

ÍNDICE

<i>Prefacio</i>	15
-----------------------	----

BLOQUE TEMÁTICO I **MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS**

<i>Capítulo 1. GENERALIDADES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS</i>	21
Objetivos fundamentales del capítulo.....	21
1.1. Componentes y procesos básicos de un motor de combustión interna alternativo	23
1.2. Clasificación de los MCIA	25
1.2.1. Según el proceso de combustión	26
1.2.2. Según el modo de realizar el ciclo	28
1.2.3. Según el tipo de refrigeración.....	32
1.2.4. Según la presión de admisión	34
1.2.5. Según el número y disposición de cilindros	34
1.3. Evolución del fluido de trabajo durante el funcionamiento del motor ...	35
1.3.1. Diagrama $p-\alpha$	35
1.3.2. Diagrama del indicador.....	37
1.4. Prestaciones y curvas características del motor.....	39
1.5. Ciclos del aire equivalente	53
1.5.1. Ciclo de aire equivalente de volumen constante	53
1.5.2. Ciclo de aire equivalente de presión limitada	61
1.6. Otros motores volumétricos.....	77
 <i>Capítulo 2. EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO Y EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN</i>	 81
Objetivos fundamentales del capítulo	81

2.1. Tipos de combustión en motores de combustión interna alternativos ...	83
2.2. Combustión en MEP	84
2.2.1. Conceptos básicos de combustión en MEP	84
2.2.2. Fases de la combustión	87
2.2.2.1. Primera fase	87
2.2.2.2. Segunda fase	88
2.2.2.3. Tercera fase	92
2.2.3. Factores que influyen en la determinación del avance del encendido	92
2.2.4. Combustión anormal en MEP. Combustión detonante y encendido superficial	95
2.2.4.1. Picado o combustión detonante en MEP.....	96
2.2.4.2. Encendido superficial	99
2.3. Combustión en MEC	101
2.3.1. Conceptos básicos en combustión en MEC.....	101
2.3.2. Principales funciones de la inyección en MEC. Micromezcla y macromezcla	102
2.3.3. Fases de la combustión	104
2.3.3.1. Fase del tiempo de retraso	104
2.3.3.2. Combustión rápida	107
2.3.3.3. Combustión por difusión	108
2.3.4. Factores que influyen en el diagrama $p-\alpha$	109
2.4. Otros tipos de combustión en MCIA	113
2.4.1. Motores duales	114
2.4.2. Motores de mezcla estratificada	114
2.4.2.1. Motores de combustión ACT o HCCI	115
2.5. Formación de especies contaminantes en MCIA	116
2.5.1. Emisiones contaminantes	116
2.5.2. Formación de especies contaminantes en MEP	120
2.5.2.1. Formación de CO.....	121
2.5.2.2. Formación de NO _x	122
2.5.2.3. Emisión de hidrocarburos no quemados	123
2.5.2.4. Concentración de contaminantes en función de la riqueza: zona óptima de trabajo	124
2.5.3. Formación de especies contaminantes en MEC	126
2.6. Reducción de emisiones contaminantes en MCIA	127
2.6.1. Medidas sobre el diseño y operación del motor	128
2.6.2. Sistemas de postratamiento de gases de escape	129

<i>Capítulo 3. PÉRDIDAS DE CALOR Y REFRIGERACIÓN. PÉRDIDAS MECÁNICAS Y LUBRICACIÓN</i>	133
Objetivos fundamentales del capítulo	133
3.1. Introducción	134
3.2. Balance térmico de un MCIA	134
3.3. Localización y factores de los que dependen las pérdidas de calor	145
3.4. Fundamento de los sistemas de refrigeración	151
3.4.1. Análisis comparativo de la refrigeración por líquido y por aire....	151
3.4.2. Consideraciones sobre la gestión energética de los sistemas de refrigeración por líquido	159
3.5. Localización y factores de los que dependen las pérdidas mecánicas por fricción	164
3.6. Sistemas de lubricación	170
3.6.1. Lubricación a presión	171
 <i>Capítulo 4. RENOVACIÓN DE LA CARGA</i>	179
Objetivos fundamentales del capítulo	179
4.1. Introducción	180
4.2. Renovación de la carga en motores de cuatro tiempos	181
4.2.1. Trabajo de bombeo	182
4.2.2. Rendimiento volumétrico	183
4.2.3. Factores que influyen en la renovación de la carga	187
4.2.3.1. Transmisión de calor	187
4.2.3.2. Pérdidas de presión	188
4.2.3.3. Efectos de compresibilidad del fluido	189
4.2.3.4. Diagrama de distribución e inercia del fluido	191
4.2.3.5. Dinámica del gas en los conductos y colectores	194
4.2.3.6. Evaporación del combustible en MEP	196
4.2.3.7. Presión parcial de la masa fresca	197
4.2.4. Influencia del rendimiento volumétrico sobre las curvas características del motor	197
4.2.5. Válvulas	199
4.2.6. Sistemas de distribución variable	200
4.3. Renovación de la carga en motores de dos tiempos	205
4.3.1. Introducción y diagrama de distribución	205
4.3.2. Tipos de barrido	208
4.3.2.1. Tipos de barrido atendiendo a la bomba de barrido	208
4.3.2.2. Tipos de barrido atendiendo a la forma de la corriente	209

4.3.3. Coeficientes de renovación de la carga en motores de dos tiempos .	212
4.3.4. Barrido ideal y renovación teórica de la carga en motores de dos tiempos	215
4.3.5. Dosado real y dosado aparente en motores de dos tiempos	216
 <i>Capítulo 5. REQUERIMIENTOS DE MEZCLA Y SISTEMAS</i>	
DE FORMACIÓN DE MEZCLA	221
Objetivos fundamentales del capítulo	221
5.1. Introducción	222
5.2. Requerimientos de mezcla en MEP	223
5.2.1. Determinación del requerimiento de mezcla en régimen permanente	224
5.2.2. Determinación del requerimiento de mezcla en transitorios	227
5.3. Sistemas de formación de mezcla en MEP	228
5.3.1. Sistemas de formación de mezcla con carburador	229
5.3.1.1. Objetivo de los carburadores	229
5.3.1.2. Modo de operación del carburador elemental	230
5.3.1.3. Sistemas de compensación	233
5.3.1.4. Tipos de carburadores	236
5.3.2. Formación de mezcla por medio de inyección de gasolina	240
5.3.2.1. Sistemas de inyección en el colector de admisión	241
5.3.2.2. Sistemas de inyección directa	244
5.3.2.3. Modos de funcionamiento de los sistemas de inyección directa	247
5.3.2.4. Inyección directa de aire y combustible	250
5.4. Sistemas de formación de mezcla en MEC	251
5.4.1. Descripción general de los sistemas de inyección	254
5.4.1.1. Tareas	254
5.4.1.2. Componentes	255
5.4.1.3. Clasificación	257
5.4.2. Sistemas de inyección	258
5.4.2.1. Sistemas con bomba individual	258
5.4.2.2. Bombas de inyección en línea	258
5.4.2.3. Bomba de inyección rotativa con distribuidor	259
5.4.2.4. Sistemas inyector-bomba	260
5.4.2.5. Sistemas de raíl común	262
5.4.3. Inyectores y toberas	264
5.4.4. Adecuación de la inyección a la operación del motor	265

BLOQUE TEMÁTICO II TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS

<i>Capítulo 6. CONCEPTOS BÁSICOS GENERALES SOBRE</i>	
TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS	269
Objetivos fundamentales del capítulo	269
6.1. Ecuación fundamental de las turbomáquinas	271
6.2. Análisis del intercambio energético que tiene lugar en las turbomáquinas	276
6.3. Estructura de las turbomáquinas térmicas	279
6.4. Clasificación de las turbomáquinas térmicas	281
6.5. Aplicación de las ecuaciones y conceptos anteriores a turbinas y compresores. Tipos de escalonamientos	286
6.5.1 Turbomáquinas térmicas axiales	286
6.5.1.1 Turbomáquinas axiales de reacción	286
6.5.1.2 Turbomáquinas axiales de acción	289
6.5.1.3 Turbocompresores axiales	292
6.5.2. Turbomáquinas térmicas radiales	298
6.5.2.1. Turbinas centrípetas	299
6.5.2.2. Turbocompresores centrífugos	300
6.6. Criterios que se utilizan para definir el rendimiento de las turbomáquinas térmicas	303
6.7. Origen de las pérdidas en las turbomáquinas térmicas	309
6.7.1. Pérdidas internas	307
6.7.2. Pérdidas externas	309
6.8. Potencia interna y potencia efectiva	310
 <i>Capítulo 7. TURBINAS TÉRMICAS</i>	 313
Objetivos fundamentales del capítulo	313
7.1. Campos de aplicación de las turbinas axiales y de las turbinas centrípetas	314
7.2. Parámetros que definen la geometría de una corona de álabes y el flujo que la atraviesa	314
7.2.1. Flujo alrededor de un perfil aerodinámico en cascadas de álabes	317

7.2.2. Relación entre la geometría de la máquina y los triángulos de velocidades	319
7.3. Parámetros que permiten definir el diagrama de velocidades en un escalonamiento de turbina	321
7.4. Factores de los que dependen las pérdidas y el rendimiento en los escalonamientos de turbinas axiales	327
7.4.1. Importancia del diagrama de velocidades en el prediseño de la máquina	329
7.5. Valores óptimos de los parámetros que caracterizan la forma del diagrama de velocidades	333
7.5.1. Escalonamientos en los que se recupera la velocidad de salida ...	334
7.5.2. Escalonamientos en los que no se recupera la velocidad de salida	352
7.6. Comparación entre escalonamientos de acción y de reacción	340
7.7. Justificación de la necesidad de fraccionar el salto en una turbina axial	342
7.8. Consideraciones sobre el diseño de las turbinas centrípedas	346
7.9. Rendimiento de una turbina formada por múltiples escalonamientos	350
Capítulo 8. TURBOCOMPRESORES	355
Objetivos fundamentales del capítulo	355
8.1. Comparación entre compresores axiales, centrífugos y volumétricos	356
8.2. Introducción al diseño de los turbocompresores axiales	357
8.3. Parámetros de los que dependen las pérdidas en compresores axiales	360
8.4. Valores óptimos de los parámetros que caracterizan la forma del diagrama de velocidades	364
8.5. Razones por las que es necesario utilizar múltiples escalonamientos en compresores axiales	369
8.6. Relación entre el rendimiento de los escalonamientos que componen la máquina y el rendimiento del turbocompresor en su conjunto	376
8.7. Consideraciones sobre el diseño de turbomáquinas axiales	281
8.8. Consideraciones sobre el diseño de los turbocompresores centrífugos y su campo de aplicación	383
8.9. Curvas características de las turbomáquinas térmicas	386

ANEXOS

<i>Anexo 1. PROCESOS EN FLUIDOS COMPRESIBLES</i>	391
A1.1. Introducción	392
A1.2. Procesos termodinámicos de importancia en el estudio de las máquinas y los motores térmicos	393
A1.3. Principios y ecuaciones que rigen el comportamiento de los flujos compresibles	396
A1.3.1. Principio de conservación de la masa	397
A1.3.2. Primer Principio de la termodinámica	397
A1.3.3. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	399
A1.3.4. Segundo Principio de la termodinámica	400
A1.3.5. Exergía y balance energético	402
A1.3.6. Ecuaciones de Gibbs	404
A1.3.7. Ecuaciones calóricas	405
A1.3.8. Trabajo intercambiado con el entorno	407
A1.4. Propiedades termodinámicas de mezclas de gases ideales	412
A1.5. El Factor de Carnot. Rendimiento máximo de los motores térmicos	414
A1.6. Concepto de velocidad del sonido y número de mach	415
A1.6.1. Velocidad del sonido	417
A1.6.2. Concepto de número de Mach	420
A1.6.3. Concepto de onda de choque	421
A1.7. Expansión y compresión en conductos, toberas y difusores	422
A1.7.1. Efecto de la compresibilidad	422
A1.7.2. Forma del conducto en toberas y difusores	424
A1.7.3. Parámetros críticos de un gas	426
A1.7.4. Comportamiento del fluido en conductos sin fricción	428
A1.7.4.1. Expresión del gasto en toberas y difusores	428
A1.7.4.2. Expansión en conductos convergentes	429
A1.7.4.3. Comportamiento del fluido en un conducto convergente-divergente	431
A1.7.4.4. Evaluación de las pérdidas en toberas y difusores	438
A1.7.4.4.1. Comparación de los casos de expansión y compresión	438
A1.7.4.4.2. Coeficientes para evaluar la fricción en toberas y difusores	441

Anexo 2. CORRELACIONES DE PERDIDAS EN TURBOMÁQUINAS	
TÉRMICAS	443
A2.1. Turbinas axiales	443
A2.2. Turbocompresores axiales	448
<i>Bibliografía</i>	455
<i>Lista de símbolos</i>	457

CAPÍTULO 1
GENERALIDADES DE LOS MOTORES
DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

Objetivos fundamentales del capítulo

- Conocer qué es un motor de combustión interna alternativo, su constitución física, sus elementos constructivos fundamentales, así como los cinco procesos que tienen lugar en este tipo de motores: *admisión, compresión, combustión, expansión y escape*.
- Saber establecer la clasificación de los motores de combustión interna alternativos atendiendo a distintos criterios:
 - Según el proceso de combustión: distinguir entre motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión, conociendo básicamente las diferencias en el proceso de admisión y de combustión.
 - Según el modo de realizar el ciclo: conocer cómo se distribuyen los cinco procesos en los motores de cuatro y de dos tiempos. Saber representar el diagrama de distribución en ambos tipos de motores y conocer los ángulos que caracterizan la distribución, así como su función.
 - Según el tipo de refrigeración: conocer las principales zonas a refrigerar del motor y saber qué repercusión tiene la refrigeración sobre el rendimiento del motor. Distinguir y conocer las principales características de los motores refrigerados por agua y por aire.
 - Según la presión de admisión: distinguir entre los motores de aspiración natural y los sobrealimentados y conocer el objetivo de la sobrealimentación.
 - Según el número y disposición de cilindros: conocer los distintos tipos de motores según el número de cilindros y la disposición del bloque.
- Estudiar el diagrama p - V y p - α del motor y saber cómo quedan reflejados cada uno de los procesos del motor. Conocer qué es el diagrama

de indicador, cómo es en el caso de motores de cuatro tiempos y cómo en el de motores de dos tiempos. Saber qué es el ciclo de potencia y qué es el lazo de bombeo.

- Conocer los principales parámetros del motor, geométricos, operativos y de funcionamiento. Manejar los distintos parámetros de los motores. Saber calcular el par, la potencia, los rendimientos y el consumo del motor, el concepto de rendimiento volumétrico y conocer las curvas características.
- Conocer los ciclos de aire equivalentes de volumen constante y de presión limitada, que permiten estudiar desde un punto de vista termodinámico los motores.
 - Conocer las hipótesis en que se basan cada uno de los ciclos y saber a qué tipos de motores representan.
 - Conocer los diagramas p - V y T - s de los ciclos.
 - Saber dónde quedan reflejadas las distintas pérdidas.
 - Discutir desde un punto de vista termodinámico cómo afectan los parámetros de diseño del motor sobre su rendimiento.
- Describir brevemente otros ciclos termodinámicos y configuraciones de motores también alternativos usados minoritariamente.

1.1. COMPONENTES Y PROCESOS BÁSICOS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) son motores térmicos de desplazamiento positivo (o volumétricos), en los que el trabajo se obtiene mediante el desplazamiento lineal del émbolo de un mecanismo biela-manivela. Se denominan motores de combustión interna porque el estado térmico se genera en el propio fluido que evoluciona en el motor. La figura 1.1 representa el esquema básico de los MCIA y la tabla 1.1 describe brevemente los componentes que aparecen en la figura.

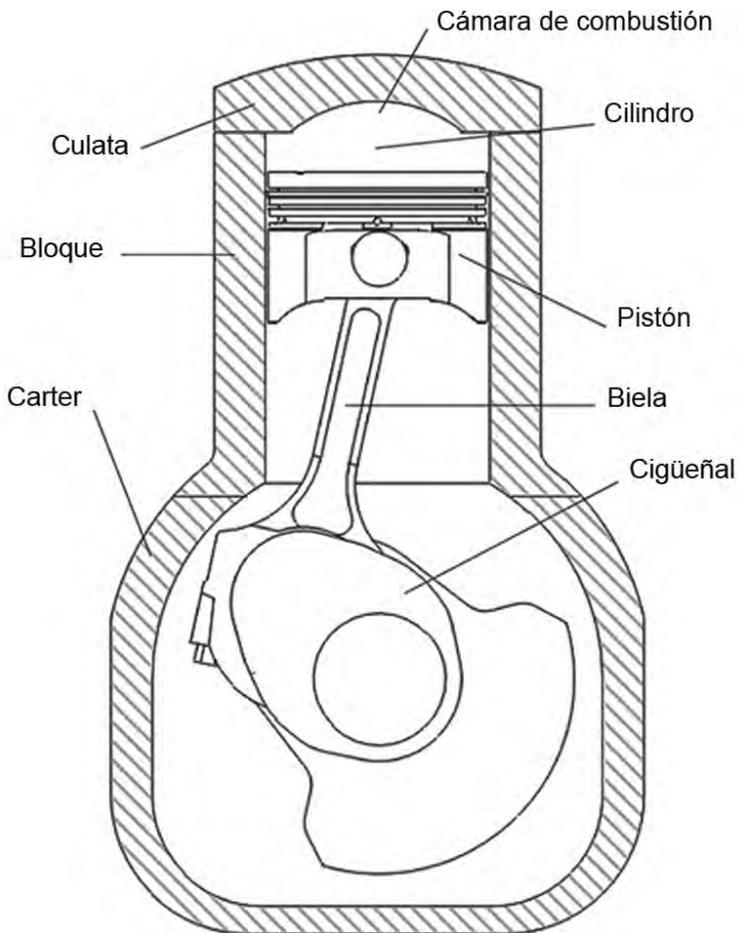


Figura 1.1. Componentes principales del MCIA.

Tabla 1.1. Elementos básicos del MCIA

<i>Pistón</i>	Elemento con movimiento rectilíneo alternativo. Es el émbolo del mecanismo biela-manivela y aumenta o disminuye el volumen del cilindro.
<i>Biela</i>	Elemento que, junto con la manivela, convierte el movimiento lineal del pistón en el rotativo del cigüeñal.
<i>Cigüeñal</i>	Elemento rotativo del motor. En él se integra la manivela del mecanismo.
<i>Cilindro</i>	Es el volumen que aloja el fluido de trabajo.
<i>Cámara de Combustión</i>	Es el volumen que queda por encima del pistón al finalizar la compresión y donde básicamente tiene lugar la combustión de la mezcla.
<i>Culata</i>	Elemento que constituye el cerramiento superior de los cilindros
<i>Bloque</i>	Elemento que contiene los cilindros.
<i>Cárter</i>	Cierre inferior del motor. Contiene el aceite para la lubricación.

El motor, durante su funcionamiento, realiza una serie de procesos que se repiten periódicamente y constituyen un ciclo termodinámico abierto (no puede ser cerrado al ser un motor de combustión interna). Los cinco procesos básicos que tienen lugar en un MCIA son:

Admisión: proceso en el que tiene lugar la entrada del fluido de trabajo (mezcla aire-combustible o aire, dependiendo del tipo de motor).

Compresión: proceso fundamental para incrementar el rendimiento termodinámico del motor, como se verá en el apartado 1.5.

Combustión: mecanismo de reacciones químicas globalmente muy exotérmicas mediante las cuales se genera el estado térmico del fluido de trabajo (alta presión y temperatura).

Expansión: proceso responsable de la producción de trabajo. En él, los gases producto de la combustión se expanden y desplazan al pistón, aumentando el volumen del cilindro. Dicha variación de volumen es la responsable de la producción de trabajo. La presión ejercida por los gases sobre el pistón se transforma, por equilibrio de fuerzas, en el par motor en el eje del cigüeñal.

Escape: proceso en el que se desalojan los gases producto de la combustión para que se pueda proceder a un nuevo proceso de admisión.

Los procesos de admisión y de escape constituyen lo que se denomina *renovación de la carga* y en ellos se intercambia masa con el exterior del motor. Los procesos de compresión, combustión y expansión constituyen el *ciclo termodinámico del motor* y son procesos confinados en los que no hay intercambio de materia con el exterior.

Por el propio funcionamiento del motor, los procesos no son continuos sino que tienen lugar consecutivamente. Por lo tanto, el flujo de masa es pulsante.

Junto con los procesos básicos mencionados anteriormente se tienen que dar otra serie de procesos secundarios. Los más importantes son: la *formación de la mezcla* de aire-combustible, la *ignición* o *encendido*, la *lubricación*, la *refrigeración*, así como otros procesos mecánicos del motor como, por ejemplo, el accionamiento de las válvulas.

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MCIA

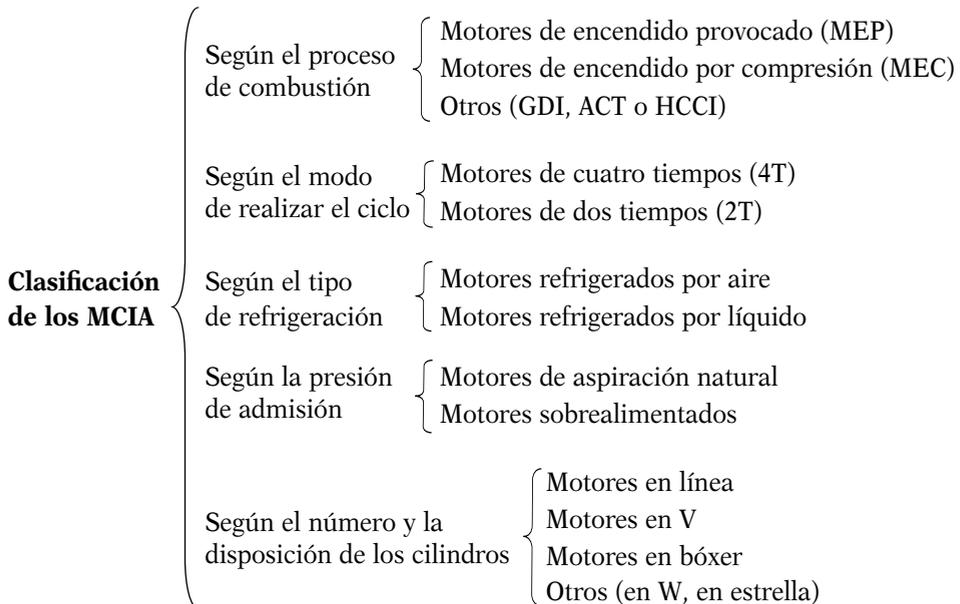


Figura 1.2. Clasificaciones de los MCIA.

1.2.1. Según el proceso de combustión

a) Motores de encendido provocado, MEP:

También reciben el nombre de motores de *encendido por chispa* o *motores de ciclo Otto*. Se debe evitar la denominación de motor de explosión, menos correcta que las anteriores ya que en el seno del motor tiene lugar una combustión inducida por un agente, no una explosión (que no implica necesariamente una combustión).

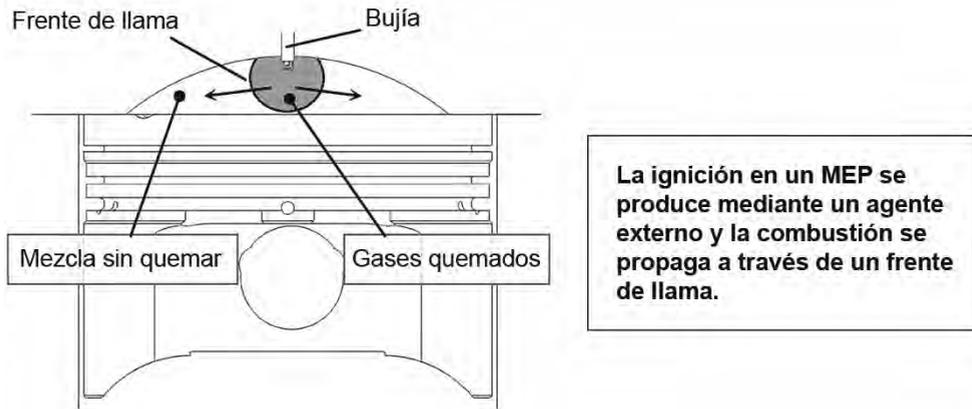


Figura 1.3. Esquema de combustión en los MEP.

Son motores en los que al final del proceso de compresión se dispone de una mezcla de aire-combustible homogénea. La combustión se produce mediante la deflagración¹ de la mezcla, que se propaga mediante un frente de llama y la ignición o encendido se consigue mediante un agente externo —como puede ser el salto de una chispa—.

b) Motores de encendido por compresión, MEC:

Usualmente reciben también el nombre de *motores Diesel* o *motores de ciclo Diesel*.

En este tipo de motores, el fluido que se comprime es aire y el combustible se inyecta en la cámara una vez finalizado el proceso de compresión.

¹ La combustión por deflagración en los MEP se explicará en el capítulo 2.