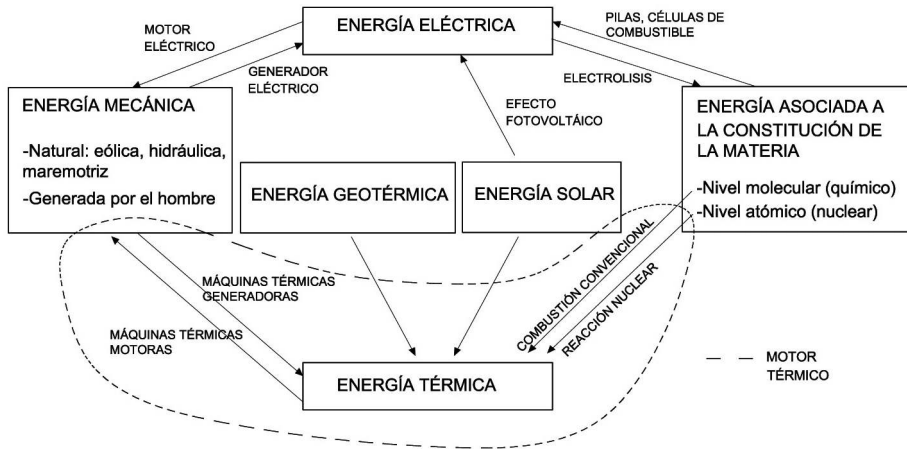


Figura 1.4. Las máquinas y los motores térmicos en el contexto de las transformaciones energéticas.

1.4. RENDIMIENTO DE LOS MOTORES TÉRMICOS

1.4.1. Rendimiento del ciclo y rendimiento de la instalación

En primer lugar, en el caso de los motores de combustión externa o caloríficos, es riguroso definir el rendimiento térmico, o rendimiento del ciclo termodinámico que experimenta el fluido de trabajo:

$$\eta_t = \eta_{ciclo} = \frac{N_{mecánica}}{\dot{Q}_{aportado\ al\ fluido}} \quad [1.1]$$

No obstante, en motores térmicos, particularmente en los de combustión interna, el rendimiento que más se utiliza para evaluar la bondad del proceso es el que puede denominarse *rendimiento de la instalación*, que refleja en qué medida se aprovecha la energía primaria introducida por unidad de tiempo en el motor, a través del gasto másico de combustible, para producir potencia mecánica, y se expresa como el cociente de ambas magnitudes:

$$\eta_{inst} = \frac{N_{mecánica}}{\dot{m}_f \cdot H_c} \quad [1.2]$$

En el caso de los motores de combustión externa, este rendimiento está estrechamente relacionado con el rendimiento térmico definido en [1.1], e incluye el rendimiento del equipo donde tiene lugar la transformación de la energía primaria en energía térmica, es decir, el rendimiento de la caldera o generador de vapor η_{cal} (ver capítulos 2 y 14), de forma que:

$$\eta_{inst} = \frac{N_{mecánica}}{Q_{aportado\ al\ fluido}} \cdot \frac{Q_{aportado\ al\ fluido}}{\dot{m}_f \cdot H_c} = \eta_{ciclo} \cdot \eta_{cal} \quad [1.3]$$

En el caso de los motores de combustión interna, la expresión [1.1] sólo se utiliza en el análisis de los *ciclos teóricos* en los que se considera que el fluido realiza un proceso cíclico (ciclo cerrado) y se supone, en una primera aproximación, que el proceso de combustión que experimenta el fluido se puede considerar como una aportación de calor al mismo. Por otra parte, la evacuación del fluido (gases de combustión) al ambiente se supone que constituye una cesión de calor a un foco frío.

1.4.2. Rendimiento exergético

El rendimiento exergético de un motor térmico se define como el trabajo que desarrolla el motor respecto del máximo que podría haberse obtenido a partir del combustible. El trabajo máximo de referencia es precisamente la exergía del combustible, que se obtiene a través de la expresión que aparece en el denominador de la ecuación [1.4].

$$\eta_{exerg} = \frac{W}{W_{max}} = \frac{W}{(H_{reac0} - H_{prod0}) - T_0(S_{reac0} - S_{prod0})} \quad [1.4]$$

Se puede comprobar que: $T_0(S_{reac0} - S_{prod0}) \ll (H_{reac0} - H_{prod0})$, y tal como se explica en el capítulo 3, este último término coincide con el poder calorífico del combustible, de manera que se comprueba que el rendimiento exergético y el rendimiento de la instalación definido en [1.2], son prácticamente coincidentes.

Es importante resaltar que aunque el 100% del calor producido en el proceso de combustión se transfiera al fluido de trabajo, dado que éste se calienta a una temperatura finita, se destruye exergía, ya que la energía térmica que adquiere dicho fluido no puede convertirse totalmente en trabajo, tal como se recuerda en el capítulo 2. Si la exergía del combustible, liberada en el proceso de combustión, fuera posible transferirla a un fluido de trabajo a temperatura constante infinita, sólo entonces no se destruiría exergía en dicha transformación. Por ello, cuanto mayor es la temperatura media del fluido de trabajo durante el proceso de combustión o de absorción de calor del foco caliente, menor es la destrucción de exergía y mayor es el rendimiento del proceso. La temperatura del foco frío entra en consideración implícitamente, ya que el concepto de exergía siempre va ligado a una temperatura ambiente de referencia (foco frío).

1.5. COGENERACIÓN

Hay que tener en cuenta que el rendimiento de la instalación de los motores térmicos modernos no supera como valor medio el 40%. El valor del rendimiento para los distintos motores en el caso de plantas grandes, como mínimo de unos 15 MW, oscila en los siguientes rangos:

- Planta de potencia con turbina de vapor 39-41%
- Turbinas de gas 35 – 45%
- Motores de combustión interna alternativos 35-52%
- Ciclos combinados turbina de gas-turbina de vapor 45-60%

El rendimiento depende en gran medida del tamaño de la planta, y por tanto de su potencia, de las simplificaciones constructivas y de la tecnología más o menos de vanguardia empleada en la construcción de los equipos. Por todas estas circunstancias, los valores medios de los rendimientos de los motores térmicos son algo inferiores a los señalados. Esto significa que en torno a un 60 % de la energía del combustible utilizado se desperdicia y se evacua al ambiente en forma de calor. Hay que tener en cuenta que las pérdidas que se producen en la transformación energética que tiene lugar en los motores térmicos son inherentes en gran medida al propio ciclo termodinámico de estos motores y, por tanto, sólo pueden reducirse en parte, tal como

se comenta en el capítulo 2. En el estado del arte actual estamos muy próximos al límite máximo del rendimiento alcanzable en motores térmicos, de ahí el interés de la cogeneración como medio de mejora del rendimiento global.

La cogeneración es la producción conjunta de energía térmica y mecánica; energía térmica aprovechable en forma de gases o líquidos calientes y energía mecánica que se puede utilizar directamente para accionamiento mecánico pero que en la mayoría de los casos se convierte en energía eléctrica mediante un alternador.

Por ejemplo, analicemos el caso de una industria que requiera importantes consumos de energía térmica y energía eléctrica; energía térmica que puede ser en forma de vapor para distintos procesos industriales (por ejemplo industrias de papel y celulosa o industrias químicas) y energía eléctrica para el abastecimiento de sus instalaciones y el accionamiento de su maquinaria. La industria tiene dos alternativas: la primera de ellas es la solución clásica que consiste en comprar la energía eléctrica a través de una empresa comercializadora o distribuidora y utilizar una caldera para producir vapor o agua caliente quemando un combustible para cubrir sus necesidades de energía térmica; la otra alternativa es instalar un sistema de cogeneración de energía térmica y eléctrica. En ese caso la energía primaria contenida en un combustible se introduce en un motor térmico, por ejemplo una turbina de gas, generando energía mecánica que puede ser posteriormente transformada en energía eléctrica mediante un alternador. Como consecuencia de la conversión energética que tiene lugar en el motor térmico se producen una serie de pérdidas (de calor por radiación, por rozamiento, etc.) y energías térmicas residuales en forma de fluidos calientes (gases de escape, fluidos refrigerantes, etc.) dependiendo del sistema. Los sistemas de cogeneración se basan en aprovechar la mayor parte posible de dichos calores residuales, ya que constituyen un foco o fuente de energía térmica que puede ser utilizado directamente en procesos industriales o indirectamente mediante cambiadores de calor para producir vapor o agua caliente para necesidades industriales o también para aplicaciones en el sector terciario. Como consecuencia se logra un mejor aprovechamiento de la energía potencialmente contenida en los combustibles y por consiguiente un ahorro de energía primaria para producir las mismas cantidades finales de energía térmica y energía eléctrica.

Se puede definir el rendimiento de la planta de cogeneración de la forma siguiente, entre otras:

$$\eta_{\text{cog}} = \frac{N_e + N_t}{\dot{m}_f \cdot H_c} \quad [1.5]$$

En el numerador aparece la suma de la energía térmica aprovechada y la energía mecánica-eléctrica obtenida, ambas por unidad de tiempo, y en el denominador la energía aportada por el combustible por unidad de tiempo (gasto másico de combustible por el poder calorífico). Hay que tener en cuenta que se están sumando en el numerador energías de categorías muy diferentes por lo que este rendimiento proporciona simplemente una idea de la calidad del proceso.

1.6. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS MOTORES TÉRMICOS

Producción de energía eléctrica

Aproximadamente el 80% de energía eléctrica que consume la sociedad se obtiene a través de motores térmicos accionando generadores eléctricos. Actualmente en este campo compiten asimismo los sistemas basados las energías renovables hidráulica, eólica y solar fotovoltaica, y en mucha menor escala las pilas de combustible. También es interesante destacar que cuando se desarrolle la tecnología de la fusión nuclear, la energía térmica desarrollada también será aprovechada a través de motores térmicos de combustión externa.

- *Grandes potencias*

En la generación de energía eléctrica para grandes centrales de producción, las plantas de vapor se han venido utilizando sin competencia hasta muy recientemente. La primera razón de este hecho radica en que este tipo de motor térmico es el más versátil en relación al combustible, ya que puede utilizar combustibles fósiles sólidos, líquidos y gaseosos, combustibles nucleares, o incluso energías renovables como biomasa o energía solar; no obstante, la utilización del carbón como fuente de energía primaria llevó inicialmente al desarrollo de estas instalaciones, obteniéndose altos rendimientos (40%). Por otra parte, este tipo de instalaciones son las que desarrollan mayor potencia unitaria,

ya que la energía disponible por unidad de masa en el vapor es tres veces superior a la disponible en el gas y, por tanto, para desarrollar la misma potencia serán necesarios gastos másicos de fluido muy superiores en el caso de las turbinas de gas y los MCI alternativos. A pesar de que es factible diseñar instalaciones basadas en el ciclo de *Rankine* con potencias superiores a los 1000 MW, hoy en día, en el caso de que se utilicen combustibles fósiles, las centrales de producción estén integradas por varios *grupos* de menor potencia (350 MW -550 MW), lo que conlleva ventajas de cara a la planificación de las paradas por mantenimiento. Debido a ello, las turbinas de gas, que han mejorado espectacularmente sus prestaciones en los últimos años existiendo modelos comercializados que superan los 330 MW con rendimientos del 39%, podrían actualmente estar en condiciones de competir, siempre y cuando el combustible a utilizar sea líquido o gaseoso. Los gases de la combustión que se generan a partir de combustibles sólidos contienen un elevado nivel de cenizas que producen erosiones inaceptables en la turbina. En cuanto a los motores de combustión interna alternativos, éstos tienen las mismas limitaciones que las turbinas de gas en cuanto al tipo combustible, pero además consiguen potencias muy inferiores, con valores máximos del orden de los 100 MW, por lo que únicamente se han venido utilizando para la producción de energía eléctrica en las Islas Baleares y Canarias, en el caso de España.

La decisión de utilizar el gas natural como fuente de energía primaria para la producción de energía eléctrica a gran escala, con el fin de diversificar el origen de las fuentes y reducir las emisiones contaminantes, ha motivado que los ciclos combinados gas-vapor estén utilizándose cada vez más en el campo de la producción de energía eléctrica debido a su elevado rendimiento. Los ciclos combinados deben su éxito al espectacular desarrollo de las turbinas de gas en los últimos años y a la creciente fiabilidad de estas instalaciones como consecuencia de la mejora en la tecnología de las calderas de recuperación. Por todo ello, actualmente se comercializan plantas de ciclo combinado con rendimientos superiores al 60%, ya que al buen rendimiento de la turbina de gas que incorporan se une el hecho de que su principio de funcionamiento implica el aprovechamiento de la energía residual asociada a los gases de escape de la turbina de gas para producir una parte o bien el total del vapor que luego se expansiona en una turbina de vapor.

- *Generación distribuida y cogeneración*

Se refiere a aplicaciones en las que la generación de energía eléctrica se realiza prácticamente en el punto de consumo, siendo las potencias requeridas pequeñas en comparación con el caso anterior. Por tanto, son potencias que, en general, no superan los 30 MW, siendo más habituales las instalaciones con potencias entre 5-10 MW en el sector industrial e inferiores a 1 MW en el sector terciario. En esta aplicación es precisamente donde compiten las pilas de combustible, la tecnología solar fotovoltaica y la mini-hidráulica, por el bajo nivel de potencia demandado.

En cuanto al tipo de plantas que se utilizan, en el caso concreto de la cogeneración, las instalaciones con turbinas de vapor se utilizaron mucho en el pasado por ser una tecnología conocida y para determinados requerimientos la única disponible en su momento. El desarrollo de las turbinas de gas, con la mejora de sus rendimientos, motivó que las instalaciones basadas en este elemento motor crecieran en número, desplazando a las instalaciones con turbina de vapor por su mayor coste de instalación, operación y mantenimiento, así como tiempos de construcción y puesta en servicio muy superiores a los de las turbinas de gas (consultar cuadro al final del capítulo). Por todo ello, las instalaciones basadas en turbinas de vapor sólo se utilizan en la actualidad cuando se desea utilizar un combustible sólido, especialmente si se dispone de un combustible sólido de desecho.

A medida que se ha extendido la cogeneración a aplicaciones de menor potencia, especialmente en el sector terciario, las instalaciones basadas en motores de combustión interna alternativos han ido incrementando su participación en este mercado. Hay que tener en cuenta que en el rango de potencias reducidas ($<10\text{MW}$), los motores de combustión interna alternativos tienen mayores rendimientos a plena potencia que las turbinas de gas. Por otro lado, su funcionamiento se adapta mejor en situaciones que requieren variaciones de carga y frecuentes paradas y arranques. Esto se debe, en primer lugar, a que, a diferencia de las turbinas de gas, los motores alternativos mantienen dentro de un rango aceptable su rendimiento ante variaciones de carga, siempre que trabajen por encima del 50% de su potencia nominal; por otra parte, su vida útil y el periodo entre revisiones se acortan

menos ante frecuentes paradas y arranques que en el caso de las turbinas de gas.

Por otra parte, la elección de un tipo de motor térmico para cogeneración también depende de las características de la demanda térmica requerida que en ocasiones determinan el tipo de motor a utilizar. En ese sentido, hay que tener en cuenta en relación con las plantas con motores de combustión interna alternativos, que el nivel térmico del calor residual de estos motores es inferior al de las turbinas de gas. Esto hace que las instalaciones dotadas con estos motores puedan utilizarse sólo en aplicaciones en las que se requiera vapor a baja presión o agua caliente.

Las denominadas *microturbinas de gas* (aproximadamente en el rango: 30 kW - 500 kW) son indicadas en esta aplicación, en la que se requiere bajo ruido y reducidas emisiones, pero tienen el inconveniente de su bajo rendimiento eléctrico, que no suele superar el 20%.

La mayor parte de ideas presentadas anteriormente son aplicables a la elección del tipo de motor térmico más conveniente en otras aplicaciones de generación distribuida, como pueden ser los *grupos electrógenos*.

Transporte

En este campo la única competencia a los MCIA reside actualmente en las pilas de combustible y en los motores eléctricos con baterías, si bien, en este último caso hay que tener en cuenta que dichas baterías se recargan con energía eléctrica generada en centrales de producción generalmente basadas en motores térmicos.

Las instalaciones de potencia con turbina de vapor son muy complejas y requieren gran cantidad de espacio, entre otras cosas por la presencia de la caldera, el condensador y el resto de los equipos auxiliares, todos ellos equipos muy voluminosos. Esto no supone un inconveniente en aplicaciones estacionarias, pero sí en aplicaciones de transporte. En esta aplicación se utilizan motores de combustión interna, mucho más compactos y por tanto de mayor potencia específica.

- *Automoción*

En automoción se trabaja muy frecuentemente a cargas parciales y las turbinas de gas tienen el grave inconveniente frente a los motores de combustión interna alternativos de que su rendimiento empeora mucho al variar la potencia en relación a las condiciones de diseño (potencia nominal). Además, para el reducido nivel de potencia característico de esta aplicación, el rendimiento de las turbinas de gas en condiciones nominales es algo inferior y además no existe un ahorro significativo de peso frente a los MCI alternativos. Las únicas ventajas que presentan las turbinas de gas, en este caso, son: una menor emisión de contaminantes, menor ruido y menos mantenimiento; estas ventajas no contrarrestan el inconveniente de su peor rendimiento, especialmente a cargas parciales.

Es interesante hacer un inciso para comentar que los motores de combustión interna alternativos a partir de una determinada potencia son todos motores tipo diesel (MEC). Los motores Otto o MEP, de gasolina generalmente, quedan circunscritos a motores de automoción y a motores auxiliares de poca potencia. En éstos el pistón no puede tener un diámetro mayor de 150 mm por problemas de detonación. Esto se debe a que medida que el motor aumenta sus dimensiones se reduce la relación superficie / volumen del cilindro, de forma que se dificulta su refrigeración y la temperatura media del fluido de trabajo aumenta, lo que conlleva una tendencia inevitable a la detonación, que es indeseable.

En el caso de *turismos* se utilizan tanto motores de encendido provocado (ciclo Otto / MEP) como de encendido por compresión (diesel / MEC). Estos últimos tienen menor potencia específica y, en general, un mayor coste de adquisición y mantenimiento. Sin embargo, su mejor rendimiento supone una característica muy importante debido al incremento del precio de los combustibles. Este factor, unido a la mejora de la potencia específica mediante la sobrealimentación ha supuesto un incremento notable del porcentaje de motores diesel en el sector del automóvil; en concreto son motores diesel de los denominados extrarrápidos (3800 – 5000 r.p.m.).

Los *motores de competición* son motores MEP de cuatro tiempos a altas revoluciones, ya que en este tipo de aplicación prima más la ventaja de una alta potencia específica.

En *autobuses y camiones*, se utilizan motores diesel de los denominados rápidos (1900 – 2700 r.p.m.) por su mejor rendimiento, aunque en el caso de autobuses urbanos, por su menor contaminación y ruido, cada vez hay mayor presencia de motores MEP a gas o utilizando biocombustibles.

Las *motocicletas* de pequeña cilindrada incorporan motores MEP de dos tiempos por el bajo coste asociado a la simplicidad constructiva. Las motocicletas de mayor potencia utilizan motores de MEP de cuatro tiempos por su mejor rendimiento frente a los dos tiempos.

- *Propulsión marina*

En motores marinos lo más extendido es el motor diesel, aunque en pequeñas potencias también se utilizan motores de gasolina (ciclo Otto) de dos tiempos. En grandes buques, el diesel lento (como mínimo 90 r.p.m.), ha desplazado completamente a las antiguas instalaciones con turbina de vapor. La turbina de gas tiene por el momento mucha menor incidencia, salvo en embarcaciones en las que se requiere muy alta potencia específica (hidrofoil, overcraft, lanchas rápidas) o en marina de guerra, por su menor nivel de ruido.

- *Tracción ferroviaria*

En tracción ferroviaria, a pesar de que la turbina de gas parece en principio idónea, ya que aquí las condiciones de trabajo son bastante constantes, todavía hay poca presencia de este tipo de motores. En esta aplicación lo más extendido son las locomotoras diesel-eléctricas, que consisten básicamente en motores diesel sobrealimentados rápidos (1000 – 1500 r.p.m.), accionando motores eléctricos encargados de proporcionar la tracción a las ruedas.

- *Propulsión aérea*

Aunque en aplicaciones deportivas y comerciales (avionetas) todavía se utilizan motores de combustión interna alternativos de gasolina, el campo de la aviación está dominado por las turbinas de gas de aviación.

En los inicios del desarrollo de las turbinas de gas se pusieron de manifiesto las posibilidades de este motor para la propulsión aérea. Hay que tener en cuenta que en el caso de propulsión de aviones utili-

zando hélice, la propulsión se origina como consecuencia del empuje que ejerce el aire sobre la hélice, en el sentido de avance del aparato, como reacción a la aceleración en sentido inverso que experimenta el caudal de aire que trasiega la hélice. Con este mismo fundamento, las turbinas de gas de aviación, que son motores de reacción de la categoría de los aerorreactores con compresor, producen un empuje sobre el fuselaje como consecuencia de la variación de la cantidad de movimiento experimentada básicamente por el aire a su paso por el motor, despreciando el gasto de combustible frente al del aire.

Existen diversas configuraciones de turbinas de gas de aviación, siendo las más importantes: el turborreactor, el turbofán y el turbohélice.

La propulsión por hélice tiene limitaciones en cuanto a altura de vuelo y velocidad máxima de crucero, por problemas de desprendimiento de la corriente fluida y caída del rendimiento propulsivo de la hélice. Por estas razones, este tipo de propulsión, característica de aeronaves equipadas con motores turbohélice o bien con motores de combustión interna alternativos, es adecuada para aplicaciones donde se requieren velocidades de vuelo relativamente bajas en trayectos relativamente de corto alcance, en donde un incremento de la velocidad máxima de vuelo no tiene gran repercusión.

En los aviones de transporte civil (carga o pasajeros) se utilizan de forma generalizada turbofanes con grados de derivación de hasta $6:1$, por su menor consumo. Sólo en determinados casos, para transportes civiles de corto alcance o bien en transporte militar, siguen utilizándose turbohélices. En la aviación militar de combate, en donde interesa alcanzar en momentos determinados velocidades supersónicas, se utilizan los turborreactores con postquemador, pues tienen un rendimiento más elevado a muy altas velocidades. Sin embargo, los aviones de combate modernos también están equipados, hoy en día, con motores con un cierto grado de derivación (entre $0,3:1$ y $1,5:1$), a los que se denomina turborreactores con by-pass.

- *Otras aplicaciones aéreas*

En las lanzaderas de naves espaciales y la propulsión de misiles se utilizan motores cohete; para *el lanzamiento de los denominados misi-*

les de crucero, de largo alcance, se utilizan pequeñas turbinas de gas de aviación.

Otras aplicaciones

- *Maquinaria agrícola y motores auxiliares*

Para accionar tractores y cosechadoras se utilizan motores de combustión interna alternativos diesel.

En motores auxiliares de pequeña potencia como cortacésped o motosierras mecánicas, se utilizan motores de combustión interna alternativos de gasolina. En aplicaciones de mayor potencia como accionamiento de maquinaria de obras públicas o carretillas elevadoras, se emplean motores diesel.

En el caso de motores auxiliares de apoyo en tierra de aeronaves se utilizan turbinas de gas (GPU).

COMPARACIÓN ENTRE DISTINTOS MOTORES TÉRMICOS (1)

Parámetro	MCIA alternativo	Turbinas de gas ¹	Instalación ciclo Rankine	Ciclos combinados gas-vapor
<i>Tipos</i>	ciclo diesel, ciclo Otto gas	Ciclos: simple, regenerativo, compuesto	En contrapresión, en condensación	Sin o con postcombustión
<i>Rango de potencia</i>	0,5 kW-98 MW	28 kW-334 MW	1 MW-1000 mW	7 MW-990 MW
<i>Rendimiento máximo</i>	0,35 (gas) 0,52 (diesel)	0,45 (ciclo simple) 0,48 (ciclo regenerativo)	0,4 (ciclo en condensación)	0,6
<i>Rango de rendimiento</i>	0,3 a 0,52	0,2 a 0,43 (simple)	0,3-0,42	0,48-0,6
<i>Factor η a media carga</i>	1,00	0,8 a 0,85	0,91 a 0,96	0,8 a 0,85
<i>Tamaño y peso/kW</i>	medio	pequeño	grande	medio
<i>Vida típica de la planta</i>	10 a 20 años	15 a 30 años	25 a 35 años	30 a 35 años
<i>Periodo de mantenimiento²</i>	semanal y mensual	mensual y anual	diario	diario
<i>Periodo de inspección total</i>	anual	varios años	anual	anual
<i>Tipo de combustible</i>	líquido o gas	líquido o gas	sólido, líquido, gas	líquido o gas
<i>Calidad requerida combustible</i>	alta	alta / media	media / baja	alta / media
<i>Necesidades personal</i>	algunos	pocos o ninguno	muchos	varios
<i>Lubricación</i>	cambios frecuentes de aceite y filtros	control nivel aceite	control nivel aceite	control nivel aceite
<i>Característica fundamental a destacar</i>	Buen η cargas parciales y alta potencia específica	Es el motor de mayor potencia específica	Única planta que puede utilizar combustibles sólidos	Es la planta de más alto rendimiento (60%)

¹ Se hace referencia a las turbinas de gas de ciclo abierto para producción de potencia.

² Se refiere a instalaciones en aplicaciones estacionarias de producción de energía eléctrica de uso continuado.

COMPARACIÓN ENTRE DISTINTOS MOTORES TÉRMICOS (2)

Parámetro	MCI alternativo	Turbinas de gas	Instalación con turbina de vapor, ciclo Rankine	Ciclos combinados gas-vapor
<i>Requerimientos para la instalación</i>	– Cimentación para absorción de vibraciones – Celda para absorber ruido, silenciador de escape.	– Filtros para el aire de admisión – Silenciadores de admisión y escape	– Sistema de tratamiento de cenizas y escorias, si combustible sólido – Almacenamiento y tratamiento del combustible sólido – Gran caudal de agua refrigeración – Tratamiento especial del agua del ciclo	– Gran caudal de agua refrigeración – Tratamiento especial del agua del ciclo – Filtros para el aire de admisión – Silenciadores de admisión y escape
<i>Campos de aplicación</i>	– Automoción – Propulsión marina – Tracción ferroviaria – Obras públicas – Maquinaria agrícola – Propulsión aérea – Cogeneración – Producción de energía eléctrica	– Propulsión aérea (turbo-reactor, turbofan y turbohélice) – GPU (Ground Power Units) en aeropuertos – Propulsión marina – Cogeneración – Producción de energía eléctrica	– Producción de energía eléctrica – Cogeneración	– Producción de energía eléctrica – Cogeneración

Capítulo 2

Procesos en fluidos compresibles

Objetivos fundamentales del capítulo

- 2.1. Introducción
- 2.2. Procesos termodinámicos de importancia en el estudio de las máquinas y los motores térmicos
- 2.3. Principios y ecuaciones que rigen el comportamiento de los flujos compresibles
 - 2.3.1. Principio de conservación de la masa
 - 2.3.2. Primer Principio de la termodinámica
 - 2.3.3. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento
 - 2.3.4. Segundo Principio de la termodinámica
 - 2.3.5. Exergía y balance exergético
 - 2.3.6. Ecuaciones de Gibbs
 - 2.3.7. Ecuaciones calóricas
 - 2.3.8. Trabajo intercambiado con el entorno
- 2.4. Propiedades termodinámicas de mezclas de gases ideales
- 2.5. El Factor de Carnot. Rendimiento máximo de los motores térmicos.
- 2.6. Concepto de velocidad del sonido y número de mach
 - 2.6.1. Velocidad del sonido
 - 2.6.2. Concepto de número de Mach
 - 2.6.3. Concepto de onda de choque
- 2.7. Expansión y compresión en conductos, toberas y difusores
 - 2.7.1. Efecto de la compresibilidad
 - 2.7.2. Forma del conducto en toberas y difusores
 - 2.7.3. Parámetros críticos de un gas
 - 2.7.4. Comportamiento del fluido en conductos sin fricción
 - 2.7.4.1. Expresión del gasto en toberas y difusores
 - 2.7.4.2. Expansión en conductos convergentes
 - 2.7.4.3. Comportamiento del fluido en un conducto convergente- divergente

2.7.4.4. Evaluación de las pérdidas en toberas y difusores

2.7.4.4.1. Comparación de los casos de expansión y compresión

2.7.4.4.2. Coeficientes para evaluar la fricción en toberas y difusores

Volver pág. ant.

OBJETIVOS FUNDAMENTALES DEL CAPÍTULO

- Recordar las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento del flujo compresible en sistemas cerrados y abiertos: ecuación de la continuidad, ecuación de conservación de la energía, segundo principio de la termodinámica, ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, ecuaciones de Gibbs, ecuaciones calóricas.
- Recordar el concepto de exergía y el balance exergético como una forma alternativa de expresar el 2.º principio de la termodinámica.
- Recordar las distintas formas de expresar el trabajo intercambiado con el entorno en sistemas cerrados y abiertos.
- Recordar los conceptos de velocidad del sónico, número de Mach y onda de choque, que tienen importancia a la hora de analizar los procesos de expansión y compresión.
- Analizar los procesos de expansión y compresión en toberas y difusores para llegar a entender la influencia de la forma del conducto y del número de Mach de la corriente.
- Entender las limitaciones que presentan las toberas convergentes frente a las convergente-divergentes.
- Presentar los distintos parámetros que se utilizan para evaluar las pérdidas mecánicas en toberas y difusores.

2.1. INTRODUCCIÓN

En las máquinas térmicas evolucionan fluidos compresibles (vapor de agua, aire, mezcla de aire y combustible, gases de la combustión) a velocidades apreciables, que sufren procesos en los que se producen cambios en

su densidad. Es importante destacar que es precisamente la característica de compresibilidad la que da a los fluidos la capacidad de almacenar y liberar grandes cantidades de energía, y jugará un importante papel en el funcionamiento de las máquinas térmicas, como se pondrá de manifiesto a lo largo del texto.

El presente capítulo tiene por objeto presentar las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento del flujo compresible y, posteriormente, estudiar y presentar ciertos procesos termodinámicos y termo-fluidomecánicos característicos que tienen lugar en las máquinas y los motores térmicos, así como mostrar las herramientas necesarias para el análisis de dichos procesos.

En las máquinas térmicas los gases evolucionan en sistemas que pueden ser cerrados o abiertos. Ejemplos de evolución en sistemas cerrados o sin flujo serían los procesos en el interior del cilindro una vez cerradas las válvulas o las lumbreras de admisión y escape en motores de combustión interna alternativos, en máquinas de vapor alternativas o en compresores volumétricos. Cuando el fluido experimenta un proceso en un sistema cerrado, la velocidad del fluido respecto de las paredes no es elevada, de forma que las pérdidas de carga no son muy importantes de manera que se puede suponer, en una primera aproximación, que los procesos son reversibles. Sin embargo, las pérdidas de calor sí pueden ser considerables y despreciarlas supondría introducir un error importante en el análisis¹. Por otra parte, los procesos en sistemas cerrados son claramente no estacionarios.

Por otro lado, una turbomáquina térmica, turbina o compresor, constituye un ejemplo de sistema abierto o con flujo². En este caso, las pérdidas mecánicas por fricción no pueden ser despreciadas sin incurrir en un error considerable, debido a la elevada velocidad de circulación del fluido por el interior de estas máquinas, constituidas internamente por conductos convergentes o divergentes, como se verá en los capítulos 13 y 14, por tanto, deben tratarse como irreversibles. Sin embargo, debido a la corta permanencia de una partícula de fluido en el interior de estas máquinas, las pérdidas de calor por unidad de gasto no son importantes y estos procesos pueden considerar-

¹ La necesidad de refrigerar el cilindro, en el caso de los MCI alternativos, viene motivada por exigencias mecánicas: para controlar la dilatación de las piezas y la temperatura del aceite.

² Otro ejemplo serían los colectores de admisión y escape durante los procesos de renovación de la carga en MCI alternativos.

se adiabáticos. Además, los procesos en las turbomáquinas pueden suponerse estacionarios y para mayor simplicidad, unidimensionales, ya que la máquina puede tratarse como un volumen de control con una entrada y una salida, en las que se supone que el campo fluido es uniforme.

Por otra parte, los procesos que se van a considerar en los motores térmicos pueden ser abiertos (proceso experimentado por el fluido en una turbina de gas) o bien procesos cíclicos o cerrados (proceso experimentado por el agua en una instalación de turbina de vapor).

Otra hipótesis importante que se realiza frecuentemente en el estudio de las máquinas y motores térmicos es que los gases que evolucionan se comportan como gases ideales e incluso como gases perfectos. Con esta hipótesis no se incurre en errores significativos en los cálculos y en el análisis del comportamiento de las máquinas y motores térmicos³, en la mayoría de los casos. Esta hipótesis no es aplicable, no obstante, al caso del vapor de agua.

Recordar que la ecuación de estado de los gases ideales establece que:

$$p \cdot V = R \cdot T \quad [2.1]$$

2.2. PROCESOS TERMODINÁMICOS DE IMPORTANCIA EN EL ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

A continuación se hace referencia a distintos tipos de procesos de suma importancia en el estudio del fundamento de las máquinas y los motores térmicos. En cada caso se han incluido ejemplos concretos de procesos de ese tipo que tienen lugar en dichas máquinas y motores. En figuras posteriores se representan algunos de estos procesos en diagramas p-V y T-s. Las ecuaciones que se indican entre paréntesis corresponden al comportamiento de gases ideales, que se derivan de la ecuación de estado [2.1].

Proceso isobárico: $p = \text{cte}$

Ejemplo: los procesos que tiene lugar en las calderas y en las cámaras de combustión de las turbinas de gas, si se desprecia la pérdida de carga⁴.

³ Una razón de este comportamiento es que las presiones de trabajo son moderadas.

⁴ En rigor se refiere a la pérdida de presión de parada o remanso: $p_{01} = p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2}$.

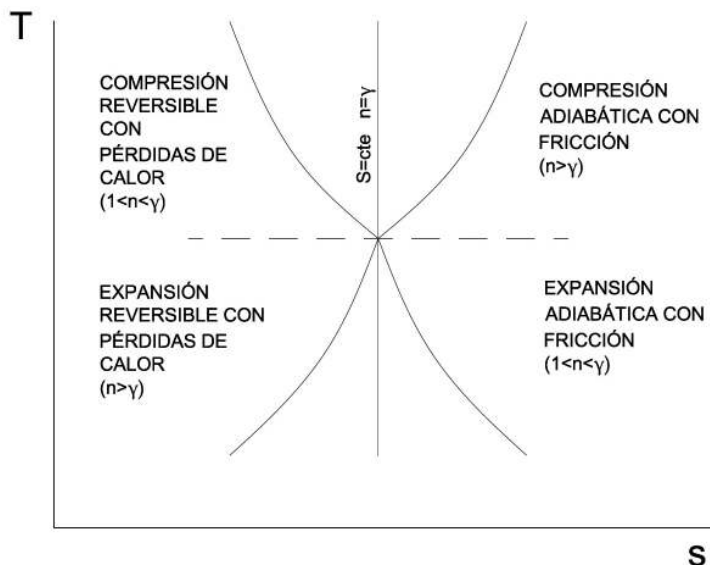


Figura 2.1. Diferentes procesos politrópicos de compresión y expansión.

Proceso isocoro: $V = \text{cte}$

Ejemplo: el proceso de aporte de calor a volumen constante en un ciclo ideal de un motor de combustión interna de encendido provocado (MEP).

Proceso isoterma: $T = \text{cte}$ ($pV = \text{cte}$)

Ejemplos: los procesos ideales de compresión o expansión isotermas, a los que se tiende en los ciclos compuestos de turbinas de gas para reducir el trabajo de compresión o incrementar el trabajo de expansión.

Proceso isentálpico: $h = \text{cte}$

Ejemplo: el flujo a través de válvulas de laminación o de estrangulación para regulación del caudal, válvulas de expansión en máquinas frigoríficas.

En el caso de *gases ideales*, dado que la entalpía es función únicamente de la temperatura y no de la presión, los procesos isoterms serán también isentálpicos.

Proceso adiabático: $Q = 0$

La adiabaticidad es una característica del proceso y no un proceso en sí mismo.

Ejemplo: en general, se pueden considerar como adiabáticos los procesos que tienen lugar en las turbomáquinas térmicas (turbinas y compresores) o en conductos tales como toberas o difusores⁵.

Proceso isentrópico. Proceso reversible y adiabático: $s = \text{cte}$ ($p \cdot v^\gamma = \text{cte}$)

Ejemplo: los procesos ideales que sirven de referencia para establecer el rendimiento de los procesos reales en turbomáquinas térmicas, en toberas o en difusores.

Puede existir un proceso isentrópico que sea no reversible ni adiabático, de forma que llegue a mantenerse la entropía constante; éste podría llegar a ser el caso del proceso de expansión en una turbina refrigerada.

Proceso politrópico ($p \cdot v^n = \text{cte}$)

Ejemplo: todos aquellos procesos que responden con suficiente aproximación a la relación $p v^n = \text{cte}$. Los procesos mencionados anteriormente obedecen a dicha ecuación eligiendo el valor de n entre los siguientes: 0, ∞ , 1, γ . No obstante, es más habitual utilizar la denominación de procesos politrópicos para caracterizar y referirse a procesos no isentrópicos, bien porque existan pérdidas por fricción y/o porque el proceso no sea adiabático.

A continuación se presentan algunos ejemplos de procesos politrópicos que se reflejan en un diagrama T-s en la figura 2.1:

- Proceso de compresión reversible, con pérdidas de calor (1-2). En este proceso disminuye la entropía del fluido⁶ y se comprueba que $1 < n < \gamma$.
- Proceso de expansión reversible, con pérdidas de calor (1-2'). En este proceso también disminuye la entropía del fluido al haber transmisión de calor al exterior, pero en este caso se comprueba que los sucesivos estados termodinámicos pueden representarse mediante una politrópica con $n > \gamma$. Este proceso y el anterior pueden ser representativos de los experimentados por el fluido en compresores volumétricos alternativos.

⁵ Si se fuerza la refrigeración, se puede modificar la tendencia natural a la adiabaticidad.

⁶ Se puede deducir del Segundo Principio de la Termodinámica (ecuación A.9).

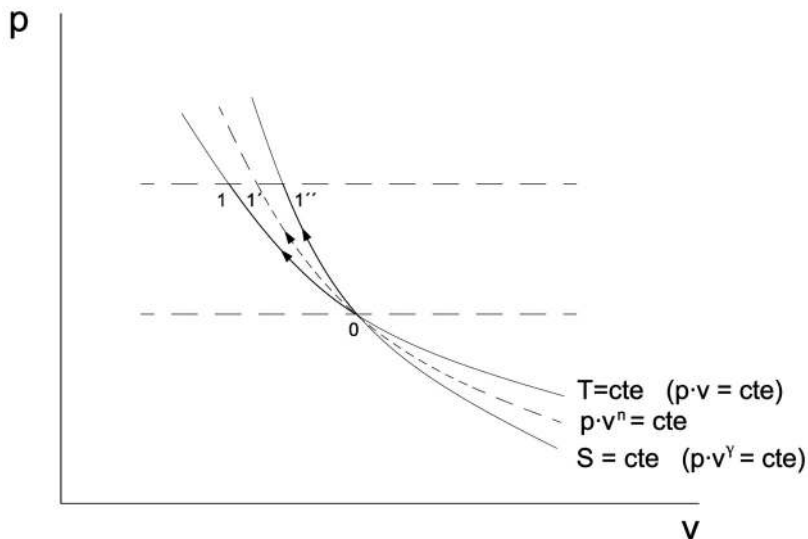


Figura 2.2. Procesos de compresión: isoterma (0-1), politrópico (0-1') e isentrópico (0-1'').

- Proceso de compresión adiabático e irreversible (1-2''). En este proceso aumenta la entropía del fluido y se puede comprobar que $n > \gamma$. Proceso característico del flujo en difusores y en compresores.
- Proceso de expansión adiabático e irreversible (1-2'''). En este proceso aumenta la entropía del fluido y se comprueba que $1 < n < \gamma$. Proceso característico del flujo en toberas y en turbinas.

En la figura 2.2 se comparan, en un diagrama p - v tres procesos de compresión: isoterma (0-1), politrópico (0-1') e isentrópico (0-1'').

2.3. PRINCIPIOS Y ECUACIONES QUE RIGEN EL COMPORTAMIENTO DE LOS FLUJOS COMPRESIBLES

A continuación se resumen los principios y ecuaciones que rigen el comportamiento de los flujos compresibles. Para mayor claridad se distinguen, en cada caso, las expresiones aplicables a sistemas cerrados y a sistemas abiertos, y además se incorporan las hipótesis simplificadoras más extendidas en el estudio de las máquinas y motores térmicos con el fin de mostrar las formulaciones adecuadas en cada caso.

Es importante resaltar que las ecuaciones se presentan en general en forma integral, es decir, algunas de las ecuaciones provienen de la integración de las ecuaciones en forma diferencial al volumen de control (sistema abierto) o al volumen fluido (sistema cerrado) que representa una máquina o bien un conducto. Debido a ello, estas ecuaciones permiten analizar los procesos que experimentan los fluidos y las propiedades de los mismos de forma macroscópica, obteniendo información de los valores medios de las variables a la entrada y a la salida (sistemas abiertos) o bien un valor medio de la variable asociada al conjunto del volumen de control en cada instante, no siendo posible obtener información sobre la distribución espacial de las distintas variables (presión, temperatura, velocidad, etc.). Conviene aclarar que en el caso de un sistema abierto, los subíndices 1 y 2 corresponden a la entrada y a la salida de la máquina o el conducto, considerado como volumen de control, mientras que en sistemas cerrados denotarán instantes de tiempos sucesivos.

2.3.1. Principio de conservación de la masa

Sistema cerrado

$$masa = \rho \cdot V = cte \quad [2.3]$$

Donde ρ representa la densidad del fluido y V el volumen.

Sistema abierto

Ecuación de la continuidad para flujo estacionario:

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot c \Rightarrow \dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad [2.4]$$

Donde $\dot{m}$ es el gasto másico y c es la componente de la velocidad perpendicular a la sección A en una determinada localización.

2.3.2. Primer Principio de la Termodinámica

Sistema cerrado

El Primer Principio de la Termodinámica es un enunciado de conservación de la energía. Para un sistema cerrado se enuncia de la siguiente forma:

$$\Delta U = Q - W \quad [2.5]$$

ΔU es la variación de la energía interna del sistema, Q es el calor intercambiado en el proceso y W el trabajo ya sea desarrollado o absorbido en el proceso.

La ecuación [2.5] expresada en magnitudes específicas (por unidad de masa o mol del sistema), en cuyo caso se notarán las magnitudes con letras minúsculas, será:

$$\Delta u = q - w [J / kg, J / mol] \quad [2.6]$$

La ecuación 2.5 está expresada en términos de energía del sistema para un proceso dado, pero puede ser expresada para un proceso diferencial:

$$dU = \delta Q - \delta W \quad [2.7]$$

$$du = \delta q - \delta w \quad [2.8]$$

Es conveniente recordar que la energía interna (U) (y otras como la presión, temperatura, volumen, densidad, entalpía o entropía) es una función de estado, que solamente depende del estado térmico del sistema en equilibrio, mientras que el calor y el trabajo son funciones de línea (formas de energía en tránsito) y no dependen del estado del sistema sino del proceso efectuado, de ahí que su variación se denote con el símbolo δ en lugar de con el diferencial d .

Criterio de signos: Se considera W positivo si es desarrollado por el sistema y Q positivo si es absorbido por el sistema.

Sistema abierto

Partiendo de la ecuación 2.5 y aplicándola a un volumen fluido dado que evoluciona por un sistema fijo abierto, del que entra y sale fluido, se puede llegar a la siguiente expresión del Primer Principio para sistemas abiertos en régimen no estacionario:

$$\dot{U} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum h_e \dot{m}_e - \sum h_s \dot{m}_s \quad [2.9]$$

En la ecuación anterior, $\dot{U}$ es la variación de energía interna del sistema con el tiempo, $\dot{Q}$ es la potencia térmica que absorbe el sistema del exterior, $\dot{W}$ la potencia producida por el sistema y h es la entalpía⁷ específica por uni-

⁷ Se recuerda que $h = u + p \cdot v$.

dad de masa. Por otro lado, los subíndices e y s hacen referencia a las entradas y salidas del sistema respectivamente. Si el proceso es estacionario, la energía del sistema no varía en el tiempo, y si además solo existe una corriente (una entrada y una salida) se tiene la ecuación 2.10 en términos de potencia o la 2.11 en términos de energía específica (por kg de masa o por mol):

$$\dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = \dot{Q} - \dot{W} \quad [2.10]$$

$$h_2 - h_1 = q - w \quad [2.11]$$

Si la energía interna del sistema se generaliza con otras energías además de la térmica, por ejemplo, con la energía cinética y la potencial en un campo de fuerzas, se obtiene:

$$\dot{m} \cdot \left[\left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot c_2^2 + g \cdot z_2 \right) - \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 + g \cdot z_1 \right) \right] = \dot{Q} - \dot{W} \quad [2.12]$$

$$\left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot c_2^2 + g \cdot z_2 \right) - \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 + g \cdot z_1 \right) = q - w \quad [2.13]$$

Considerando que la energía potencial es despreciable en el caso de gases frente a los otros términos, se tiene:

$$\left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot c_2^2 \right) - \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 \right) = h_{02} - h_{01} = q - w \quad [2.14]$$

Los términos h_{02} y h_{01} comprenden la entalpía estática (h) de las corrientes de salida o entrada junto con su energía cinética ($1/2 c^2$) y se denomina entalpía de parada o de remanso (h_0). Será empleado muy frecuentemente a lo largo del texto. El punto de parada (o de remanso) sería el estado teórico que alcanzaría la corriente si se frenara por vía isentrópica (sin rozamiento ni transferencia de calor) y sin intercambio de trabajo hasta velocidad nula.

2.3.3. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Sistema cerrado

Aplicando la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento al conjunto del sistema cerrado, éste variará su cantidad de movimiento si se aplica sobre él una fuerza neta resultante:

$$F = masa \cdot a \rightarrow F = \frac{d}{dt}(m \cdot c) \quad [2.15]$$

Sistema abierto

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento aplicada al volumen de control, queda reducida a la siguiente expresión en el caso de flujo estacionario:

Ecuación en la dirección x:

$$\sum F_x = \dot{m} \cdot (c_{x2} - c_{x1}) \quad [2.16]$$

Cuando el sistema considerado está sometido a una rotación es más adecuado aplicar el Teorema del Momento Cinético, según el cuál: la variación experimentada de momento cinético⁸ es igual al par total aplicado sobre el sistema. A partir de este Teorema se deduce la Ecuación Fundamental de las Turbomáquinas, tal como se explica en el capítulo 12.

2.3.4. Segundo Principio de la termodinámica

Sistema cerrado

El Segundo Principio de la Termodinámica, que tiene varios enunciados, es un principio relacionado con la direccionalidad de los procesos y con su reversibilidad y permite cuantificar las irreversibilidades. Por ejemplo, queda de manifiesto el hecho de que el rozamiento y la fricción interna del fluido reducen la potencia o el trabajo producido (o bien aumentan el trabajo que se requiere aportar), asimismo se manifiesta la pérdida de carga

⁸ Momento de la cantidad de movimiento: $\vec{r} \times m \cdot \vec{c}$

debido a las irreversibilidades, haciendo imposible efectuar el proceso contrario bajo las mismas condiciones; también, se pueden cuantificar las pérdidas causadas por el hecho de que el calor se transfiera de cuerpos de mayor temperatura a cuerpos de menor temperatura y no al contrario, lo que asimismo implica que sea imposible hacer un proceso inverso volviendo al estado inicial.

En sistemas cerrados se usará habitualmente el balance de entropía en términos específicos (ecuación 2.17).

$$ds = \frac{\delta q}{T} + \delta\sigma_i \quad [2.17]$$

Donde $\delta\sigma_i$ es la generación entrópica por irreversibilidades internas en un proceso diferencial, siempre de valor positivo, que es función de línea como el calor, y que cuantifica las irreversibilidades en unidades de entropía.

$$\int T\delta\sigma_i \quad [2.18]$$

La integral [2.18] representa el trabajo de rozamiento debido a la fricción del fluido con las paredes y a la fricción interna como consecuencia de la viscosidad del mismo, aunque en el caso de sistema cerrado este término es pequeño.

Sistema abierto

De la misma forma, a partir de la ecuación 2.17, aplicándola a un volumen de control que representa un sistema abierto, se puede establecer el Segundo Principio para sistemas abiertos:

$$\dot{S} = \int_{S_c} \frac{\delta\dot{Q}}{T} + \dot{\sigma}_i + \sum s_e \dot{m}_e - \sum s_s \dot{m}_s \quad [2.19]$$

Donde $\dot{S}$ es la variación temporal de entropía del sistema, $\dot{\sigma}_i$ es la generación de entropía del sistema y s_s, s_e son las entropías específicas (por unidad de masa) salientes y entrantes del sistema. Por otro lado al término del calor se le denomina flujo entrópico calorífico, y es la integral del calor recibido por el sistema a través de su superficie S_c , que es la superficie del volumen de control, y que llega al fluido con una temperatura T que podría ser distinta en cada punto.