

## Conferencia No 3

# FORMACION DE CONTAMINANTES

CONTENIDO

HC

CONTAMINANTES

PARTICULAS

NO

BIBLIOGRAFIA

CO

# Descripción

El siguiente material presenta las características de formación de los principales contaminantes que se forman durante el proceso de combustión en motores alternativos. Una descripción de los factores que dan origen a la formación de: CO, HC, NO<sub>x</sub> y partículas en la cámara de combustión de MECH y MEC es hecha con la finalidad de entender y diferenciar el efecto que tienen factores como: riqueza de la mezcla, presencia de gases residuales, absorción por película de aceite y depósitos y transferencia de calor sobre la presencia de ciertos compuestos contaminantes. Dentro de los aspectos a estudiar se explican los cambios o ajustes que pueden hacerse tanto en el sistema de alimentación del motor como el de encendido para evitar la formación excesiva de contaminantes sin perjudicar el desarrollo de potencia del motor. A lo largo del trabajo se hace comparación entre los resultados de análisis de composición de GE obtenidos con estudios experimentales y teóricos basados en la teoría del EQ.

# Objetivos

- Complementar el conocimiento teórico impartido en clase.
- Introducir al estudiante en los aspectos químicos de la combustión en MCIA.
- Introducción a cálculos teóricos sobre composición de productos de combustión.
- Mostrar la importancia de la combustión sobre el desarrollo de potencia del motor.
- Realizar análisis de las especies químicas presentes en los GE.

# Contenido

## 1. Contaminantes en MCIA

- Tipos
- Condiciones de trabajo que aseguran su formación
  - a. Altas temperaturas
  - b. Riqueza de la mezcla
  - c. Apagado de la llama
  - d. Combustión incompleta

## 2. Características de formación de contaminantes en MCIA

- Aspectos importantes en MEC
  - a. Mecanismo de Zeldovich
  - b. Cinética química de la formación
  - c. Constante de la reacción
- Formación de NO en MECH
- Factores que afectan y/o controlan la formación de contaminantes en MCIA
  - a. Variación de la riqueza de la mezcla
  - b. Empleo de técnicas de recirculación
  - c. Modificación del avance de la chispa

# Contenido

- Formación de CO
  - a. Características de formación durante la combustión
- Mecanismo de formación de los HC
  - a. Composición del combustible
  - b. Causas que determinan su formación
  - c. Apagado de la llama
  - d. Absorción y liberación en la película de aceite
  - e. Combustión incompleta
  - f. Formación de depósitos
  - g. Esquema de transporte de los HC en MEC y MECH
- Emisión de partículas en MCIA
  - a. Proceso de aglomeración

# Contaminantes

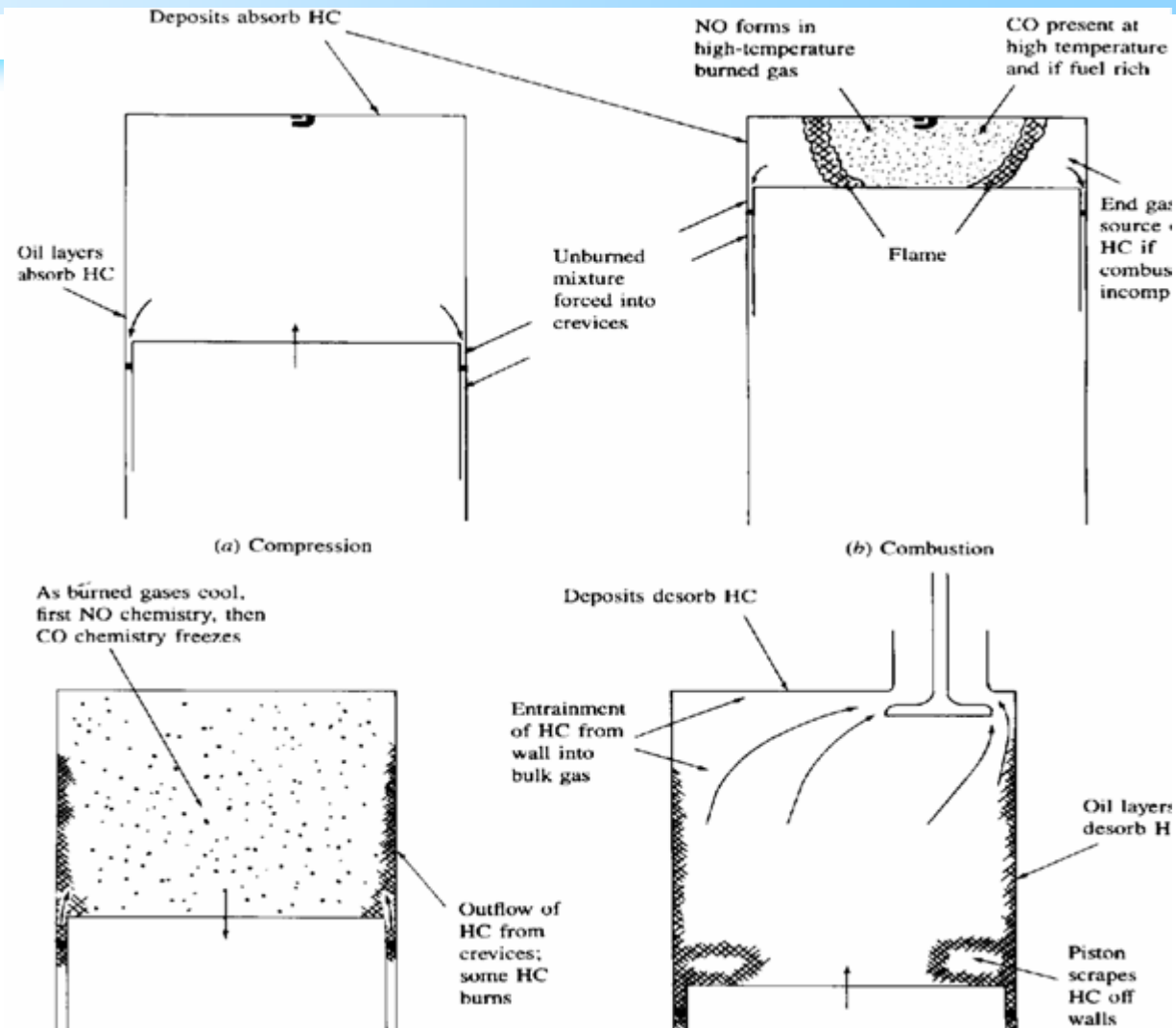
- Fuente: MECH  $\longrightarrow$  NO, NO<sub>2</sub>, CO, HC  
MEC  $\longrightarrow$  NO, NO<sub>2</sub>, CO, HC, Partículas, Olor
- El empleo de  $\phi > 1$  en MECH origina mayor producción de CO, mientras que las cantidades de NO y NO<sub>2</sub> son muy similares en ambos motores.
- La composición y cantidad de estos compuestos se determina teórica y experimentalmente, las diferencias se deben a las características reales del proceso de combustión.
- Se requiere de teorías de EQ y cinética del proceso para evaluar en forma más exacta la cantidad de contaminantes formados.
- El conocimiento del proceso de combustión permite su mejor interpretación: Ej.: el CO y partículas dependen del proceso de combustión, mientras que los NO<sub>x</sub> dependen de la afinidad N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> a las altas T de la combustión.

# Origen de los contaminantes en MECH

- NO:
  - Se forma cerca de la llama donde T propicia la afinidad química:  $N_2 - O_2$ .
  - $A > T > NO$ , pero si T disminuye el NO tiende a desaparecer hasta alcanzar una concentración de estabilidad que la teoría del EQ no puede predecir.
- CO:
  - Depende de:  $\phi > 1$  y altas T que disociación el  $CO_2$ , pero al disminuir T sus niveles sufren un “congelamiento” silmilar al del NO.
- HC:
  - La alta p durante la compresión y combustión introduce mezcla en ranuras para luego cuando p disminuya durante la expansión y escape salga y no se queme.
  - Apagado de la llama en las paredes, ayudado por absorción de los depósitos.
  - Absorción por la película de aceite escapando al proceso de combustión primario.
  - Combustión incompleta debido a extinción de la llama en zonas donde la velocidad de quemado es muy lenta.

# Mecanismo de formación de contaminantes en MECH

- Contaminantes:
  - NO, CO, HC.
- Causantes:
  - Altas T.
  - $\phi > 1.0$
  - Apagado de la llama.
  - Alta p.
  - Absorción / depósitos.
  - Absorción / aceite.



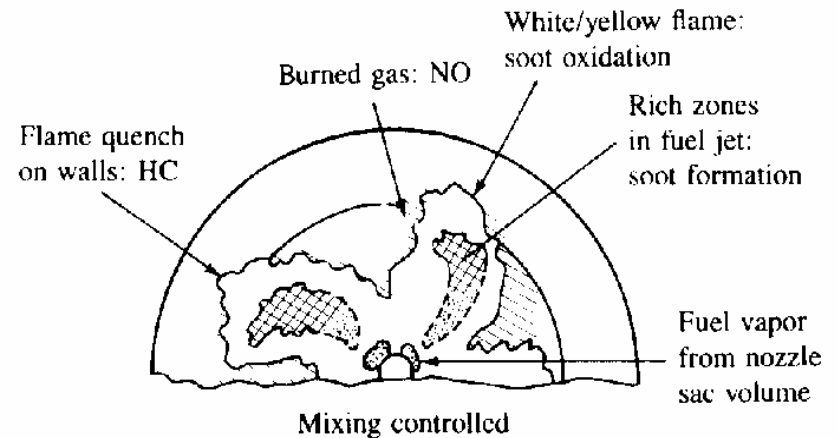
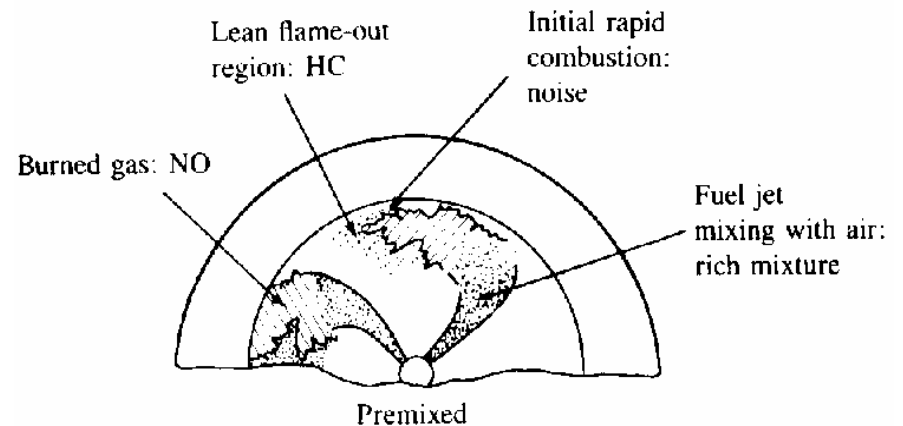


## Origen de los contaminantes en MEC

- Existe una fuerte dependencia entre la formación de contaminantes y la distribución del combustible.
- El NO se forma cerca de la llama y la no uniformidad de T y F/A genera mayores cantidades.
- La carbonilla se forma cuando  $\phi \gg 1$  y al quemarse origina una llama amarilla.
- El CO aparece en menor proporción que en MECH.
- Los mecanismos de origen de los HC son:
  - Apagado de la llama en las paredes y en aquellas zonas donde  $\phi \ll 1$ .
  - En la punta del inyector donde se tiene combustible que se vaporiza con mas lentitud.
- El ruido se presenta debido a la acumulación de combustible en la fase inicial de la combustión.

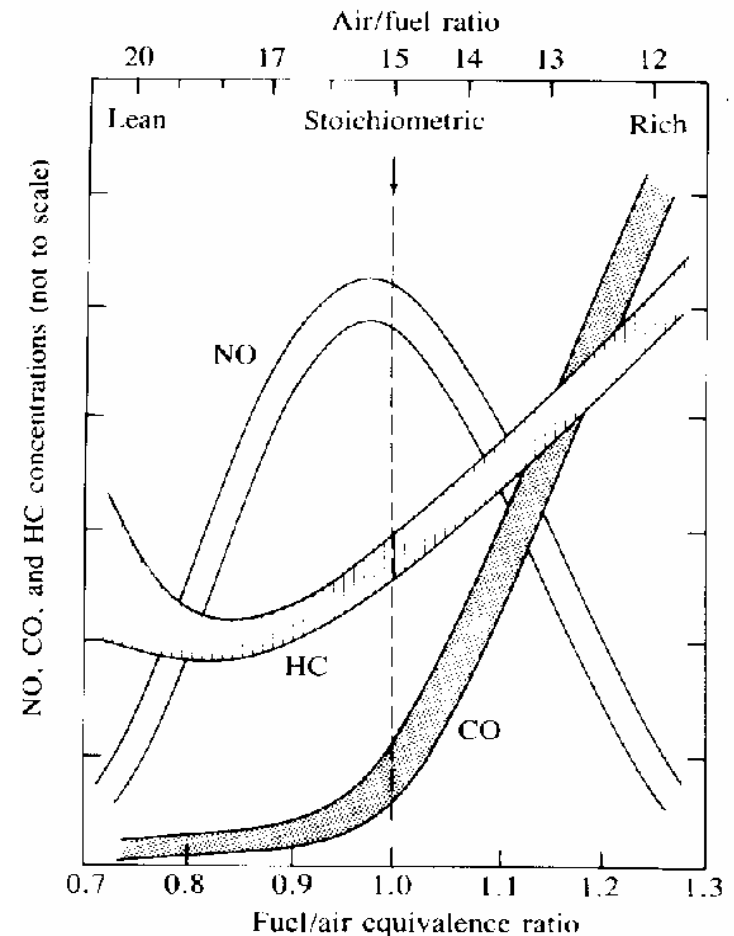
# Mecanismo de formación de contaminantes en MEC

- Contaminantes:
  - NO, CO, HC, Partículas.
- Causantes:
  - Distribución del combustible.
  - Alta T.
  - $\phi$  locales  $\gg 1.0$
  - Apagado de la llama.
  - Alta p.
  - Absorción / depósitos.
  - Absorción / película aceite.



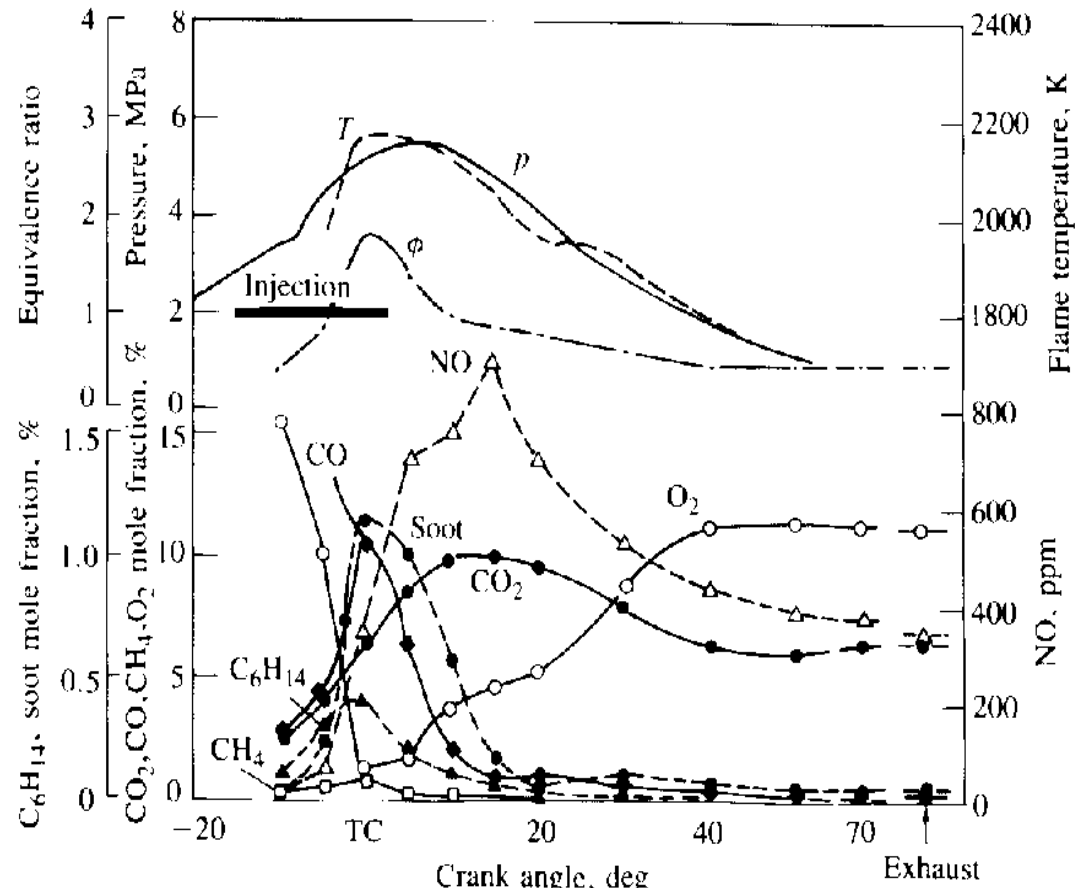
## Formación de: HC, NO y CO vs $\phi$

- Para conseguir  $Pot_{m\acute{a}x}$  se requieren  $\phi \cong 1$ , lo cual aumenta la formación de contaminantes.
- El MCIA debe trabajar con valores de  $\phi$  que contribuyan a disminuir la expulsión de contaminantes aunque exista pérdida de potencia.
- Alternativa: control interno y externos.



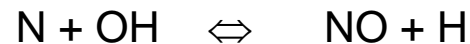
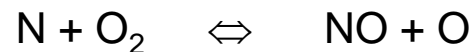
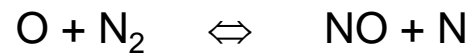
# Productos de combustión en MEC

- Para MEC con cc de bajo movimiento de aire.
- La máxima cantidad se forma cuando en la cc se alcanzan altas T.
- Debido a la dependencia entre formación y desaparición de especies y disminución de la T existe un control natural en el proceso, el caso real muestra que al final la velocidad de reacción domina el proceso.



## Teoría sobre la formación del NO (Zeldovich)

- En MCI A la fuente de los NO son el N<sub>2</sub> atmosférico y el del combustible.
- Un método teórico usado para explicar la formación del NO es el mecanismo extendido de Zeldovich, que propone las siguientes reacciones químicas:



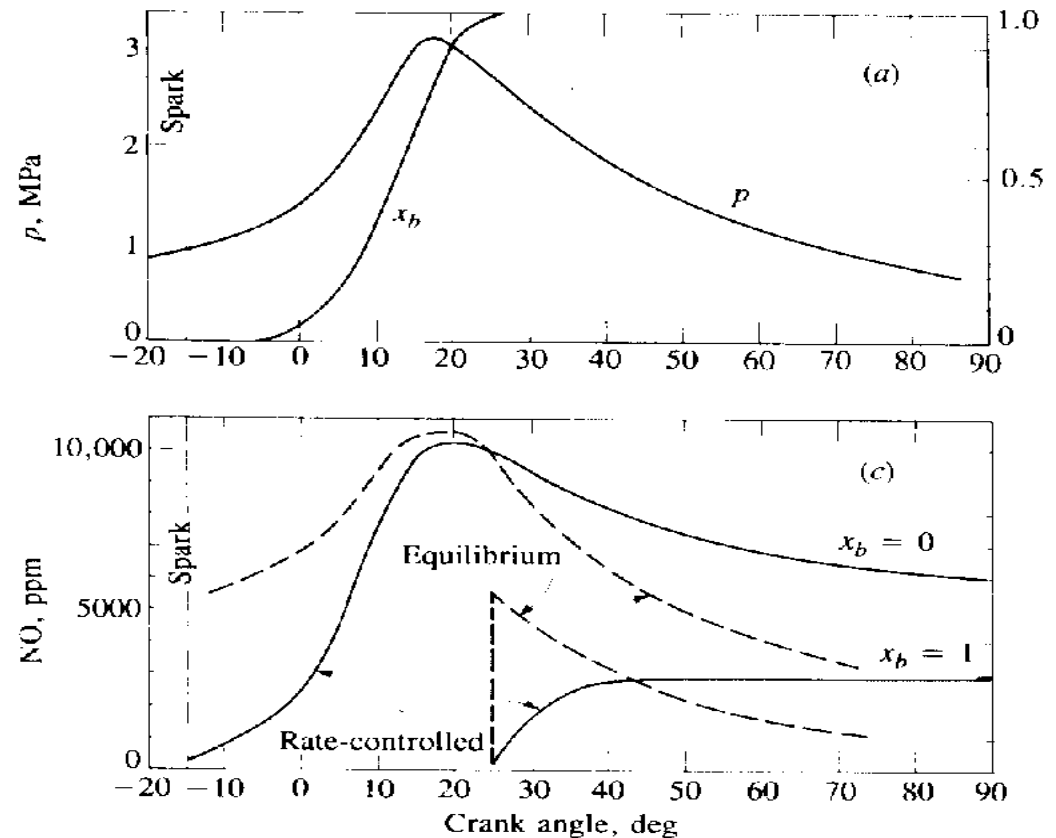
- El NO se forma durante la combustión, al iniciarse el proceso el aumento de T comprime los gases propiciando la formación del NO.
- Las altas T y la presencia de O<sub>2</sub> favorecen la formación de NO, la mayor cantidad de NO que se forma cuando  $\phi$  es ligeramente  $< 1.0$ .

## Características de formación del NO en MECH

- La formación de NO se considera el resultado de dos efectos: el mecanismo de Zeldovich y la distribución de T y p.
- La mezcla que se quema inicialmente es comprimida a altas T contribuyendo a la formación del NO.
- Durante la expansión el NO disminuye con T pero su velocidad de desaparición alcanza cierta estabilidad.
- El EQ predice la desaparición completa del NO.
- Experimentalmente se ha encontrado que los siguientes parámetros afectan la formación de los NO:  $\phi$ , gases residuales y avance de la chispa.

## Modelo de formación del NO en MECH

- Modelo de fracción de masa quemada y desarrollo de  $p$  en el cilindro.
- El modelo muestra la variación de  $T$  de los productos y de la mezcla fresca en función de la fracción  $X_b$ .
- El modelo EQ predice la desaparición del NO con la caída de  $T$ . El caso real muestra NO cuando la válvula de escape se abre.

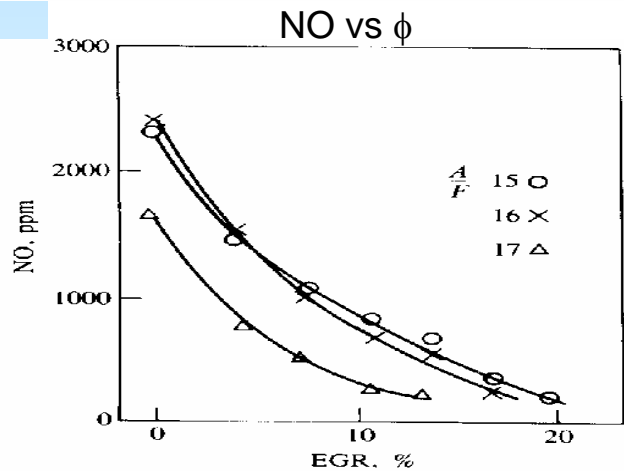
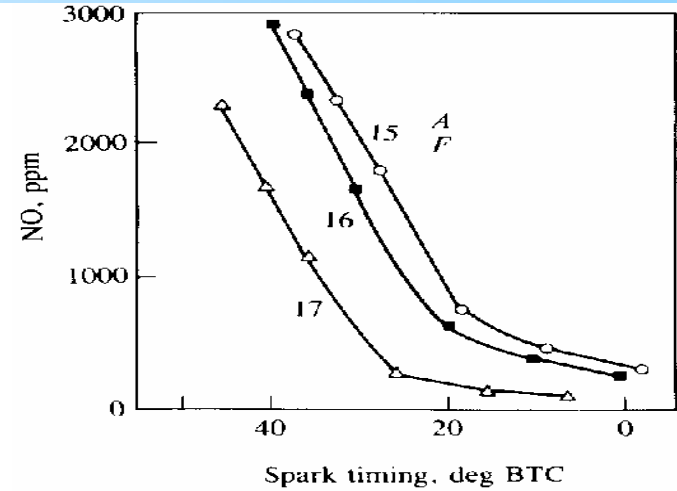
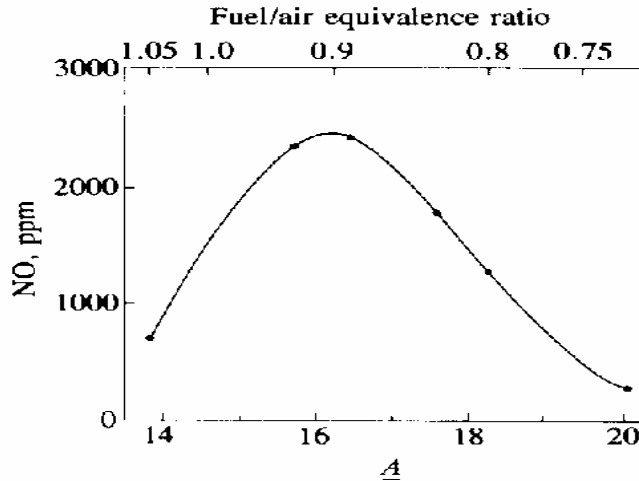


# Parámetros que controlan la formación del NO en MECH

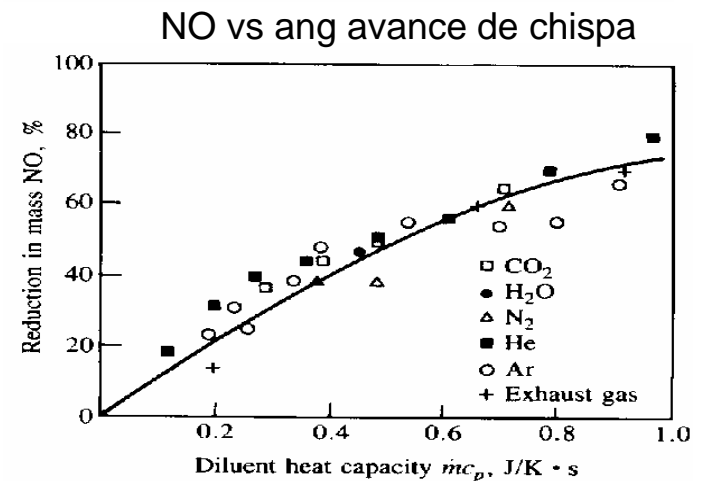
- $\phi$ :
  - Cuando  $\phi \cong 1.1$  T es máxima pero falta  $O_2$ .
  - Cuando  $\phi \cong 0.9$  T no es máxima pero sobra  $O_2$ .
  - Cuando  $\phi \cong$  pobre NO se estabiliza.
  - Cuando  $\phi \cong$  rica NO tiene mayor descomposición.
- EGR:
  - Controlan la formación de los  $NO_x$  disminuyendo la T.
  - Diluyen la mezcla fresca, empeoran la combustión.
  - Disminuyen la T de la llama, absorben gran cantidad de calor.
- AAE:
  - $A > \text{avance} > p$  y  $T, > NO$ .
  - Ajustar el AAE para mínima formación de NO evitando deterioro del par motor.



# Factores que afectan la formación del NO



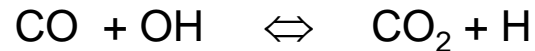
NO vs recirculación de GE



NO vs calor específico de GE

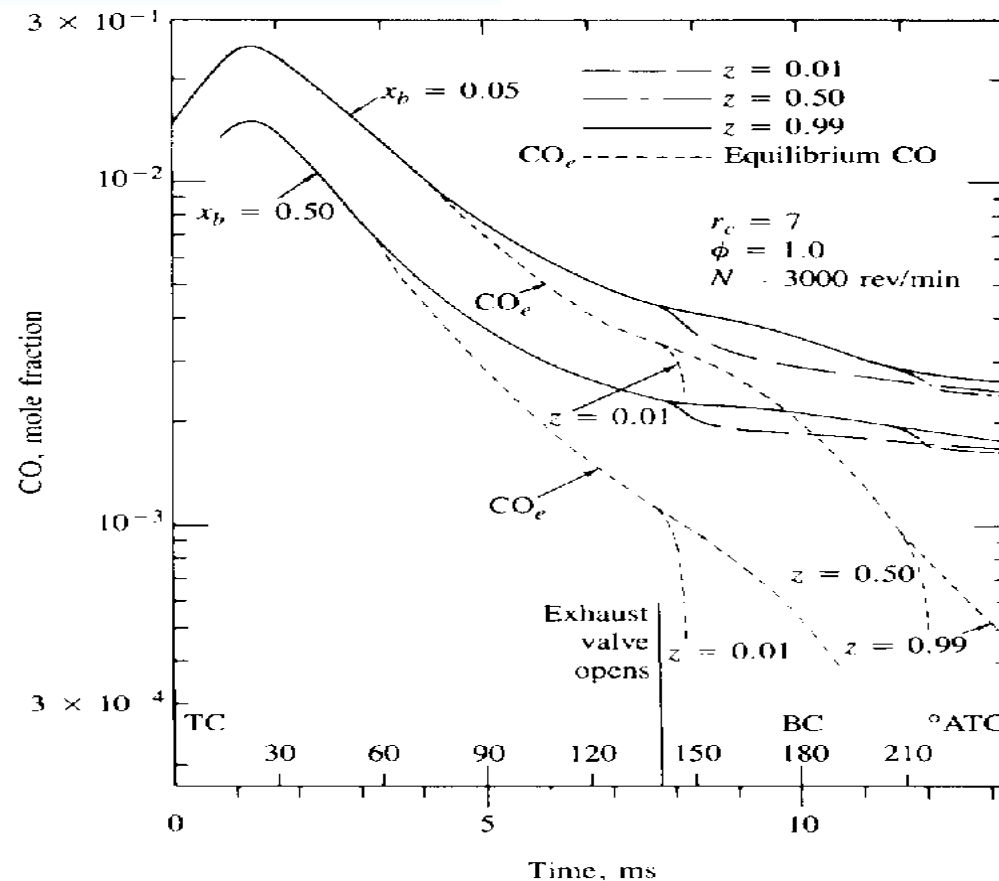
## Características de formación del CO

- En MCIA se controla principalmente modificando  $\phi$ . En mezclas ricas su concentración varía proporcionalmente con la riqueza.
- Su control es mas importante en MECH donde  $\phi$  toma valores  $> 1$ .
- Al final de la expansión siempre hay  $> \text{CO}$  que el previsto EQ.
- La reacción principal cuando se trabaja con mezclas hidrocarburo - aire es:



- El control del CO se logra mejorando la distribución de mezcla por cilindro, manteniendo una relación F/A constante por cilindro.
- Por otro lado se debe asegurar un suministro de combustible adecuado durante aceleración y desaceleración.

# Concentración de CO en el cilindro de MCIA



Variación de CO durante la combustión vs XR.

## Composición de la gasolina y presencia de HC

Gasolina	Craqueo térmico	Craqueo catalítico
Aromáticos (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , ...)	25	25
Parafínicos (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , ...)	35	25
Nafténicos (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> , ..)	15	10
Olefinas (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , ...)	25	40

### Composición de los HC en los GE de MECH

	Aromáticos	Parafínicos	Acetileno	Olefinas
Sin catalizador	32	33	8	27
Con catalizador	26	57	2	15

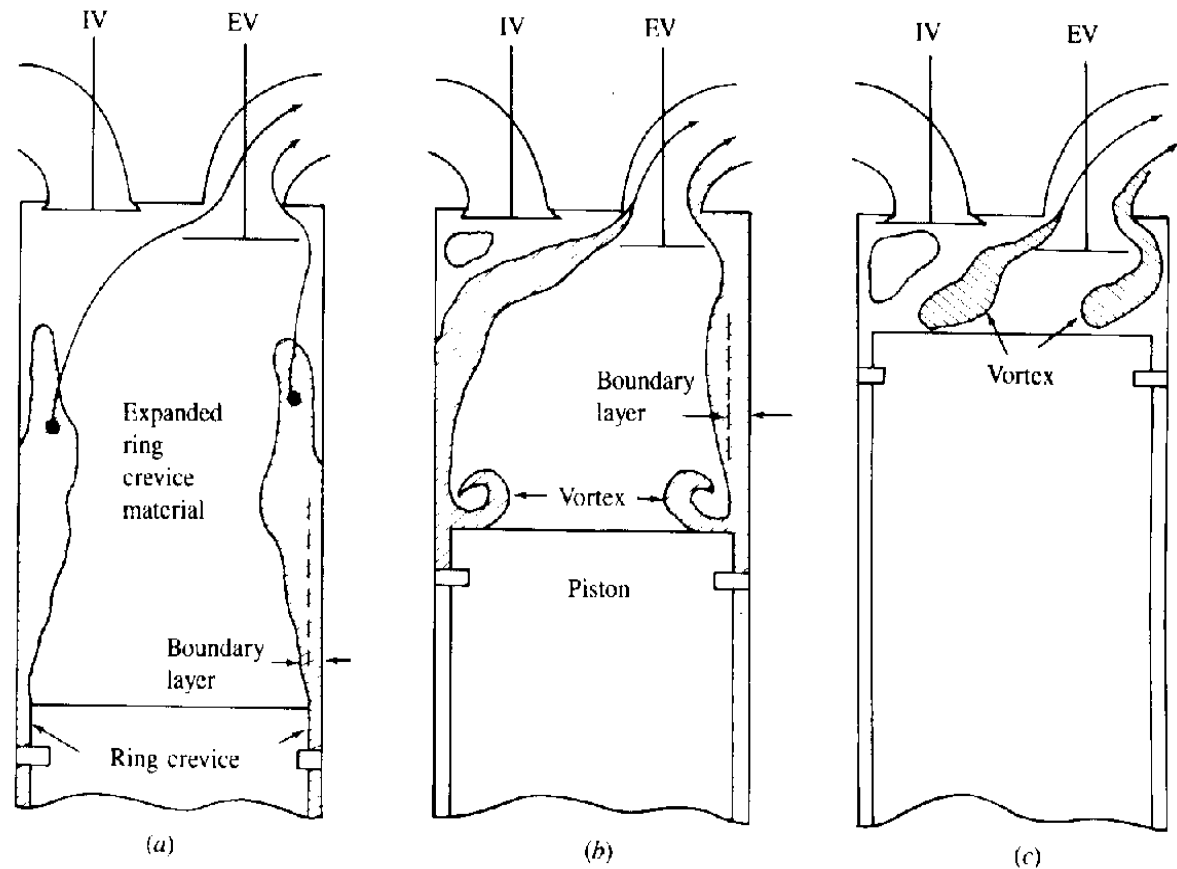
- Otros compuestos en los GE pueden ser producto de reacciones químicas durante la combustión.

# Emisiones de HC en MECH

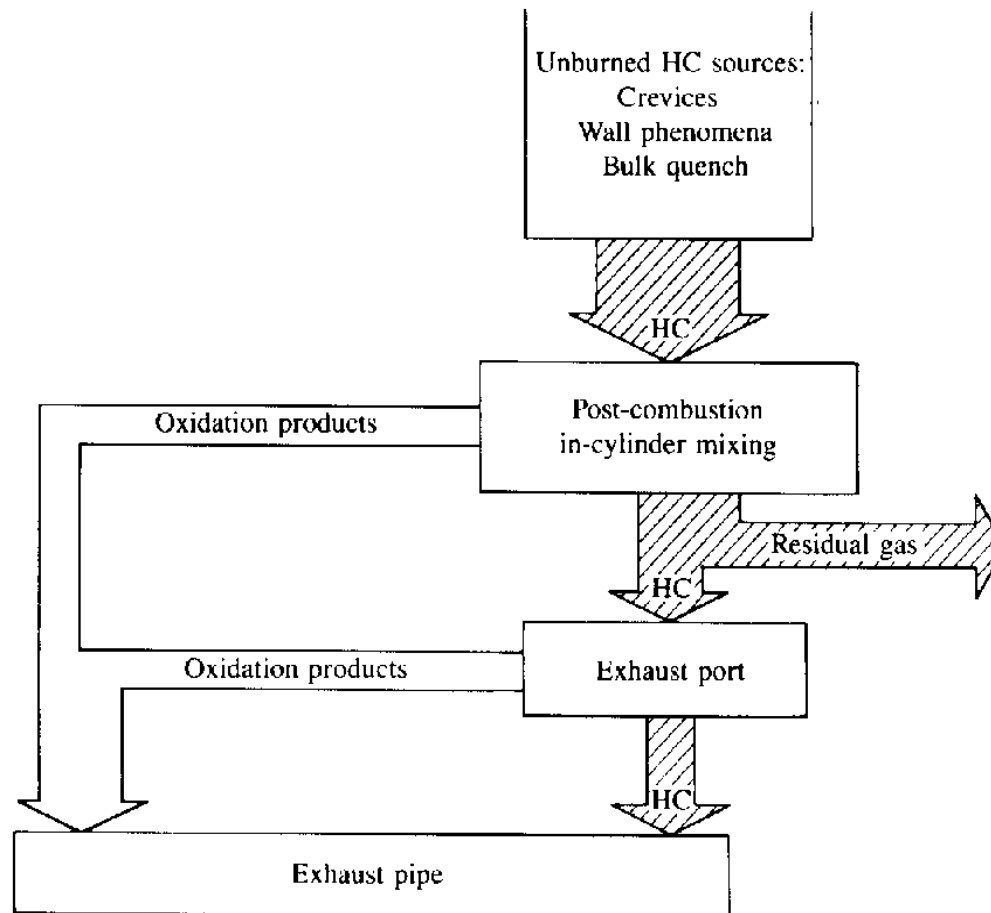
- Las mezclas ricas originan alta cantidad de HC.
- Las mezclas pobres causan apagado de la llama dando origen a HC.
- Los mecanismos que gobiernan la formación de HC son:
  - Apagado de la llama
    - En las paredes “frías” de la cc.
    - En capas muy delgadas sin radiación.
  - Espacios del cilindro que son ocupados por mezcla fresca
    - Volúmenes donde la llama no penetra, un (5-10)% de la mezcla atrapada se quema tardíamente durante la expansión.
    - Durante el “blow-by” parte de esta mezcla va al carter y luego regresa al sistema de admisión.
  - Absorción y liberación / película aceite
    - Durante la admisión y compresión vapores de combustible son absorbidos, durante la expansión y escape son liberados.
    - Contribución de la película de aceite en la formación de HC.
  - Mala combustión y acumulación en depósitos
    - Apagado de la llama cuando  $\phi \ll 1$  y  $X_R$  aumenta.
    - Absorción / liberación en depósitos porosos.

# Mecanismo de transporte de los HC en MECH

- El conjunto pistón anillos limpia las paredes del cilindro.
  - Inicio del escape.
  - Durante el escape.
  - Final del escape.



# Esquema de formación del HC en MECH



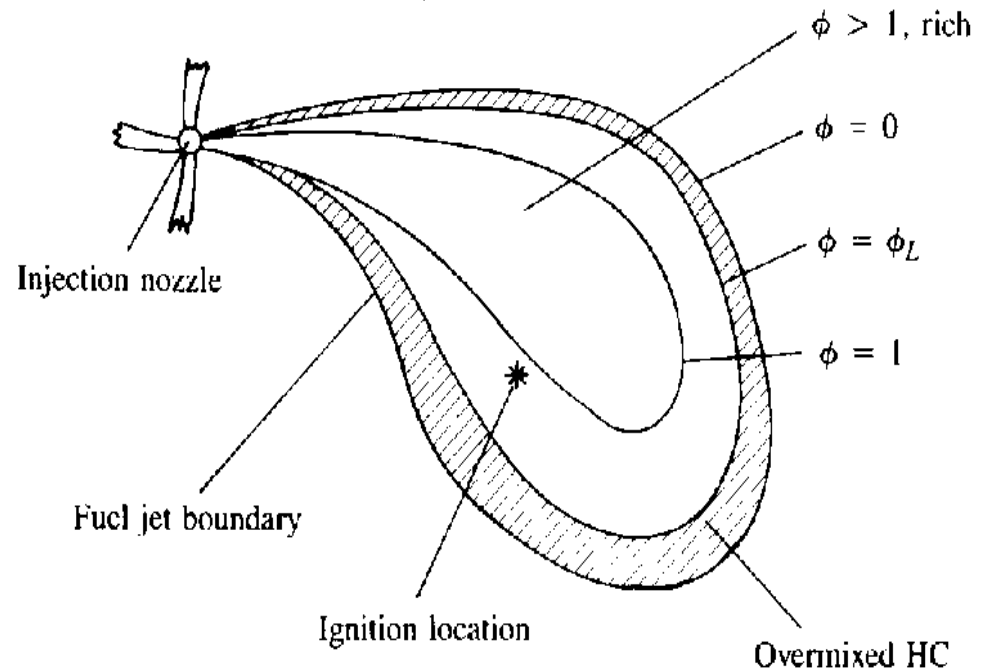
## Emisiones de HC en MEC

- La naturaleza del Diesel muestra hidrocarburos con alto punto de ebullición y  $PM >$  gasolina.
- La composición de los HC varía desde  $CH_4$  hasta hidrocarburos mas pesados.
- La complejidad del proceso de combustión, la vaporización y el mezclado contribuyen con la formación de los HC.
- La no uniformidad de la mezcla en las diversas zonas de la cc crea dos posibles vías de combustión anormal:
  - Cuando  $\phi \ll 1$  se dificulta la propagación de la llama a p y T de la cc.
  - Cuando  $\phi \gg 1$  existe dificultad para encender o soportar la llama.

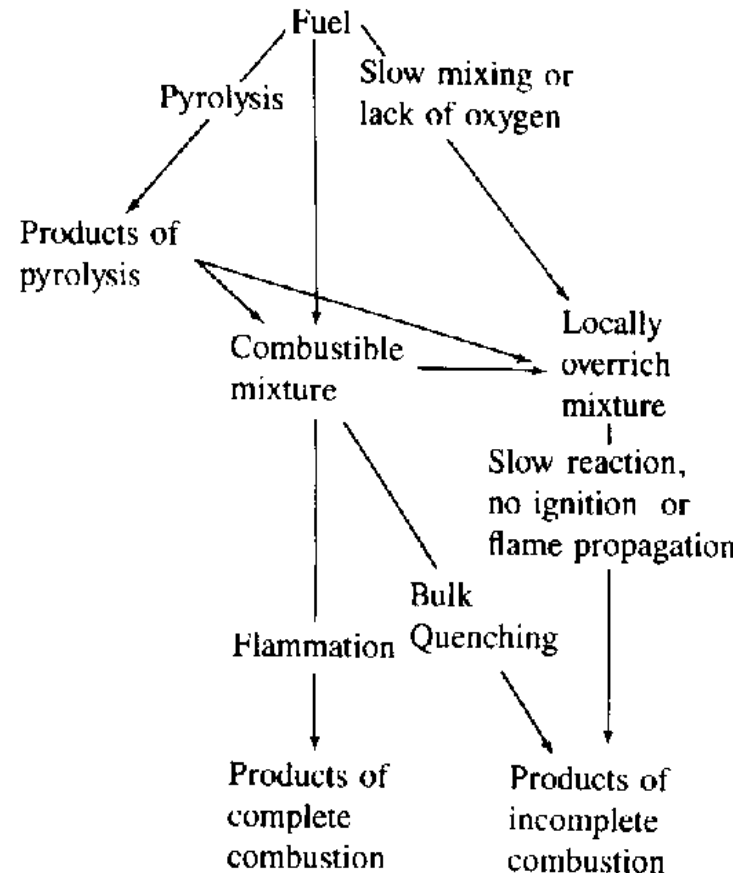
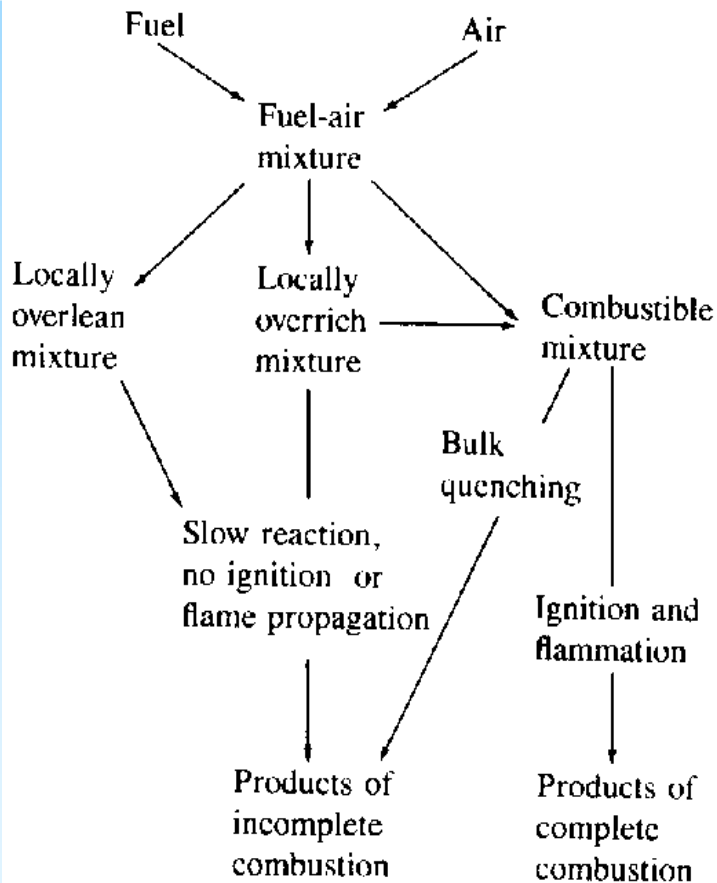


# Atomizado de combustible en MEC

- Zonas presentes en el chorro de combustible en inyectado en una cc con movimiento elevado de aire:
  - Zona sobremezclada (sobreempobrecimiento).
  - Zona de bajo mezclado (sobreenriquecimiento).

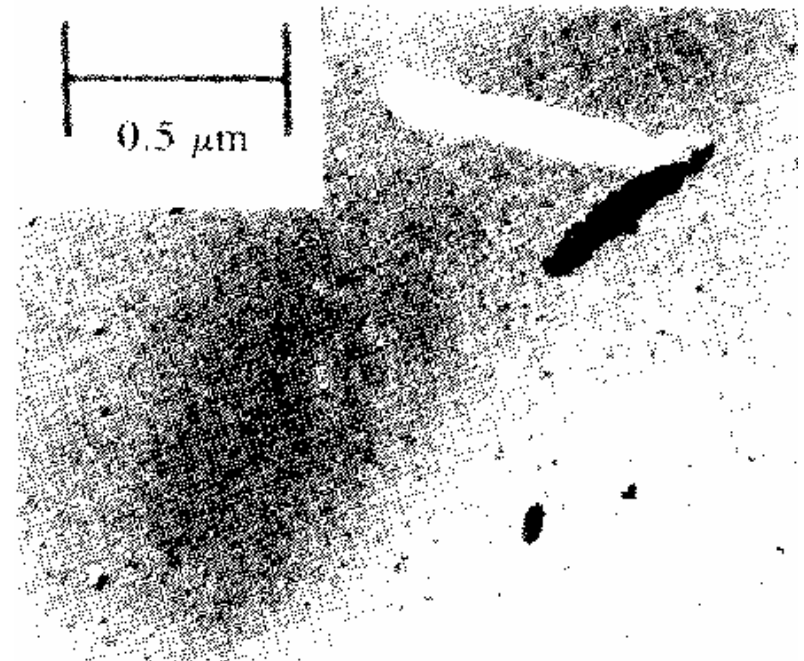


# Esquemas de formación del HC en MEC



# Emisión de partículas

- En MECH se tienen las siguientes: plomo, partículas orgánicas como carbón, sulfatos del azufre contenido en el combustible.
- En MEC se tiene carbonilla:
  - Su origen es el carbono del combustible.
  - T de formación entre (1000 - 2800) K y con suficiente aire.
  - Los productos de combustión insaturados como el Acetileno ( $C_2H_2$ ) y análogos  $C_{2n}H_2$  parecen ser los iniciadores, seguidos por un proceso de aglomeración y coagulación que termina con el crecimiento de partículas de diversos tamaños.
  - La carbonilla expulsada depende del balance entre los procesos que la originan y el quemado de la misma.



## Referencias bibliográficas

- Benson, R. S., Advanced Engineering Thermodynamics. 1977
- Boles, C., Termodinámica. Mc GrawHill. 1996.
- Desantes, J. M. y Lapuerta, M., Fundamentos de Combustión. Universidad Politécnica de Valencia., 1991.
- Heywood, J. B., Internal Combustion Engines Fundamentals. Mc. GrawHill 1988.
- Jovaj, M.S., Motores de Automóvil. Editorial MIR. 1982.
- Kuo, K. K., Principles of Combustion. John Wiley & Sons. 1986.
- L. R. Lilly., Diesel Engine Reference Book. 1985.
- Motores Diesel. Editorial Blume. Segunda Edición. 1973.
- Obert, E. F., Motores de Combustión Interna. 1980.
- Lapuerta, M. A. y Hernández J. J., Tecnologías de la Combustión. Universidad Castilla de la Mancha. 1998.
- Lukanin, V. N., Motores de Combustión Interna. Editorial MIR 1982.
- Salvi, G., La Combustión Teoría y Aplicaciones. Editorial Dossat. 1984.
- Taylor, C. F., The Internal Combustion Engine. 1961.
- Wark, K., Termodinámica. Mc GrawHill. 1984.