



Lectura de Apoyo: “Ciclos Termodinámicos en Sistemas Automotrices”

Esta lectura de apoyo complementa las sesiones presenciales del tema de **Ciclos Termodinámicos** correspondiente a la **Unidad IV** de la asignatura E-TEA-3. Su objetivo es proporcionar bases teóricas sólidas para comprender el funcionamiento de **motores de combustión interna** y su **análisis termodinámico**.

INTRODUCCIÓN

Los **ciclos termodinámicos** constituyen la base fundamental para comprender el funcionamiento de los **motores de combustión interna** utilizados en la industria automotriz. Estos ciclos describen las transformaciones energéticas que ocurren en el interior de los motores, permitiendo convertir la **energía química** del combustible en **trabajo mecánico útil**.

En el contexto de la **ingeniería automotriz**, el dominio de estos conceptos es esencial para:

- Optimizar el **rendimiento** de los motores
- Reducir el **consumo de combustible**
- Minimizar las **emisiones contaminantes**
- Mejorar la **durabilidad** de los componentes

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

¿Qué es un Ciclo Termodinámico?

Un **ciclo termodinámico** es una secuencia de **procesos** que experimenta un fluido de trabajo (generalmente aire o mezcla aire-combustible) y que lo lleva desde un estado inicial, a través de varios estados intermedios, hasta regresar exactamente al estado inicial.

Componentes esenciales de un ciclo:

- **Fluido de trabajo:** Aire o mezcla aire-combustible que experimenta las transformaciones
- **Fuente de calor:** Proceso de combustión que aporta energía térmica
- **Sumidero de calor:** Ambiente que recibe la energía térmica no convertida en trabajo
- **Dispositivo de trabajo:** Pistón o turbina que convierte la energía térmica en trabajo mecánico

Parámetros Fundamentales

Eficiencia Térmica: La eficiencia térmica (η) de un ciclo termodinámico se define como la fracción del calor suministrado que se convierte en trabajo útil:

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}} = \frac{Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}}$$

Donde:



- W_{neto} = trabajo neto producido por el ciclo
- Q_{entrada} = calor suministrado al sistema
- Q_{salida} = calor rechazado por el sistema

Relación de Compresión: En motores de pistón, la relación de compresión (r) es un parámetro crucial definido como:

$$r = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$$

Donde V_{max} es el volumen cuando el pistón está en el punto muerto inferior y V_{min} es el volumen cuando el pistón está en el punto muerto superior.

CICLO DE CARNOT: EL MOTOR TÉRMICO IDEAL

Descripción del Ciclo

El **ciclo de Carnot**, propuesto por Sadi Carnot en 1824, representa el **motor térmico más eficiente** teóricamente posible que opera entre dos reservorios térmicos. Aunque es imposible de implementar prácticamente, establece el **límite superior de eficiencia** para cualquier motor térmico.

Los cuatro procesos del ciclo de Carnot:

1. Proceso 1-2: Expansión isotérmica

- Temperatura constante (T_{alta})
- El sistema absorbe calor Q_{entrada} de la fuente caliente
- Se produce trabajo durante la expansión

2. Proceso 2-3: Expansión adiabática

- No hay intercambio de calor ($Q = 0$)
- La temperatura disminuye de T_{alta} a T_{baja}
- Continúa la expansión y producción de trabajo

3. Proceso 3-4: Compresión isotérmica

- Temperatura constante (T_{baja})
- El sistema rechaza calor Q_{salida} hacia el sumidero frío
- Se requiere trabajo para la compresión

4. Proceso 4-1: Compresión adiabática

- No hay intercambio de calor ($Q = 0$)
- La temperatura aumenta de T_{baja} a T_{alta}
- Se completa el ciclo



Eficiencia del Ciclo de Carnot

La eficiencia del ciclo de Carnot depende únicamente de las temperaturas de los reservorios térmicos:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}}$$

Ejemplo numérico: Para un motor que opera con:

- $T_{\text{caliente}} = 800^{\circ}\text{C} = 1073\text{K}$ (temperatura de combustión)
- $T_{\text{fría}} = 25^{\circ}\text{C} = 298\text{K}$ (temperatura ambiente)

La eficiencia teórica sería:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{298}{1073} = 0,722 = 72,2\%$$

Implicaciones para motores automotrices:

- Ningún motor real puede superar esta eficiencia teórica
- Los motores reales alcanzan solo 25-35 % de eficiencia
- Las pérdidas se deben a fricción, transferencia de calor, combustión incompleta, etc.

CICLO OTTO: MOTORES DE GASOLINA

Descripción del Ciclo

El **ciclo Otto**, desarrollado por Nikolaus Otto en 1876, es la base teórica de los **motores de gasolina** modernos. Este ciclo también se conoce como **ciclo de encendido por chispa** y opera con cuatro procesos principales.

Los cuatro procesos del ciclo Otto:

1. Proceso 1-2: Compresión adiabática

- Las válvulas están cerradas
- La mezcla aire-combustible se comprime
- La temperatura y presión aumentan significativamente
- Relación de compresión típica: 8:1 a 12:1

2. Proceso 2-3: Combustión a volumen constante

- La bujía produce una chispa que inicia la combustión
- Liberación explosiva de energía química
- La presión aumenta dramáticamente mientras el volumen permanece constante
- Este es el proceso que diferencia al Otto del Carnot

3. Proceso 3-4: Expansión adiabática (carrera de trabajo)

- Los gases calientes empujan el pistón hacia abajo
- **Única carrera que produce trabajo útil**
- La temperatura y presión disminuyen durante la expansión

4. Proceso 4-1: Escape a volumen constante

- La válvula de escape se abre
- Los gases quemados son expulsados al ambiente
- La presión regresa rápidamente a las condiciones iniciales



Eficiencia del Ciclo Otto

La eficiencia teórica del ciclo Otto depende únicamente de la relación de compresión:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Donde:

- r = relación de compresión
- γ = relación de calores específicos (≈ 1.4 para aire)

Ejemplo de cálculo: Para un motor con relación de compresión $r = 10 : 1$:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{10^{0,4}} = 1 - 0,398 = 0,602 = 60,2 \%$$

Factores que afectan la eficiencia real:

- **Detonación (knock):** Limita la relación de compresión máxima
- **Pérdidas por fricción:** Entre pistones, anillos y cilindros
- **Transferencia de calor:** Hacia las paredes del cilindro
- **Combustión incompleta:** No todo el combustible se quema eficientemente
- **Tiempo finito de combustión:** La combustión real no es instantánea

Aplicaciones Automotrices del Ciclo Otto

Ventajas:

- Alta potencia específica (potencia por unidad de peso)
- Funcionamiento suave y silencioso
- Arranque fácil en frío
- Menores emisiones de NOx comparado con diesel
- Tecnología madura y bien establecida

Aplicaciones típicas:

- Automóviles de pasajeros
- Vehículos deportivos
- Motocicletas
- Equipos de jardinería y herramientas menores



CICLO DIESEL: MOTORES DE COMPRESIÓN

Descripción del Ciclo

El **ciclo Diesel**, desarrollado por Rudolf Diesel en 1892, es la base de los **motores diesel** modernos. La principal diferencia con el ciclo Otto es que la combustión ocurre a **presión constante** en lugar de volumen constante.

Los cuatro procesos del ciclo Diesel:

1. Proceso 1-2: Compresión adiabática

- **Solo aire** se comprime (sin combustible)
- Relación de compresión muy alta: 14:1 a 22:1
- La temperatura final supera los 500°C, suficiente para autoencendido
- Mayor compresión que en Otto debido a la ausencia de combustible

2. Proceso 2-3: Combustión a presión constante

- El combustible se inyecta durante la expansión inicial
- **Combustión controlada**, no explosiva como en Otto
- La temperatura aumenta mientras el volumen aumenta
- La presión se mantiene aproximadamente constante

3. Proceso 3-4: Expansión adiabática

- Continuación de la expansión después de completarse la combustión
- Extracción del trabajo útil
- Disminución de presión y temperatura

4. Proceso 4-1: Escape a volumen constante

- Similar al ciclo Otto
- Liberación rápida de gases quemados

Eficiencia del Ciclo Diesel

La eficiencia del ciclo Diesel depende tanto de la relación de compresión como de la relación de corte:

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \times \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)}$$

Donde:

- r = relación de compresión
- r_c = relación de corte (V_3/V_2 , relacionada con la duración de la combustión)
- γ = relación de calores específicos

Ventajas del ciclo Diesel:

- **Mayor eficiencia térmica:** 40-45 % vs 25-35 % del Otto
- **Mayor densidad energética:** El diesel contiene más energía por litro
- **Mayor durabilidad:** Construcción más robusta
- **Mejor economía de combustible:** Especialmente en aplicaciones de carga



Aplicaciones Automotrices del Ciclo Diesel

Características principales:

- Mayor torque a bajas revoluciones
- Mejor para aplicaciones de trabajo pesado
- Mayor peso del motor debido a la construcción robusta
- Emisiones más altas de NOx y partículas

Aplicaciones típicas:

- Camiones de carga
- Autobuses de transporte público
- Vehículos comerciales
- Maquinaria agrícola e industrial
- Generación de energía estacionaria

ANÁLISIS COMPARATIVO

Comparación de Eficiencias Teóricas

La siguiente tabla compara las características principales de los tres ciclos estudiados:

Característica	Carnot	Otto	Diesel
Eficiencia teórica	72 % (ejemplo)	60 % ($r=10$)	65 % ($r=18$)
Eficiencia real	Imposible de lograr	25-35 %	35-45 %
Tipo de combustión	Isotérmica ideal	Volumen constante	Presión constante
Aplicabilidad	Solo teórica	Motores de gasolina	Motores diesel
Relación de compresión	Variable	8:1 - 12:1	14:1 - 22:1

Criterios de Selección

Ciclo Otto recomendado para:

- Conducción urbana con arranques y paradas frecuentes
- Aplicaciones que requieren alta velocidad de rotación
- Vehículos ligeros de pasajeros
- Situaciones donde el peso del motor es crítico

Ciclo Diesel recomendado para:

- Transporte de carga pesada
- Recorridos de larga distancia
- Aplicaciones que requieren alto torque a bajas RPM
- Situaciones donde la economía de combustible es prioritaria



TENDENCIAS FUTURAS

Innovaciones Tecnológicas

La industria automotriz está implementando diversas tecnologías para mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna:

Optimizaciones del ciclo Otto:

- **Inyección directa:** Mejor control de la mezcla aire-combustible
- **Turbocompresión:** Aumento de la densidad del aire de admisión
- **Relación de compresión variable:** Optimización según condiciones de operación
- **Ciclos Atkinson y Miller:** Variaciones que priorizan la eficiencia sobre la potencia

Mejoras en motores Diesel:

- **Common Rail:** Sistema de inyección de alta presión
- **Turbocompresión con intercooler:** Mejor llenado de cilindros
- **Sistemas de postratamiento:** Reducción de emisiones NOx y partículas
- **Diesel limpio:** Combustibles con menor contenido de azufre

Hibridización y Electrificación

La transición hacia la movilidad sostenible está generando:

- **Motores híbridos:** Combinación de ciclos térmicos con propulsión eléctrica
- **Recuperación de energía:** Aprovechamiento del calor de escape
- **Optimización integral:** Gestión inteligente de sistemas de propulsión

EJERCICIOS DE APLICACIÓN

Ejercicio 1: Cálculo de Eficiencia Otto

Un motor de gasolina tiene una relación de compresión de 9:1. Calcular:

1. La eficiencia teórica del ciclo Otto
2. El trabajo neto si el calor de entrada es 2000 kJ
3. La explicación de por qué la eficiencia real es menor

Solución:

1. $\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{0,4}} = 1 - 0,426 = 0,574 = 57,4\%$
2. $W_{\text{neto}} = \eta \times Q_{\text{entrada}} = 0,574 \times 2000 = 1148 \text{ kJ}$
3. La eficiencia real es menor debido a pérdidas por fricción, transferencia de calor, combustión incompleta y limitaciones de tiempo de los procesos reales.



Ejercicio 2: Comparación Otto vs Diesel

Compare dos motores de la misma potencia nominal:

- Motor Otto: $r = 10:1$, consumo 8 L/100km
- Motor Diesel: $r = 16:1$, consumo 6 L/100km

Para un recorrido anual de 20,000 km, determine cuál es más económico considerando precios de combustible de \$20/L para gasolina y \$18/L para diesel.

CONCLUSIONES

El estudio de los **ciclos termodinámicos** es fundamental para comprender el funcionamiento de los motores automotrices y optimizar su desempeño. Los conceptos principales que debe dominar el ingeniero en sistemas automotrices son:

1. El **ciclo de Carnot** establece el límite teórico de eficiencia para cualquier motor térmico
2. El **ciclo Otto** es la base de los motores de gasolina, con combustión a volumen constante
3. El **ciclo Diesel** opera con combustión a presión constante y ofrece mayor eficiencia
4. La **selección del tipo de motor** depende de la aplicación específica y los requerimientos de operación
5. Las **innovaciones tecnológicas** continúan mejorando la eficiencia y reduciendo las emisiones

El dominio de estos conceptos permite tomar decisiones informadas en el diseño, selección y optimización de sistemas de propulsión automotriz, contribuyendo a una movilidad más eficiente y sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Termodinámica*. 8va Edición. McGraw-Hill. Capítulos 9-11.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. 8va Edición. Reverté. Secciones sobre ciclos de potencia.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2da Edición. McGraw-Hill.
- Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (2016). *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. 3ra Edición. Wiley.

RECURSOS DIGITALES COMPLEMENTARIOS

- Simuladores interactivos de ciclos termodinámicos: PhET Simulations
- Software de cálculo termodinámico: CoolProp, REFPROP
- Videos educativos de motores en funcionamiento: Canal YouTube *EngineeringExplained*
- Documentación técnica de fabricantes automotrices: Manuales de servicio