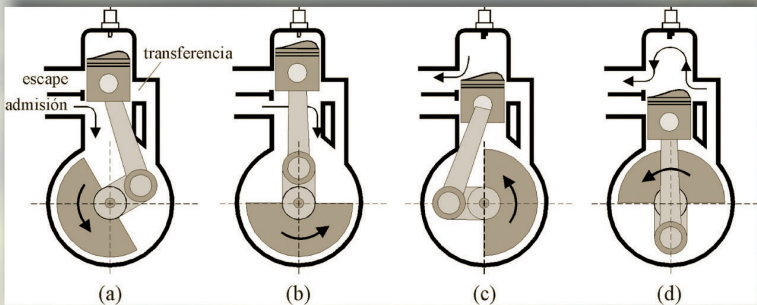


J. Arrègle
 J. Galindo
 J.V. Pastor
 J.R. Serrano

J.A. Broatch
 J.M. Luján
 R. Payri
 A.J. Torregrosa



PROCESOS Y TECNOLOGÍA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

José Ramón Serrano Cruz (coordinador)

Jean Arrègle
Jaime Alberto Broatch Jacobi
José Galindo Lucas
José Manuel Luján Martínez
José Vicente Pastor Soriano
Raúl Payri Marín
José Ramón Serrano Cruz
Antonio José Torregrosa Huguet

Procesos y tecnología de máquinas y motores térmicos



Editorial
Universitat Politècnica
de València

© José Ramón Serrano Cruz (coordinador)
Jean Arrègle
Jaime Alberto Broatch Jacobi
José Galindo Lucas
José Manuel Luján Martínez
José Vicente Pastor Soriano
Raúl Payri Marín
José Ramón Serrano Cruz
Antonio José Torregrosa Huguet

©2020, Editorial Universitat Politècnica de València
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref. 6621_01_01_01

ISBN: 978-84-9705-273-3 (versión impresa)
ISBN: 978-84-9048-919-2 (versión electrónica)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

ÍNDICE

BLOQUE I. INTRODUCCIÓN	11
LECCIÓN 1. LA MÁQUINA TÉRMICA. CONCEPTOS GENERALES	13
1.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA	15
1.2. CONCEPTO DE MÁQUINA Y MOTOR TÉRMICO. DEFINICIONES	30
1.3. CLASIFICACIÓN	33
1.4. CAMPOS DE APLICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE MOTORES TÉRMICOS	35
1.5. CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA	39
1.6. RESUMEN	47
1.7. BIBLIOGRAFÍA	48
BLOQUE II. MÁQUINAS TÉRMICAS ELEMENTALES	49
LECCIÓN 2. COMPRESORES VOLUMÉTRICOS	51
2.1. DEFINICIONES, CLASIFICACIÓN Y CAMPO DE APLI- CACIÓN DE LOS COMPRESORES VOLUMÉTRICOS	53
2.2. COMPRESORES VOLUMÉTRICOS ALTERNATIVOS	57
2.3. COMPRESORES VOLUMÉTRICOS ROTATIVOS	79
2.4. RESUMEN	87
2.5. BIBLIOGRAFÍA	88
LECCIÓN 3. ANÁLISIS TERMODINÁMICOS DE TURBOMÁ- QUINAS TÉRMICAS	89
3.1. INTRODUCCIÓN	91
3.2. ESTRUCTURA INTERNA DE LA TURBOMÁQUINA. DEFINICIÓN DE ESCALONAMIENTO	91
3.3. ECUACIÓN DE EULER	92
3.4. ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	95

3.5. DEFINICIÓN DE GRADO DE REACCIÓN	97
3.6. APLICACIÓN A TURBINAS RADIALES.....	97
3.7. APLICACIÓN A TURBINAS AXIALES.....	100
3.8. APLICACIÓN A TURBOCOMPRESORES.....	106
3.9. RENDIMIENTO DE UN ESCALONAMIENTO	110
3.10. RELACIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO DEL ESCALONAMIENTO Y EL DE LA TURBOMÁQUINA	111
3.11. RESUMEN.....	116
3.12. BIBLIOGRAFÍA	117
LECCIÓN 4. ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TURBOMÁQUINAS	119
4.1. INTRODUCCIÓN.....	121
4.2. ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE TURBINAS	121
4.3. TURBINAS DE VAPOR.....	121
4.4. TURBINAS DE GAS.....	122
4.5. ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE TURBOCOMPRESORES.....	123
4.6. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TURBOMÁQUINAS	123
4.7. TURBINAS	124
4.8. TURBOCOMPRESORES.....	126
4.9. REGULACIÓN.....	129
4.10. RESUMEN.....	131
4.11. BIBLIOGRAFÍA	132
BLOQUE III. MOTORES TÉRMICOS BASADOS EN TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS	133
LECCIÓN 5. MOTOR TURBINAS DE VAPOR. CICLOS	135
5.1. OBJETIVOS.....	137
5.2. INTRODUCCIÓN.....	137
5.3. CICLO DE CARNOT CON VAPOR DE AGUA.....	138
5.4. CICLO DE RANKING.....	141

5.5. TENDENCIAS Y LIMITACIONES DEL CICLO DE RANKING.....	143
5.6. MEJORAS AL CICLO DE RANKING.....	148
5.7. CICLO DE RANKINE REAL.....	160
5.8. CICLOS DE CENTRALES NUCLEARES.....	161
5.9. CICLOS DE CENTRALES DE COGENERACIÓN E INDUSTRIALES.....	163
5.10. RESUMEN.....	165
5.11. BIBLIOGRAFÍA.....	166
LECCIÓN 6. MOTOR TURBINAS DE VAPOR. ASPECTOS TECNOLÓGICOS.....	167
6.1. OBJETIVOS.....	169
6.2. INTRODUCCIÓN.....	169
6.3. CALDERA Y EQUIPO ASOCIADO.....	169
6.4. GRUPO TURBOALTERNADOR.....	181
6.5. SISTEMA DE CONDENSADO.....	182
6.6. SISTEMA DE AGUA DE CIRCULACIÓN.....	187
6.7. RESUMEN.....	191
6.8. BIBLIOGRAFÍA.....	191
LECCIÓN 7. MOTOR TURBINAS DE GAS. CICLOS.....	193
7.1. INTRODUCCIÓN.....	195
7.2. EL CICLO BÁSICO IDEAL DE LAS TURBINAS DE GAS.....	195
7.3. EL CICLO BÁSICO REAL DE LAS TURBINAS DE GAS.....	198
7.4. CICLO DE BRAYTON REGENERATIVO.....	200
7.5. CICLO DE TG DE COMPRESIÓN ISOTÉRMICA Y/O DE EXPANSIÓN ISOTÉRMICA.....	203
7.6. CICLO DE TG CON REFRIGERACIÓN INTERMEDIA.....	204
7.7. CICLO DE TG CON RECALENTAMIENTO INTERMEDIO.....	205
7.8. CICLO CERRADO DEL MOTOR TURBINA DE GAS.....	206
7.9. RESUMEN.....	207
7.10. BIBLIOGRAFÍA.....	207

LECCIÓN 8. MOTOR TURBINAS DE GAS. ASPECTOS TECNOLÓGICOS	209
8.1. INTRODUCCIÓN	211
8.2. EL COMPRESOR	211
8.3. ELEMENTO TURBINA	213
8.4. CÁMARA DE COMBUSTIÓN.	213
8.5. REGENERADORES	217
8.6. MATERIALES UTILIZADOS	219
8.7. LUBRICACIÓN DEL MOTOR TURBINA DE GAS	220
8.8. REGULACIÓN DEL MOTOR TURBINA DE GAS	221
8.9. DESARROLLO FUTURO DEL MOTOR TURBINA DE GAS	222
8.10. RESUMEN	224
8.11. BIBLIOGRAFÍA	224
LECCIÓN 9. PLANTAS DE POTENCIA DE CICLO COMBINADO	225
9.1. INTRODUCCIÓN	227
9.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO	227
9.3. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO	229
9.4. TRES EJEMPLOS DE CENTRAL DE CICLO COMBINADO DE 800 MW	234
9.5. RESUMEN	239
9.6. BIBLIOGRAFÍA	239
BLOQUE IV. MOTORES TÉRMICOS BASADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS (MCIA) ..	241
LECCIÓN 10. PARÁMETROS FUNDAMENTALES + CICLOS BÁSICOS	243
10.1. INTRODUCCIÓN	245
10.2. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN	246

10.3. ENCENDIDO PROVOCADO Y ENCENDIDO POR COMPRESIÓN	248
10.4. CICLOS DE TRABAJO.....	249
10.5. PARÁMETROS FUNDAMENTALES.....	255
10.6. FAMILIAS DE PARÁMETROS. CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	262
10.7. RESUMEN.....	265
10.8. BIBLIOGRAFÍA	265
LECCIÓN 11. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE MCIA.....	267
11.1. INTRODUCCIÓN.....	269
11.2. BLOQUE DE CILINDROS	269
11.3. CULATA.....	272
11.4. MECANISMO PARA EL MOVIMIENTO DEL ÉMBOLO ...	277
11.5. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	285
11.6. RESUMEN.....	287
11.7. BIBLIOGRAFÍA	287
LECCIÓN 12. BALANCE ENERGÉTICO DE MCIA.....	289
12.1. INTRODUCCIÓN.....	291
12.2. BALANCE DE ENERGÍA DE UN MCIA.....	291
12.3. ENERGÍA CEDIDA AL REFRIGERANTE	295
12.4. DISIPACIÓN MECÁNICA DE LA ENERGÍA.....	300
12.5. RESUMEN.....	311
12.6. BIBLIOGRAFÍA	312
LECCIÓN 13. RENOVACIÓN DE LA CARGA Y SOBREALIMENTACIÓN EN MCIA.....	313
13.1. FINALIDAD DEL PROCESO DE RENOVACIÓN DE LA CARGA.....	315
13.2. INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS.....	316

13.3. CUANTIFICACIÓN DEL PRC: RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO	320
13.4. SOBREALIMENTACIÓN EN MCIA	323
13.5. RESUMEN	328
13.6. BIBLIOGRAFÍA	329
LECCIÓN 14. COMBUSTIÓN EN MCIA DE ENCENDIDO PROVOCADO	331
14.1. INTRODUCCIÓN	333
14.2. COMBUSTIÓN CON MEZCLA HOMOGÉNEA	333
14.3. COMBUSTIÓN CON MEZCLA ESTRATIFICADA	338
14.4. DISPERSIÓN CÍCLICA	339
14.5. COMBUSTIÓN ANORMAL	341
14.6. FORMACIÓN DE LA MEZCLA	346
14.7. RESUMEN	350
14.8. BIBLIOGRAFÍA	351
LECCIÓN 15. COMBUSTIÓN EN MCIA DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN	353
15.1. INTRODUCCIÓN	355
15.2. FENOMENOLOGÍA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DIESEL	355
15.3. LAS TRES FASES DE LA COMBUSTIÓN	357
15.4. DISEÑO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	361
15.5. SISTEMAS DE INYECCIÓN DIESEL	364
15.6. RESUMEN	368
15.7. BIBLIOGRAFÍA	368

BLOQUE V. IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	369
LECCIÓN 16. CONTAMINACIÓN POR MOTORES TÉRMICOS	371
16.1. INTRODUCCIÓN	373
16.2. MECANISMOS DE FORMACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES.....	373
16.3. EMISIONES EN MOTORES TÉRMICOS	381
16.4. APÉNDICE: EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. ORIGEN Y EVOLUCIÓN.....	391
16.5. RESUMEN.....	392
16.6. BIBLIOGRAFÍA	393
LECCIÓN 17. PERSPECTIVAS FUTURAS	395
17.1. INTRODUCCIÓN	397
17.2. VÍAS DE EVOLUCIÓN DE LOS MOTORES TÉRMICOS DE AUTOMOCIÓN.....	397
17.3. VÍAS DE EVOLUCIÓN DE LAS PLANTAS DE POTENCIA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	398

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de transferencia
a	Velocidad del sonido
C_p	Calor específico a presión constante
C_v	Calor específico a volumen constante
c	Velocidad de un fluido
c_m	Velocidad lineal media del pistón
d, D	Diámetro
E	Energía
E_c	Energía cinética
E_z	Energía potencial
F	Dosado. Fuerza
F_e	Dosado estequiométrico
F_R	Dosado relativo
f	Coefficiente de fricción.
GR	Grado de Reacción
g	Aceleración de la gravedad
g_{ef}	Consumo específico
H	Entalpía.
H_p	Poder calorífico del combustible
h	Entalpía específica
$h\nu$	Componente ultravioleta de la radiación solar
k	Exponente politrópico.
l, L	Longitud
M	Par
m	Masa
\dot{m}	Gasto másico
N	Potencia mecánica
N_i	Potencia indicada
N_e	Potencia efectiva
N_{pm}	Potencia de pérdidas mecánicas
n	Régimen de giro
p	Presión
p_{ma}	Presión media de elementos auxiliares
p_{mb}	Presión media de pérdidas por bombeo
p_{me}	Presión media efectiva
p_{mpm}	Presión media de pérdidas mecánicas
p_{mR}	Presión media de pérdidas por fricción
Q	Calor. Calor específico
\dot{Q}	Potencia calorífica
r	Relación de compresión volumétrica. Radio

S	Entropía. Carrera del pistón
s	Entropía específica
T	Temperatura
t	Tiempo
U	Energía interna
u	Energía interna específica. Velocidad lineal del álabe
V	Volumen
V_D	Cilindrada unitaria
V_T	Cilindrada total
\dot{V}	Caudal volumétrico
v	Volumen específico
W	Trabajo mecánico. Trabajo específico
w	Velocidad relativa en escalonamientos
x	Título de vapor
Z	Factor de recuperación en escalonamientos
z	Número de cilindros. Cota gravitatoria

Símbolos griegos

α	Ángulo de cigüeñal. Grado de carga. Holgura relativa
ε	Eficiencia
γ	Exponente adiabático, peso específico
η	Rendimiento
π_c	Relación de presiones
ρ	Densidad
ω	Velocidad angular
τ	Momento cinético

BLOQUE I

INTRODUCCIÓN

LECCIÓN 1

LA MÁQUINA TÉRMICA. CONCEPTOS GENERALES

José Ramón Serrano Cruz

1.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA	15
<i>1.1.1. ANTECEDENTES DE LAS MÁQUINAS Y LOS MOTORES TÉRMICOS</i>	15
<i>1.1.2. LA MÁQUINA DE VAPOR</i>	17
<i>1.1.3. LAS TURBINAS DE VAPOR</i>	19
<i>1.1.4. LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS</i>	20
<i>1.1.5. MOTORES ROTATIVOS DE COMBUSTIÓN INTERNA</i>	24
<i>1.1.6. LAS TURBINAS DE GAS</i>	25
<i>1.1.7. LOS MOTORES DE REACCIÓN</i>	27
1.2. CONCEPTO DE MÁQUINA Y MOTOR TÉRMICO. DEFINICIONES	30
1.3. CLASIFICACIÓN	33
<i>1.3.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS TÉRMICAS</i>	33
<i>1.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES TÉRMICOS</i>	33

1.4. CAMPOS DE APLICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE MOTORES TÉRMICOS	35
1.5. CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA	39
1.5.1. FORMAS DE ENERGÍA.....	39
1.5.2. PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	41
1.5.3. PROCESOS REVERSIBLES E IRREVERSIBLES. SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA.	42
1.5.4. PROCESOS ELEMENTALES.....	43
1.5.5. PROCESOS DE COMPRESIÓN EN LAS MÁQUINAS TÉRMICAS.....	43
1.5.6. PROCESOS DE EXPANSIÓN EN LAS MÁQUINAS TÉRMICAS	45
1.5.7. PROCESOS CERRADOS O CICLOS.....	45
1.6. RESUMEN	47
1.7. BIBLIOGRAFÍA	48

1.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

1.1.1. ANTECEDENTES DE LAS MÁQUINAS Y LOS MOTORES TÉRMICOS

Los antecedentes más primitivos de la obtención de la energía mecánica del fuego datan del siglo I a. de C., cuando Herón de Alejandría describe su “esfera de Eolo”, Figura 1.1. Este aparato, alimentado con vapor a través de sus soportes huecos, consistía en una esfera giratoria provista de tubos acodados y orientados en sentido contrario.

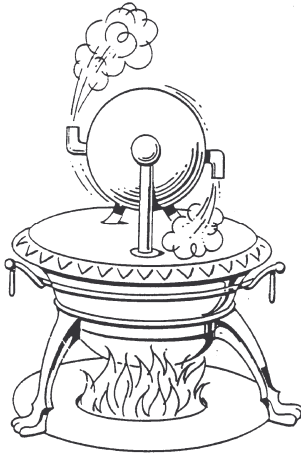


Figura 1.1. Esfera de Eolo de Herón de Alejandría

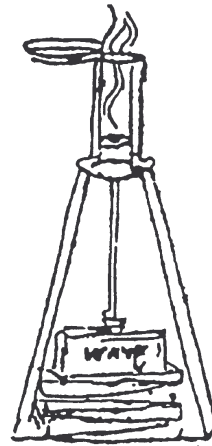


Figura 1.2. Motor de Leonardo da Vinci

Estos aparatos, fueron utilizados en el antiguo Egipto con fines litúrgicos y recibieron más tarde el nombre de “Eolipilas”. Otro dispositivo de la misma época, también descrito por Herón, consistía en un tubo vertical con cuatro tubos acodados, unidos perpendicularmente al anterior, que al ser alimentados con aire caliente a través del primero hacía girar una plataforma sobre la que se situaban objetos decorativos. Estos aparatos son los precursores de las turbinas de vapor y de gas actuales, aunque el principio de reacción pura, en el que se fundamentaban, no ha sido aplicado a ninguna turbina moderna.

Tal vez la primera propuesta escrita de un motor de combustión interna de pistón se deba al genial y polifacético Leonardo da Vinci, quién describió en su libro de notas, a principios de 1509, un mecanismo denominado “motor de fuego” que según su autor servía “para elevar un peso por el fuego” (Figura 1.2). Curiosamente, hasta muy recientemente (Goldbeck 1972) este manuscrito no fue correctamente interpretado por su ilegibilidad y difícil comprensión. Este motor consistía en una base triangular que soportaba un cilindro de longitud igual a 10 veces el diámetro. La parte inferior del cilindro estaba cerrada por un pistón del que suspendía el peso a elevar. Si bien al

principio se creía que se proponía una combustión externa, parece aclarado que se debía producir fuego en el interior del cilindro, que llenaba de gases esta cavidad, extinguiéndose al cerrar el cilindro por la tapa superior, posteriormente se refrigeraban los gases y el efecto de la presión atmosférica elevaba el peso. Parece descartado que se propusiera como combustible pólvora, ya que por el dibujo de Leonardo, los gases de la combustión se corresponden más bien con una combustión más progresiva.

En 1543 el marino español Blasco de Garay pretendió propulsar un barco con una gran eolipila en el puerto de Barcelona, cosa que resultó ser un fraude. Casi un siglo después Giovanni de Branca pretendió accionar una rueda de paletas con un chorro de vapor procedente de una marmita. Ambas ideas nunca llegaron a constituirse con éxito como realizaciones prácticas lo que resulta fácilmente explicable. En efecto, las turbomáquinas, a pesar de su aparente simplicidad necesitan una mayor base científica que la existente en aquella época, por lo que no es casualidad que se desarrollasen después que las volumétricas, que lo hicieron cuando aún existía un desconocimiento absoluto de las leyes de la termodinámica.

En el siglo XVII las ideas de la naturaleza física de la atmósfera eran más cualitativas que cuantitativas. La problemática planteada en esta época a los ingenieros de minas sobre el límite máximo de aspiración de una bomba en su aplicación a la extracción de agua de las galerías de las minas, fue la que finalmente llevó a la comprensión de la naturaleza de la presión atmosférica. En 1694, Torricelli, brillante discípulo de Galileo, descubrió el valor de la presión atmosférica. Diez años después Von Guericke hizo en Magdeburgo una espectacular demostración de “la inmensa fuerza que la atmósfera podía ejercer”, comprobando que dos tiros de ocho caballos cada uno no podían separar dos hemisferios de 50 cm de diámetro entre los que se había hecho el vacío. En otro experimento, más inmediatamente relacionado con la máquina de vapor, mostró que cuando se creaba un vacío parcial bajo un émbolo de grandes dimensiones introducido en un cilindro, la fuerza sumada de 50 hombres no podía evitar que la presión atmosférica llevase el émbolo al fondo del cilindro. Tales experimentos dieron vida a la idea de que se podría utilizar la presión atmosférica como fuente de energía ventajosa si se encontrase algún medio sencillo para crear el vacío repetidas veces.

En 1680 Huygens, científico holandés ideó una máquina en la que se hacía explotar pólvora en un cilindro encerrado por un pistón, los productos gaseosos de la combustión salían a través de unas válvulas que se cerraban al enfriarse el conjunto, creándose un vacío parcial en el interior del cilindro y desplazándose el pistón hacia el fondo del cilindro por la presión atmosférica.

Denis Papin, ayudante de Huygens, dirigió su atención hacia el vapor de agua y construyó un dispositivo de laboratorio que sería el fundamento de la máquina de vapor de Newcomen. El aparato consistía esencialmente en un cilindro vertical, cerrado por su parte inferior, que contenía un émbolo con un vástago. En su fondo se ponía agua la cual se hacía hervir generándose vapor que hacía subir el émbolo y, posteriormente, al enfriarse, condensaba el vapor y el émbolo era empujado por la presión atmosférica.

Denis Papin expuso sus ideas con las siguientes palabras, que constituyen una admirable descripción del modo de actuar de las primeras máquinas de vapor: “Puesto que el agua goza de la propiedad de que una pequeña cantidad de ella transformada en vapor por medio del calor tiene una fuerza elástica similar a la del aire, y que por medio del frío se transforma de nuevo en agua, de manera que no queda ni rastro de aquella fuerza elástica, he llegado a la conclusión de que se pueden construir máquinas en cuyo interior, por medio de un calor no demasiado intenso y a bajo costo, se puede producir el vacío perfecto, que de ningún modo se podría conseguir utilizando pólvora”.

Estas ideas fueron rápidamente llevadas al terreno práctico por Savery, Newcomen y Semeaton. En 1698 Thomas Savery patentó su “máquina de extraer agua por medio del fuego” que fue descrita en su opúsculo “El amigo del minero” nombre con el que también fue conocida. La bomba de vapor de Savery tuvo una vida efímera debido a la aparición de la máquina de vapor de Newcomen una década después.

1.1.2. LA MÁQUINA DE VAPOR

Si han existido inventos que han influido de forma decisiva en el desarrollo de la tecnología, uno de ellos ha sido sin duda la invención de la máquina de vapor a principios del siglo XVIII. Desde dicha fecha hasta finales del siglo XIX, durante más de 150 años, la máquina de vapor fue el único motor térmico utilizable por el hombre, y jugó un papel trascendental en la revolución industrial. A ninguna otra máquina se le han asociado tantas ideas geniales a lo largo de su desarrollo, no superado en algunos aspectos por las máquinas térmicas de nuestros días.

En 1702 Thomas Newcomen, herrero de Dartford y contemporáneo de Savery al que más tarde se asoció, construyó la primera máquina de vapor adoptando el cilindro y el pistón propuestos por Papin. Aunque los principios eran los mismos, existían ciertas diferencias de las cuales las más fundamentales eran la producción de vapor fuera del cilindro y la utilización de una camisa de agua para enfriar el cilindro. La poca eficacia de este procedimiento para condensar el vapor hacía la máquina notablemente lenta.

Se cuenta que una fuga de agua hacia el interior del cilindro a causa de un poro produjo tan rápida condensación del vapor de agua que el pistón rompió la cadena que le unía al balancín, así como el fondo del cilindro y la parte superior de la caldera. Este providencial accidente supuso el descubrimiento de la condensación por mezcla que jugaría un papel muy importante en posteriores desarrollos.

La presión en la cara superior del cilindro, era la atmosférica por lo que a estas máquinas se las llamó con bastante frecuencia y propiedad “máquinas atmosféricas”.

La estanqueidad entre cilindro y émbolo se consiguió empleando segmentos de cuero sobre los que se mantenía un cierto nivel de agua, solventando así los problemas ligados al tamaño de las piezas y al diferente acabado interior de los cilindros. Este fue el primer cierre hidráulico de la historia de la tecnología.

En 1774 el rendimiento de las máquinas de Newcomen se había logrado elevar del 0.5 % al 1 % debido a los estudios realizados por Smeaton desde 1767.

Las aportaciones más importantes al desarrollo de la máquina de vapor fueron sin duda hecha por James Watt, de oficio constructor de instrumentos científicos, que trabajando en la Universidad de Glasgow intervino en la reparación de un modelo reducido de motor atmosférico; el interés que despertó en él, le hizo dedicar el resto de su vida a la mejora y construcción de los mismos.

La mejora quizá más radical de las introducidas por Watt en la máquina de vapor fue la invención del condensador separado. En 1796 patentaba estas mejoras con el título “Nuevo método para reducir el consumo de vapor y combustible en las máquinas de fuego”. A pesar de estas mejoras, el rendimiento no pasaba del 2 %; el doble del motor atmosférico mejorado por Smeaton y cuatro veces el del primitivo motor de Newcomen.

La innovación del empleo del doble efecto, que aumentaba notablemente la potencia de la máquina, presentó a Watt el problema de transmitir el movimiento del pistón, en su carrera ascendente, al balancín. Para este propósito no era posible utilizar una cadena como en la máquina de simple efecto. La invención del “Paralelogramo articulado”, en 1782, que él consideraba su más elegante dispositivo, permitió transmitir el movimiento lineal del pistón al balancín cuya punta describía un arco circular. Este dispositivo se utilizó durante más de un siglo.

Posteriormente, la máquina de vapor fue perfeccionándose con el empleo de la alta presión (Trevithick, 1802), la expansión múltiple (Edwards, 1815 y McNaught, 1845), el cilindro horizontal (Taylor y Martineau, 1825), etc., así como con el empleo de mejores diseños, materiales y mecanizado de elementos, llegándose a una sustancial mejora del rendimiento y de la relación potencia/peso, y a potencias máximas del orden de 25000 C.V. en casos excepcionales.

La aparición de la turbina de vapor a finales del siglo XIX fue la primera competencia seria que encontró esta máquina de émbolo. La elevada potencia específica de la turbina, sencillez de funcionamiento, seguridad de marcha, mayor posibilidad de utilizar elevadas presiones y de alcanzar elevadas potencias fueron cualidades a las que la máquina de vapor sólo podía oponer su mejor adaptabilidad a las variaciones de carga y régimen y cambio de sentido de giro. Por ello, la máquina de vapor fue rápidamente desplazada de las grandes potencias.

La aparición de los motores de combustión interna alternativos significó el principio del fin de la máquina de vapor, que desapareció prácticamente del mercado a mediados de este siglo, aproximadamente cuando se construía la primera turbina de gas.

En 1816 Robert Stirling ideó un motor de aire caliente de ciclo cerrado, sin embargo, sus aplicaciones se limitaron a algunas instalaciones de bombeo de agua realizadas durante los años posteriores. Debido a problemas de tipo metalúrgico, las temperaturas de calentamiento del aire eran bajas, por lo que las presiones alcanzables eran de 5 a 6 bar solamente, lo cual situaba al motor de aire caliente en clara desventaja frente a las máquinas de vapor de la época.

Alrededor de 1930, los laboratorios Philips de Eindhoven iniciaron un programa de investigación sobre este motor habiendo realizado grandes progresos hasta la actualidad. Hoy existen diversas firmas que realizan trabajos destinados a implantarlo, tanto en usos estacionarios como en automoción, como por ejemplo General Motors-MAN-NWM, United Stirling AB, etc. Por el momento es difícil predecir su futuro. Aunque tiene innegables ventajas, como son la baja emisión de contaminantes y un elevado rendimiento indicado, presenta el inconveniente de su relativamente baja relación potencia/peso, característica típica de los motores de combustión externa.

1.1.3. LAS TURBINAS DE VAPOR

La primera turbina de vapor operativa fue diseñada por el ingeniero inglés Ch. A. Parsons, hijo menor del Conde de Rosse, que buscaba un motor que pudiese mover directamente una dinamo, para lo cual era necesario evidentemente una velocidad de giro mayor que la de las máquinas de vapor alternativas.

Consiguió alcanzar un alto rendimiento a base de fraccionar la expansión del vapor entre una serie de pequeñas turbinas elementales (escalonamientos) en las que el vapor se expandía tanto en los álabes fijos (estator) como en los móviles (rotor), constituyendo así lo que conocemos como turbina axial de reacción.

Sus primeras patentes fueron obtenidas en 1884, año en el que construyó y puso en servicio un turbogenerador que giraba a 1800 rpm. Sus investigaciones avanzaron rápidamente y, en 1891 construyó la primera turbina de condensación, estructurada en cuerpos, con menor consumo de vapor, menor peso y mayor fiabilidad que una máquina de vapor de igual potencia, y además con ausencia de vibraciones.

Parsons coronó el éxito alcanzado en el campo de la producción de electricidad aplicando por primera vez la turbina de vapor a la propulsión naval. Superadas algunas dificultades ligadas a la elevada velocidad de giro de la turbina, que obligaron al empleo de hélices especiales y posteriormente al uso de reductores, consiguió alcanzar la insólita velocidad de 34.5 nudos en unas maniobras navales de 1897. El barco, llamado “Turbinia”, estaba equipado con tres turbinas de alta, baja y media presión que totalizaban unos 2000 C.V.

Las turbinas marinas se desarrollaron con enorme velocidad, a pesar de la desconfianza tradicional de la marina por los motores. Diez años después de la demostración de la “Turbinia”, los barcos de la línea de la Cunard iban equipados de turbinas de 50000 kW, y éstas eran también empleadas por la marina inglesa.

Simultáneamente, el sueco Gustav Laval había desarrollado una turbina de distinto diseño que, perfeccionada en 1887, consistía en que el chorro de vapor expansionado incidía sobre los álabes del rotor constituyendo lo que conocemos como turbina axial de acción. Aunque con un rendimiento potencialmente inferior al de la turbina de reacción de varios escalonamientos, esta máquina, comparativamente simple, logró una considerable aceptación para pequeñas potencias, especialmente después de que el ingeniero americano C.G. Curtis en 1890 introdujese los denominados escalonamientos de velocidad.

1.1.4. LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

El motor de combustión interna alternativo (MCIA) hizo su aparición efectiva un siglo más tarde que la máquina de vapor pero su historia es igual de larga ya que ambos pueden considerarse derivados de los experimentos realizados por Huygens y Papin a mediados del siglo XVII con motores de pólvora. Problemas ligados a la renovación de la carga, que resultaba extremadamente peligrosa, hicieron derivar a Papin hacia el uso del vapor. La idea fundamental, por tanto, había sido concebida mucho antes de que existiesen los medios para llevarla a la práctica satisfactoriamente o el incentivo necesario para ponerla en funcionamiento.

Sin embargo, en 1794, el inglés Robert Street patentó el primer motor alternativo de combustión interna que utilizaba una mezcla de aire y combustible gaseoso. Street, que era fabricante de tamices, propuso la utilización de esencia de trementina como combustible de estos motores.

En el motor de Street, Figura 1.3, el combustible líquido era introducido en el interior del cilindro y vaporizado calentando una porción del mismo. Al mismo tiempo, una palanca se utilizaba para comenzar la subida del pitón en el interior del cilindro. Cuando el pistón se movía hacia arriba, el aire exterior era arrastrado al interior del cilindro, realizándose la combustión mediante una llama que penetraba por un agujero practicado en la pared del cilindro. El aumento de presión debido al proceso de combustión elevaba aún más el pistón. Posteriormente la fuerza de gravedad devolvía al pistón a su posición original comenzando un nuevo ciclo.

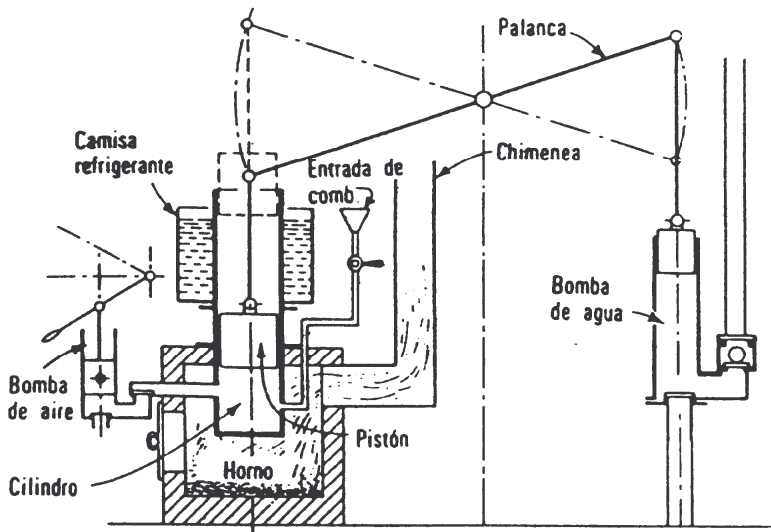


Figura 1.3. Motor de Street

Durante el siglo XIX, la disponibilidad de gas de hulla y posteriormente de los combustibles volátiles derivados del petróleo, para lo que no existía demanda, hizo crecer el interés por los motores de combustión interna alternativos. Con la enorme intuición que le caracterizaba, Carnot ya escribía en 1824: “La utilización del aire atmosférico para el desarrollo de la fuerza motriz del fuego presentaría en la práctica grandes dificultades, aunque quizá no insuperables. Si se llegase a vencerlas, el aire ofrecería notables ventajas sobre el vapor”.

El motor de vacío se siguió evolucionando en diversas realizaciones. Un ejemplo de las mismas es la patente de 1854 de Barsanti y Matteucci (Figura 1.4) en Inglaterra. En el diseño de su motor se introducía un volante que estaba engranado con una cremallera solidaria con el pistón. Como únicamente una de las carreras del pistón actuaba sobre el volante, se indicaba la necesidad de dos cilindros. Como novedad importante se introducía el accionamiento sincronizado con el movimiento del pistón de una válvula de corredera para permitir la entrada del combustible (hidrógeno en este caso) así como la producción de una chispa que provocaba el encendido.

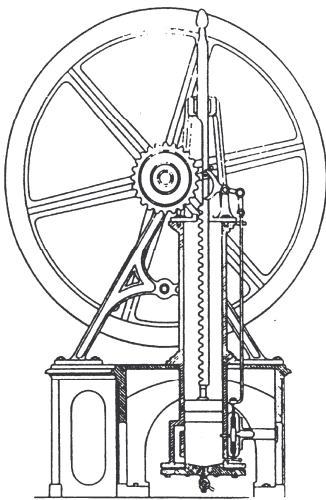


Figura 1.4. Motor de Barsanti y Matteucci

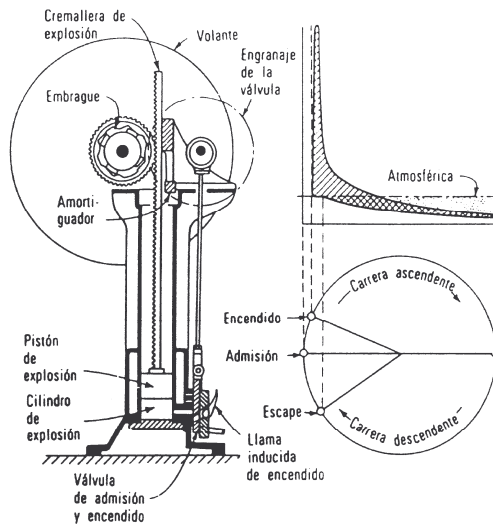


Figura 1.5. Motor de Otto y Langen

El primer motor de combustión interna capaz de soportar una utilización continuada en el ámbito industrial, fue construido en Francia por Lenoir (1859), el cual se inspiró en muchos aspectos en las máquinas de vapor de la época. El motor de Lenoir estaba provisto de un sistema de encendido eléctrico, en el cual se generaba una chispa eléctrica por medio de una bobina y se inflamaba una mezcla de gas y aire introducida previamente en el cilindro. El rendimiento era considerablemente más bajo que el de las

máquinas de vapor contemporáneas, fundamentalmente debido a la falta de carrera de compresión (cuya necesidad no es en modo alguno obvia sin un estudio termodinámico previo) y a la baja relación de expansión utilizada. Pese a todo, se construyeron cerca de 500 motores de este tipo en Francia e Inglaterra entre los años 1860 y 1865.

En 1866, Nikolaus August Otto y Eugen Langen desarrollaron en Alemania un motor de combustión interna alternativo de cilindro vertical que fue presentado en la Exposición industrial de París en 1867 (Figura 1.5). Se llegaron a fabricar alrededor de 5000 unidades de este motor, considerarse como el primer motor de combustión interna alternativo construido en serie para la industria.

Desde principios del siglo XIX, los científicos intentaron mejorar el rendimiento térmico y el consumo de los motores de combustión interna existentes, haciéndose muchas recomendaciones para la mejora de los rendimientos de éstos, siendo las más completas, las recogidas en una pequeña publicación realizada por el francés Alphonse Beau de Rochas en 1862. Para obtener un buen rendimiento, Beau de Rochas, proponía la utilización de un cilindro único con los siguientes cuatro tiempos:

Admisión de la mezcla de aire.

Compresión de la misma.

Ignición de dicha mezcla en el punto muerto superior del pistón, con la consiguiente explosión y expansión de los gases.

Descarga de los productos de la combustión desde el cilindro.

Aunque Beau de Rochas había formulado el concepto de ciclo de cuatro tiempos, nunca construyó un motor basado en su teoría. El concepto fue implementado por Nikolaus Otto, el cual en 1876, construyó un motor basado en estos principios. En 1878 el motor de Otto fue introducido formalmente en todo el mundo bajo la firma Otto Langen (hoy KHD), y en 1890 habían sido producidas unas 50000 unidades.

Ya que Otto fue el primero en implementar el ciclo de cuatro tiempos en un motor real, los motores que operan de esta manera son comúnmente conocidos como motores de ciclo Otto.

El ciclo de dos tiempos, tal y como lo conocemos hoy, se debe a Sir Douglas Clerk que aplicó la compresión a este tipo de motor en 1878 en Escocia. Este tenía una bomba de barrido independiente y lumbreras de escape controladas por el pistón (Figura 1.6).

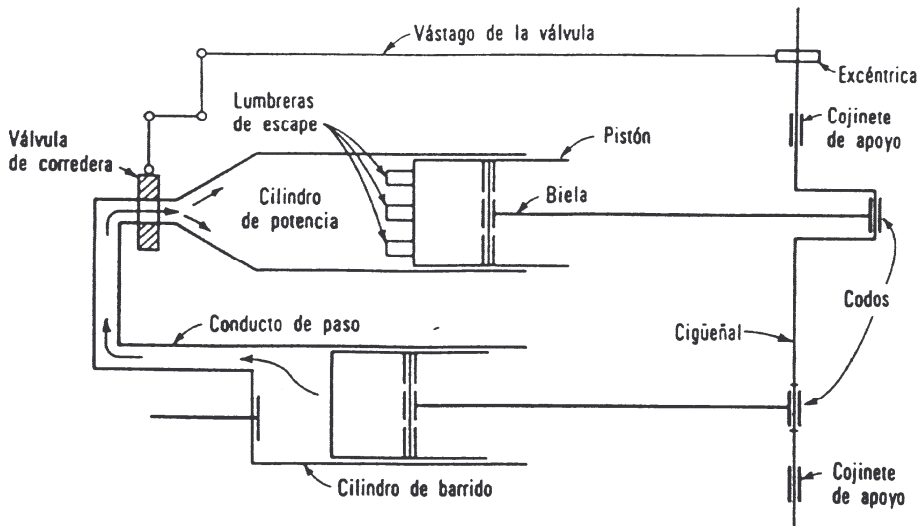


Figura 1.6. Motor de Clerk

A finales del siglo pasado, las mejoras realizadas en los motores de gas en cuanto a seguridad y rendimiento, les hacían francamente competitivos con las máquinas de vapor, aunque su ubicación estaba ligada a los lugares en los que se producía el combustible. Por ello se hizo rápidamente patente la necesidad de utilizar combustibles líquidos que pudieran transportarse y almacenarse con una peligrosidad mucho menor que el gas de hulla utilizado en aquella época.

En 1890 aparece en Inglaterra, con un éxito considerable, el motor de bulbo caliente (“hot bulb”) con baja relación de compresión de H. Akroyd Start. Desarrollaba una potencia de 5 C.V. a 125 rpm con un rendimiento del 13.3%.

En 1892, el ingeniero alemán Rudolf Diesel patenta el primer motor de encendido de compresión, conocido a partir del entonces con el nombre genérico de motor Diesel, y es construido con éxito en 1897. Resulta notable la cuidadosa atención prestada en su diseño a los principios de la termodinámica, que están plasmados en su obra “Theorie und Konstruktion eines Retionellen Wärme-motors”. La idea original consistía en comprimir el aire en el cilindro hasta la temperatura de autoencendido del combustible. El combustible se inyectaba al final de la compresión con una ley tal que la combustión se realizase a temperatura constante, para que se aproximase al ciclo de Carnot en la medida de lo posible. Aunque este planteamiento teórico no pudo como tal ser puesto en práctica, su motor nació ya con un rendimiento del 26.2 %, notablemente alto para la época, y una potencia de unos 20 C.V. a 172 rpm.

El primer motor de gasolina fue diseñado y patentado por el ingeniero alemán Gottlieb Daimler en 1885. Se trataba de un monocilíndrico vertical, cuatro tiempos refrigerado por aire, y dotado de un carburador de superficie. El encendido se aseguraba

Para seguir leyendo, inicie el proceso de compra, click aquí