



SIMULACIÓN NUMÉRICA Y MODELIZACIÓN TEÓRICA DE UN CICLO TIPO OTTO IRREVERSIBLE

Dr. Ing. Pedro L. Curto-Risso
Dr. Alejandro Medina Domínguez

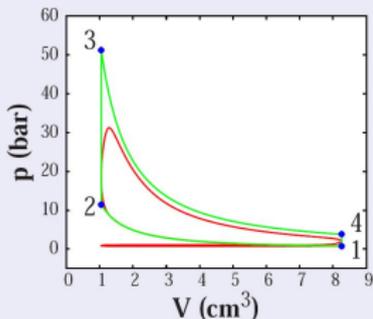


ESQUEMA

- 1 MODELO TEÓRICO DE TTF
 - Comparación de los resultados teóricos y de simulación
- 2 OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA
- 3 VARIABILIDAD CICLO A CICLO
- 4 RESUMEN



MODELO TEÓRICO DE TTF



$$|W_{rev}| = |Q_{23}| - |Q_{41}| \quad (1)$$

$$= T_3 \left[C_{v,23} (1 - \tau r^{\gamma_{12}-1}) - C_{v,41} (r^{1-\gamma_{34}} - \tau) \right]$$

$$\eta = \frac{|W_{rev}|}{|Q_{23}|} = 1 - \frac{C_{v,41} (r^{1-\gamma_{34}} - \tau)}{C_{v,23} (r^{1-\gamma_{12}} - \tau)} r^{1-\gamma_{12}} \quad (2)$$

FUENTES DE IRREVERSIBILIDAD

- Irreversibilidades internas
- Pérdidas de calor
- Pérdidas por fricción

Angulo-Brown y otros (1994, 1996, 1999), Calvo Hernández y otros (1995, 1996, 1998) y Curto-Risso y otros (2008, 2009)



CONSIDERANDO IRREVERSIBILIDADES

TRABAJO IRREVERSIBLE

$$|W| = |W_I| - |W_{\text{fric}}| - |W_Q| \quad (3)$$

TRABAJO CON IRREVERSIBILIDADES INTERNAS ($I_R \frac{|Q_H|}{T_H} - \frac{|Q_C|}{T_C} = 0$)

$$|W_I| = T_3 \left[\bar{C}_{v,23} \left(1 - \tau r^{\bar{\gamma}_{u,12} - 1} \right) - I_R \bar{C}_{v,41} \left(r^{1 - \bar{\gamma}_{b,34}} - \tau \right) \right] \quad (4)$$

PÉRDIDA DE TRABAJO DEBIDA A LA TRANSFERENCIA DE CALOR

$$|W_Q| = \frac{\pi \epsilon h B t T_3}{16} \left[B + \frac{V_0}{A_p} (1 + r) \right] \left(1 + r^{1 - \gamma} - 2 \frac{T_w}{T_3} \right) \quad (5)$$

PÉRDIDA DE TRABAJO DEBIDA A LA FUERZA DE ROZAMIENTO ($\xi_1 = \xi_1(\varphi)$)

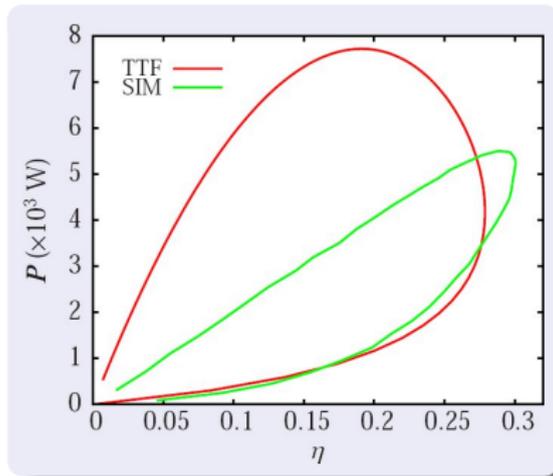
$$|W_{\text{fric}}| = \frac{a \mu \omega V_0 (r - 1)}{2 A_p} \int_0^{4\pi} \xi_1^2 d\varphi \quad (6)$$

RESULTADOS TEÓRICOS Y SIMULADOS

CÁLCULO DE P Y η

$$P = |W|/t_{\text{ciclo}} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{|W|}{\bar{C}_{v,23} T_3 (1 - \tau r^{\bar{\gamma}_{u,12} - 1})} \quad (8)$$

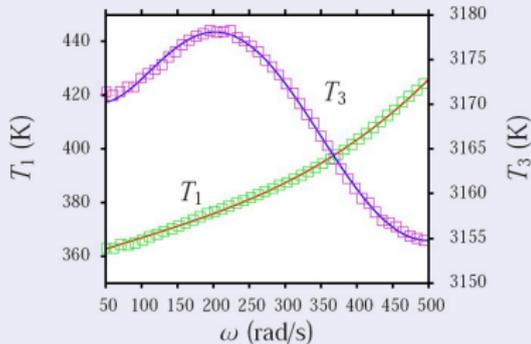


- T_3 en la simulación se calcula a partir de la temperatura de llama, mediante una compresión adiabática de los gases desde una temperatura T_1 (T en el pmi). T_3 en la TTF es dato.
- El trabajo $|W|$ en la simulación se calcula integrando en el ciclo: pdV y $F_{\text{fric}}/A_p dV$. En TTF es el trabajo irreversible

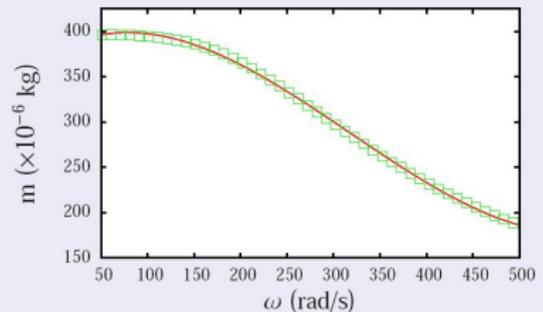
TEMPERATURAS Y MASAS

Ajuste polinómico sobre los resultados de la simulación

TEMPERATURAS



MASA

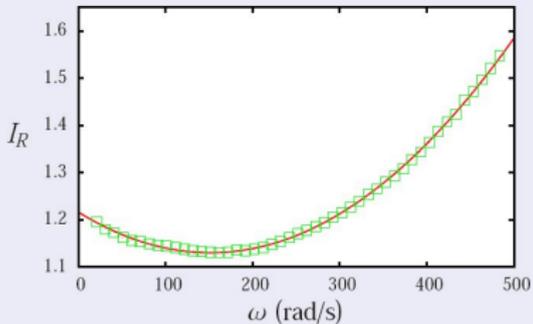


T_1 varía aproximadamente un 20 %, T_3 varía aproximadamente un 7 % y el máximo valor de m representa casi dos veces la masa a la máxima velocidad

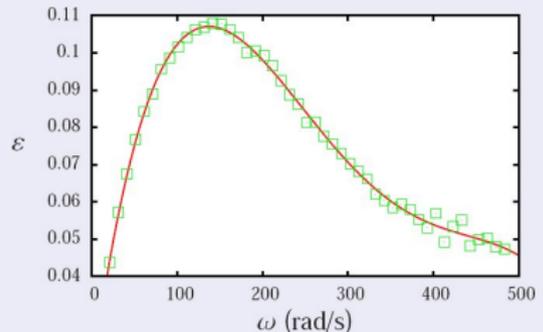
PARÁMETROS DE IRREVERSIBILIDAD

Ajuste polinómico sobre los resultados de la simulación

IRREVERSIBILIDAD INTERNA



FACTOR DE IRR. ASOCIADO A LA TRANSFERENCIA DE CALOR

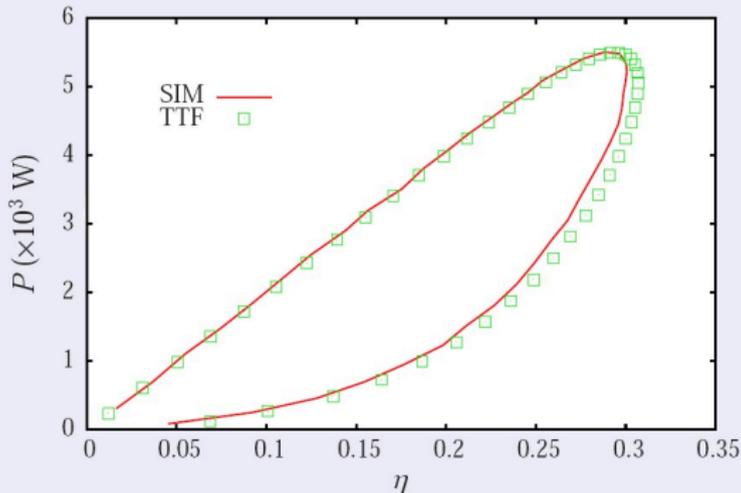


A moderadas velocidades ambos presentan un comportamiento parabólico con concavidad diferente, el máximo y el mínimo se encuentran a velocidades muy cercanas.



RESULTADOS CON AJUSTES POLINÓMICOS

COMPARACIÓN CON EL DIAGRAMA $P - \eta$ AJUSTADO



Se observa como el modelo teórico reproduce cuantitativamente los resultados de la simulación.



OPTIMIZACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS DE TTF

A los resultados de simulación le aplicaremos las técnicas usuales de TTF con el objetivo de obtener valores óptimos

En las máquinas de potencia variable, el criterio de optimización difiere de los utilizados habitualmente en TTF.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN

En este trabajo consideramos como criterio de optimización el *valor de rendimiento más alto alcanzable para cada nivel de potencia en que se trabaja*



OPTIMIZACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS DE TTF

De todos los parámetros susceptibles de analizar para optimizar el motor, mencionaremos los más significativos:

RESULTADOS MÁS DESTACADOS

- Relación carrera-diámetro (R_{sb})
- Relación de compresión (r)
- Avance del encendido (φ_0)
- Razón de equivalencia de combustible y aire (ϕ)



RELACIÓN CARRERA-DIÁMETRO

La relación carrera-diámetro es el cociente entre la carrera del pistón, $2a$, y su diámetro, B : $R_{sb} = 2a/B$

Cambiamos la relación entre a y B manteniendo constante el máximo valor de la cámara, V_{cyl} , y la relación de compresión, r , a través de las siguientes ecuaciones:

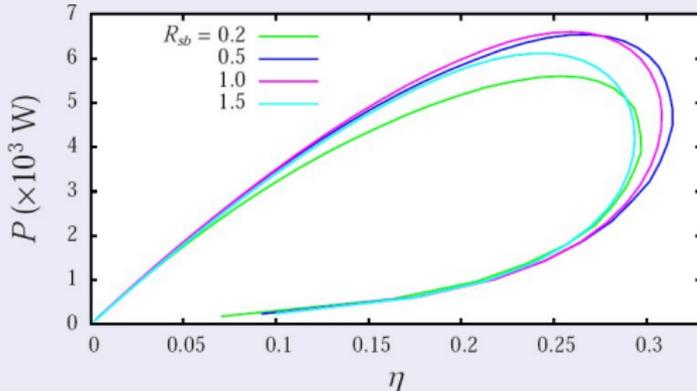
$$B = \left[\frac{4(r-1)V_{cyl}}{\pi r R_{sb}} \right]^{1/3} \quad (9)$$

$$a = \left[\frac{(r-1)V_{cyl}}{2\pi r} \right]^{1/3} R_{sb}^{2/3} \quad (10)$$

RELACIÓN CARRERA-DIÁMETRO

Graficamos los pares (P, η) obtenidos cuando cambiamos la velocidad, ω .

DIAGRAMA $P - \eta$



- Los valores extremos de R_{sb} presentan menores potencias y rendimientos para todo el intervalo de velocidades.
- Desde la curva interna a la externa el rendimiento máximo se incrementa en un 7% y la potencia máxima en un 18%.



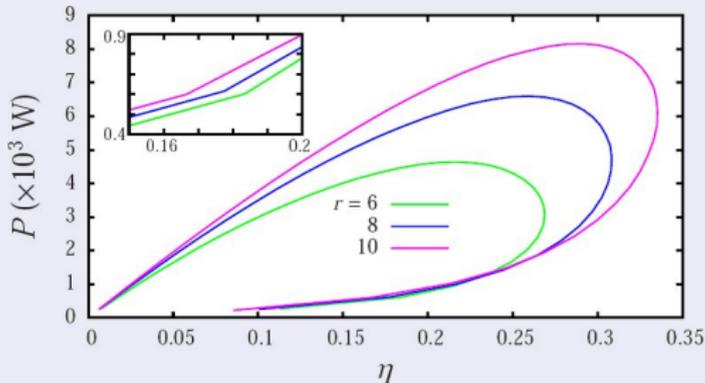
RELACIÓN DE COMPRESIÓN

La relación de compresión, r , refleja la relación entre el máximo y el mínimo volumen de la cámara de combustión.

Nuevamente, cambiamos r manteniendo constante R_{sb} y V_{cyl} utilizando las ecuaciones (9) y (10)

RELACIÓN DE COMPRESIÓN

DIAGRAMA $P - \eta$



- Como es de esperar, tanto la potencia como el rendimiento crecen con r . De $r = 6$ a 10 la potencia máxima crece un 76% y el rendimiento máximo 25%.
- Con altos r se obtienen mejores resultados, el límite es la autoignición.
- A bajos ω , pequeños r muestran mejores resultados.



PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

De todos los parámetros susceptibles de analizar para optimizar el motor, mencionaremos los más significativos:

RESULTADOS MÁS DESTACADOS

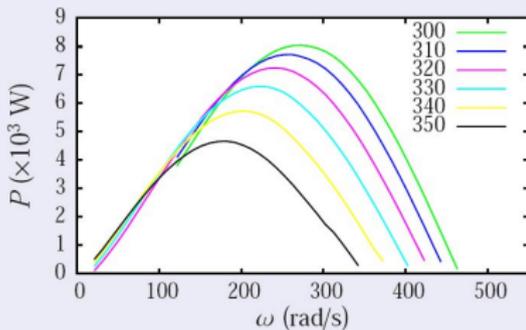
- Avance del encendido (φ_0)
- Razón de equivalencia de combustible y aire (ϕ)

AVANCE DEL ENCENDIDO

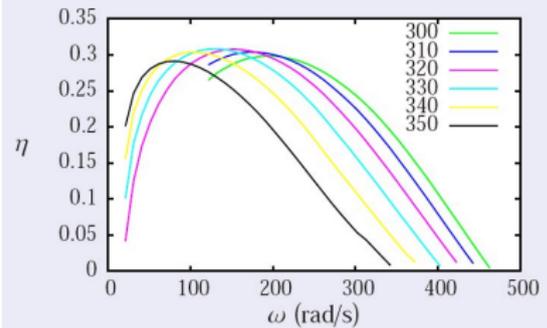
Avance del encendido: ángulo en que se produce la chispa en la bujía (inicio de la combustión).

Evolución de la potencia y el rendimiento para diferentes ángulos de ignición

POTENCIA



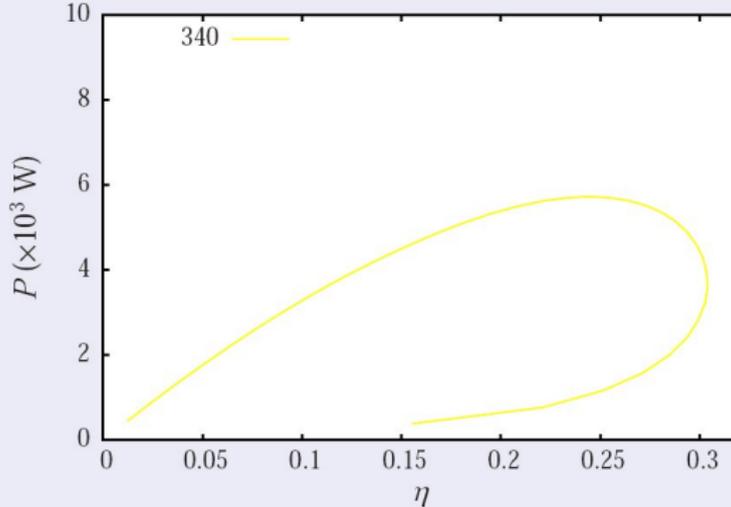
RENDIMIENTO





DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL AVANCE DE ENCENDIDO

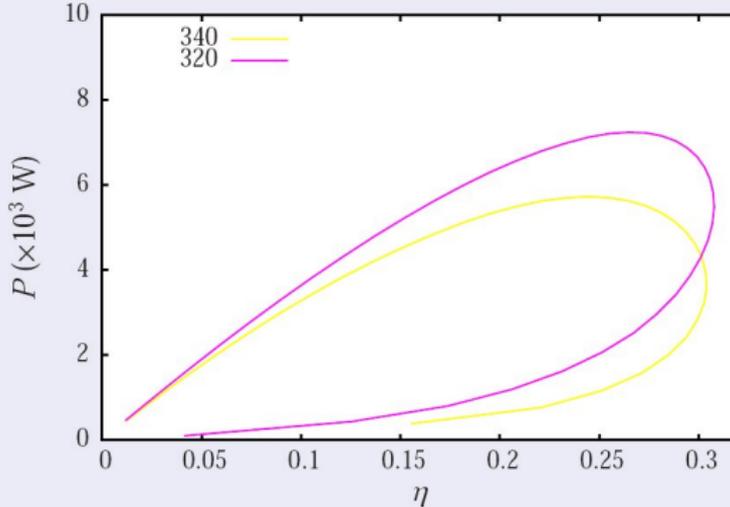
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL AVANCE DE ENCENDIDO

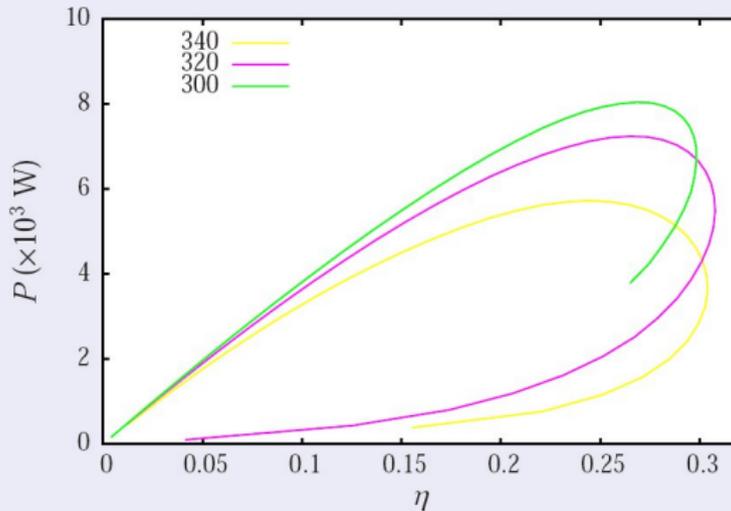
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





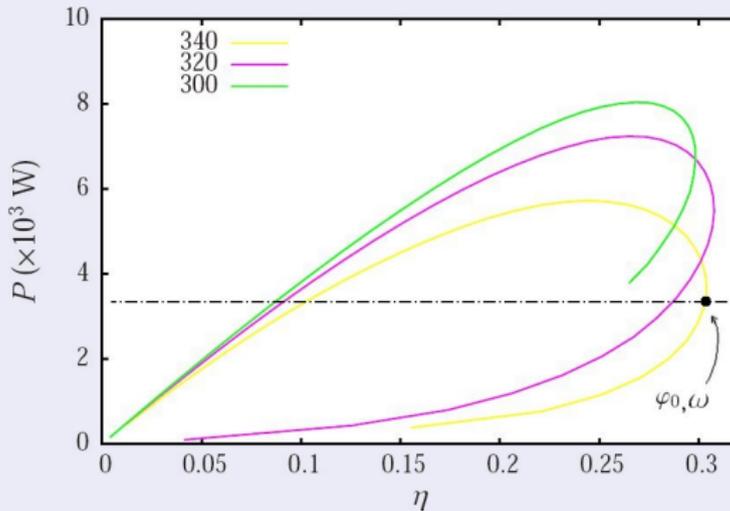
DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL AVANCE DE ENCENDIDO

EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO



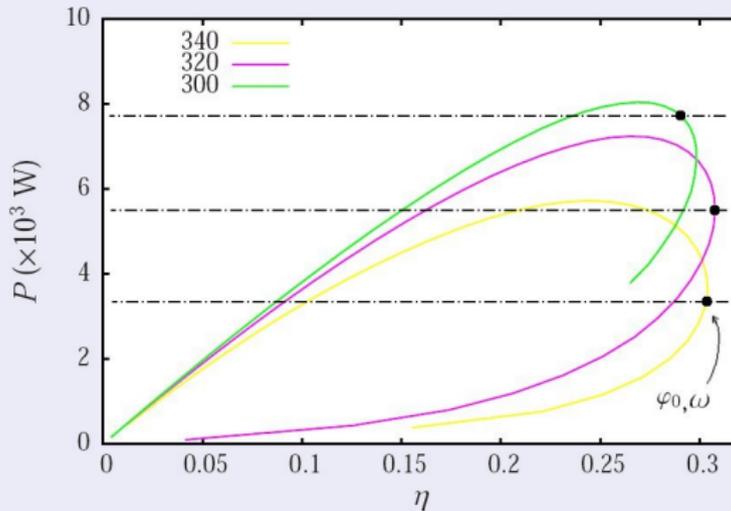
DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL AVANCE DE ENCENDIDO

EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO



DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL AVANCE DE ENCENDIDO

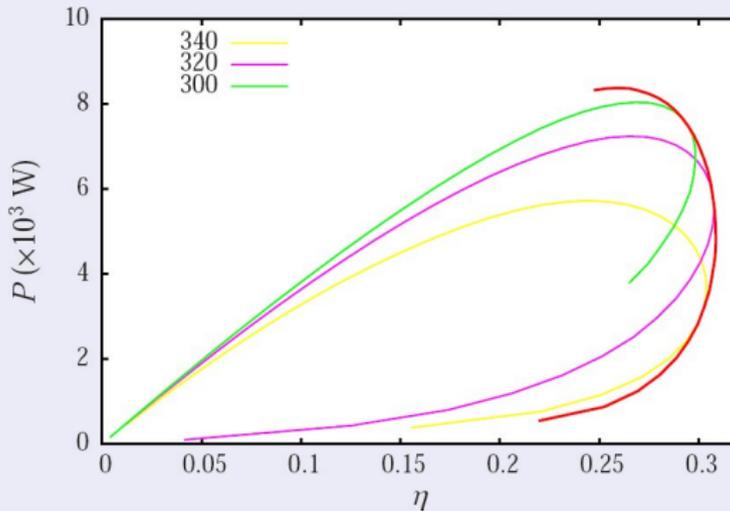
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL AVANCE DE ENCENDIDO

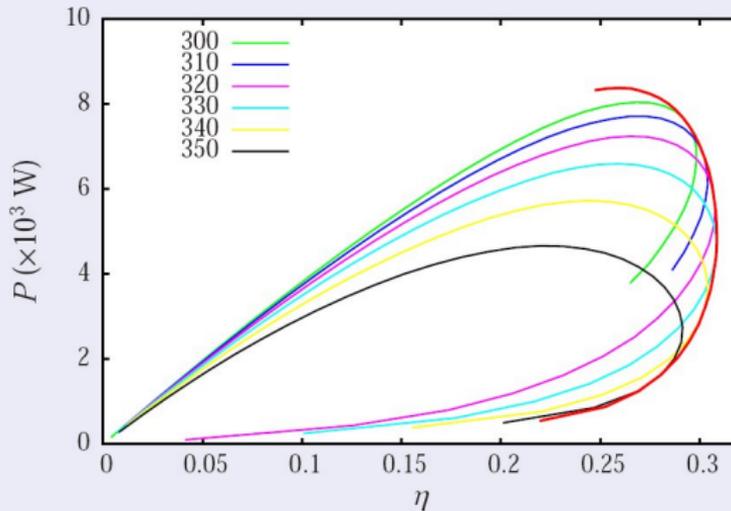
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





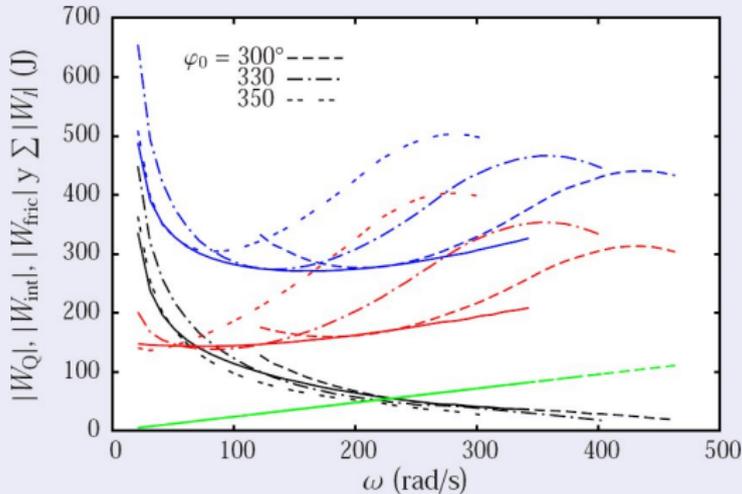
DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL AVANCE DE ENCENDIDO

EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO



PÉRDIDAS DE TRABAJO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD

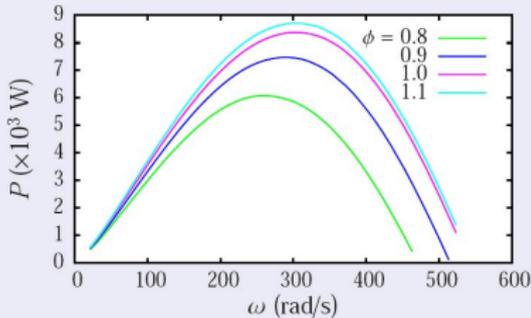
PÉRDIDAS DE TRABAJO SEGÚN LA IRREVERSIBILIDAD



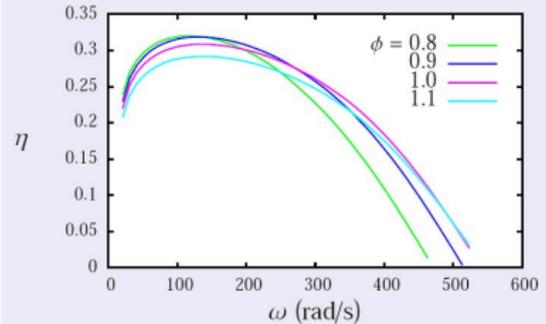
RAZÓN DE EQUIVALENCIA DE COMBUSTIBLE Y AIRE

¿Qué sucede cuándo no se aprecia claramente un óptimo en la potencia o el rendimiento?

POTENCIA



RENDIMIENTO

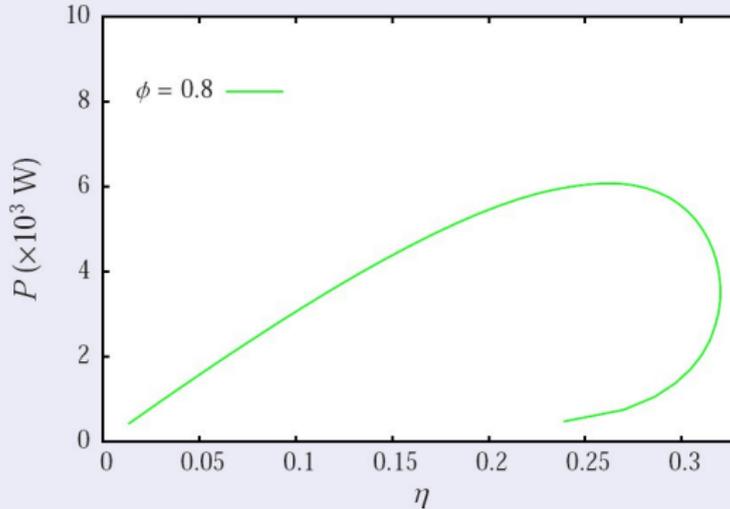


Veamos qué sucede en el diagrama $P - \eta$



DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL FUEL RATIO

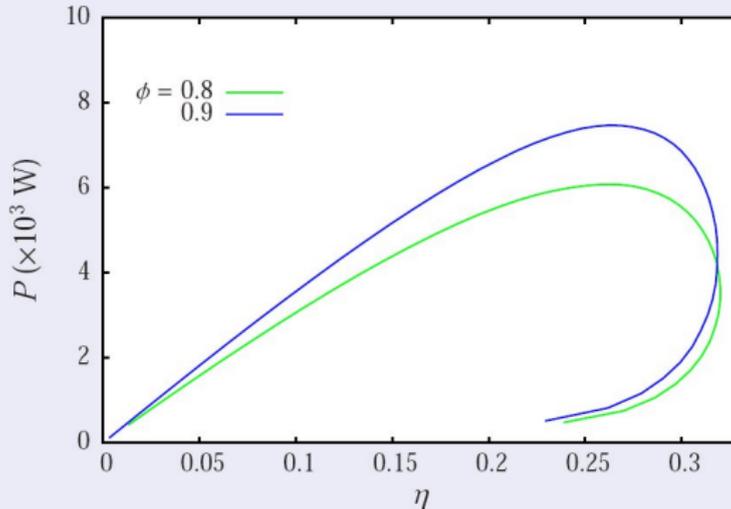
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL FUEL RATIO

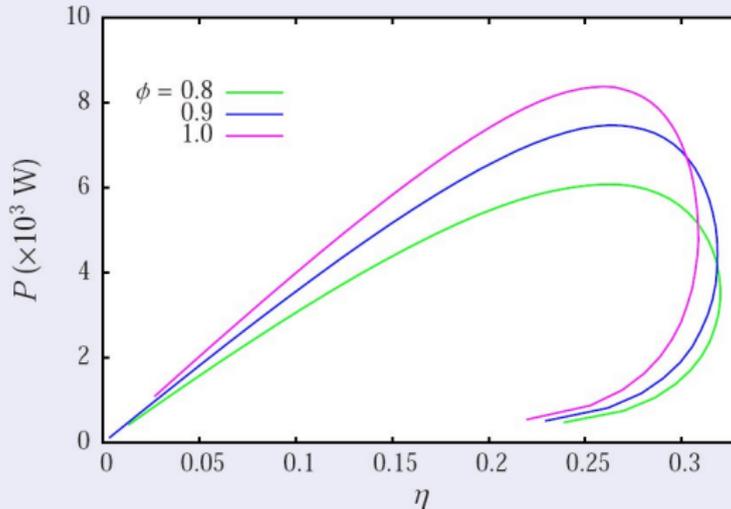
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL FUEL RATIO

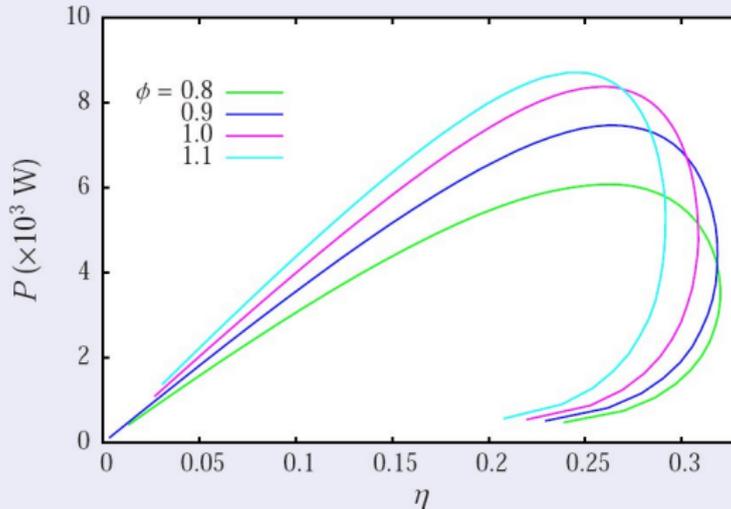
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





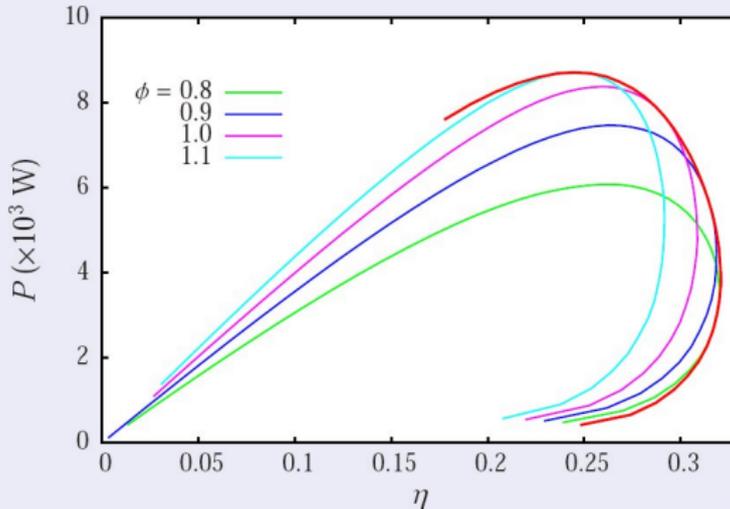
DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL FUEL RATIO

EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO



DIAGRAMAS $P - \eta$ PARA EL FUEL RATIO

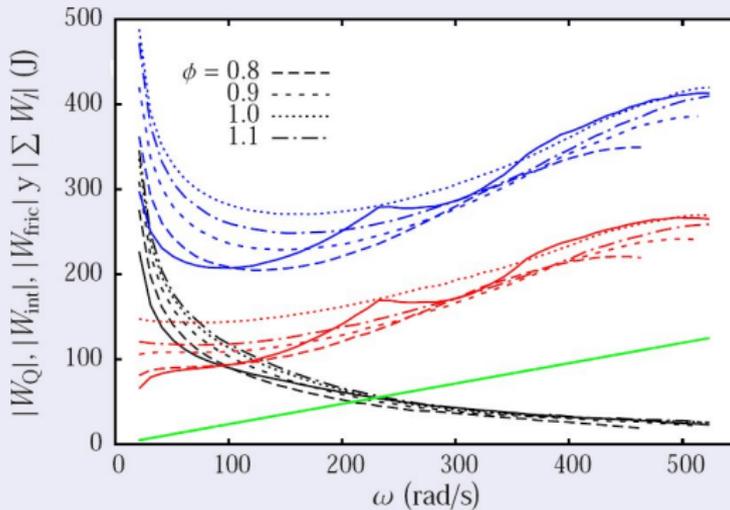
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO



Queda claro que es el diagrama $P - \eta$ una herramienta general que permite aplicar el criterio de optimización mencionado

PÉRDIDAS DE TRABAJO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD

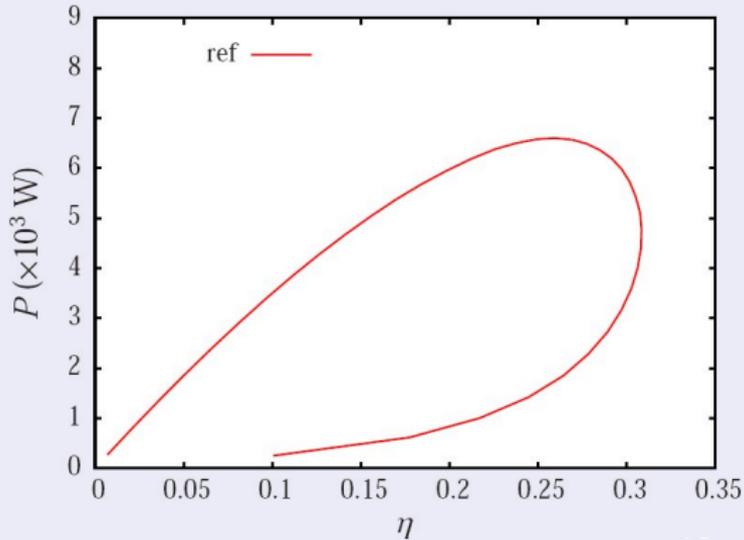
PÉRDIDAS DE TRABAJO SEGÚN LA IRREVERSIBILIDAD





PASOS DE OPTIMIZACIÓN

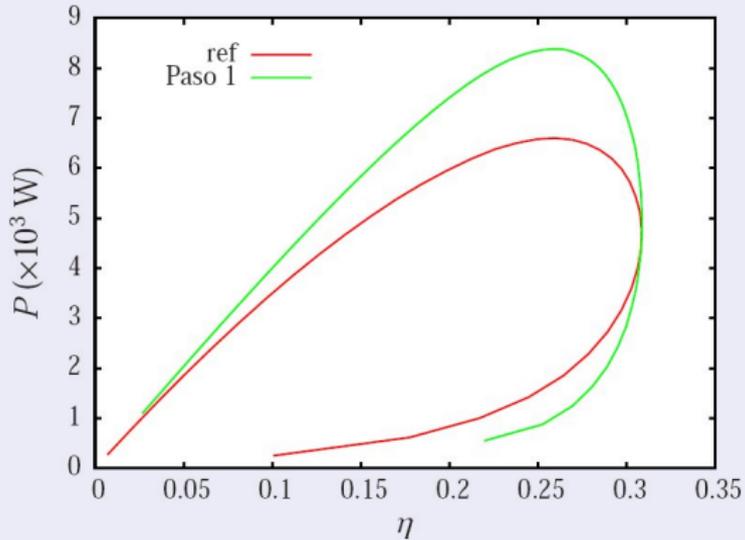
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





PASOS DE OPTIMIZACIÓN

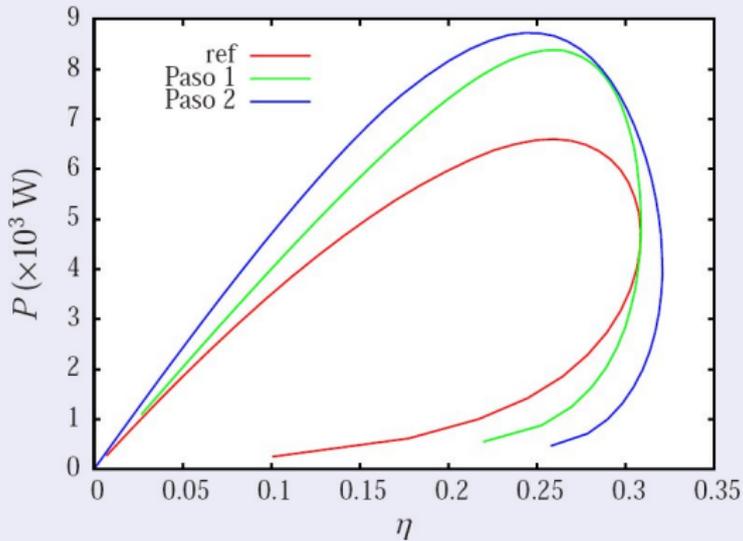
EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





PASOS DE OPTIMIZACIÓN

EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





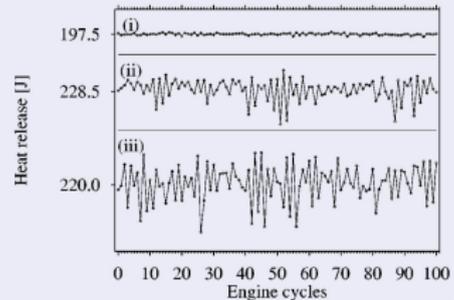
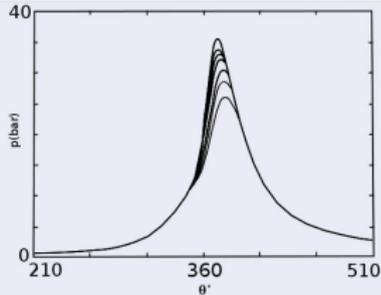
VARIABILIDAD CICLO A CICLO

Con la base del modelo determinista presentado anteriormente intentaremos reproducir y explicar la variabilidad ciclo a ciclo (VCC), observada en los motores de combustión interna.

PROCEDIMIENTO

Identificaremos las principales causas de la variabilidad y ajustaremos los parámetros necesarios para que el modelo reproduzca los resultados experimentales

VARIABILIDAD, RESULTADOS EXPERIMENTALES



POSIBLES CAUSAS DE LA VARIACIÓN CICLO A CICLO

- Movimiento turbulento del gas
- Variación en la composición de la mezcla de gases
- Variación en la carga de combustible en cada ciclo
- No homogeneidad en la mezcla
- Características en la descarga de la chispa

(a) John B. Heywood (1988) (b) C.S. Daw, 1998, Physical Review E (57) 3



CALOR LIBERADO

Utilizamos el calor liberado Q_r como variable de interés

CALOR LIBERADO

Se calcula el calor liberado a partir del primer principio de la termodinámica:

$$\delta Q_r = dU + \delta W + \delta Q_l \quad (11)$$

$$U = m_u c_{v,u} T_u + m_b c_{v,b} T_b$$

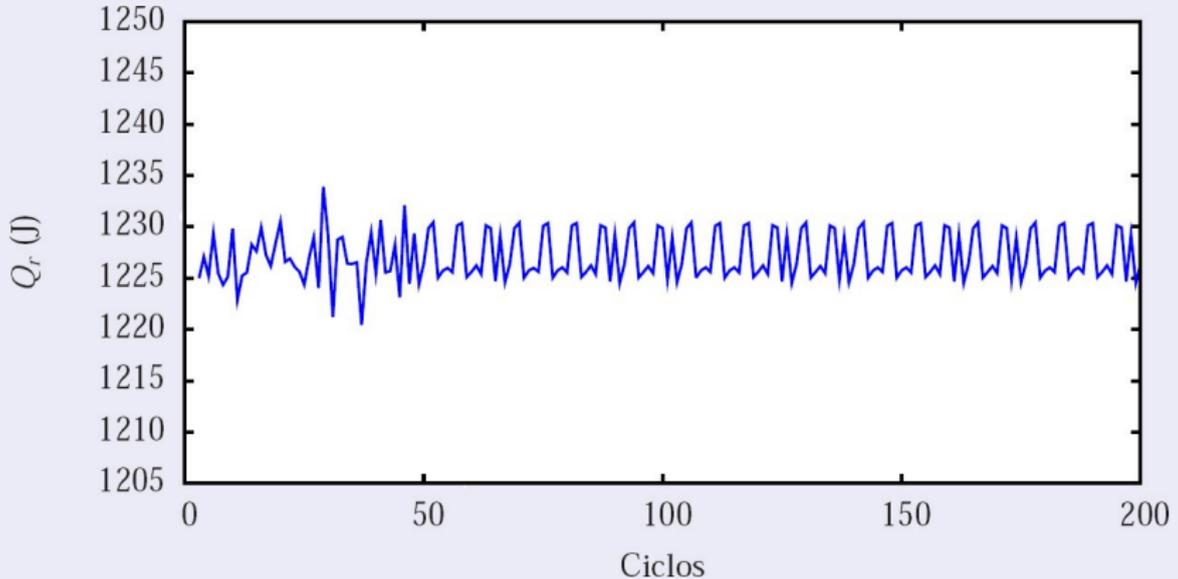
$$\delta W = p dV$$

$$\delta Q_l = \delta Q_{l,u} + \delta Q_{l,b}$$



SERIE TEMPORAL DEL CALOR LIBERADO

CALOR LIBERADO, Q_r , DETERMINISTA



Tomando la geometría y los parámetros de funcionamiento de Beretta (1983), para una velocidad fija de 109 rad/s.



MODELO ESTOCÁSTICO

PROCEDIMIENTO

Se analizan tres parámetros básicos de la combustión que varían ciclo a ciclo:

- longitud característica, l_t .
- velocidad característica, u_t .
- posición del centro del frente de llama con respecto al eje del cilindro, R_c .

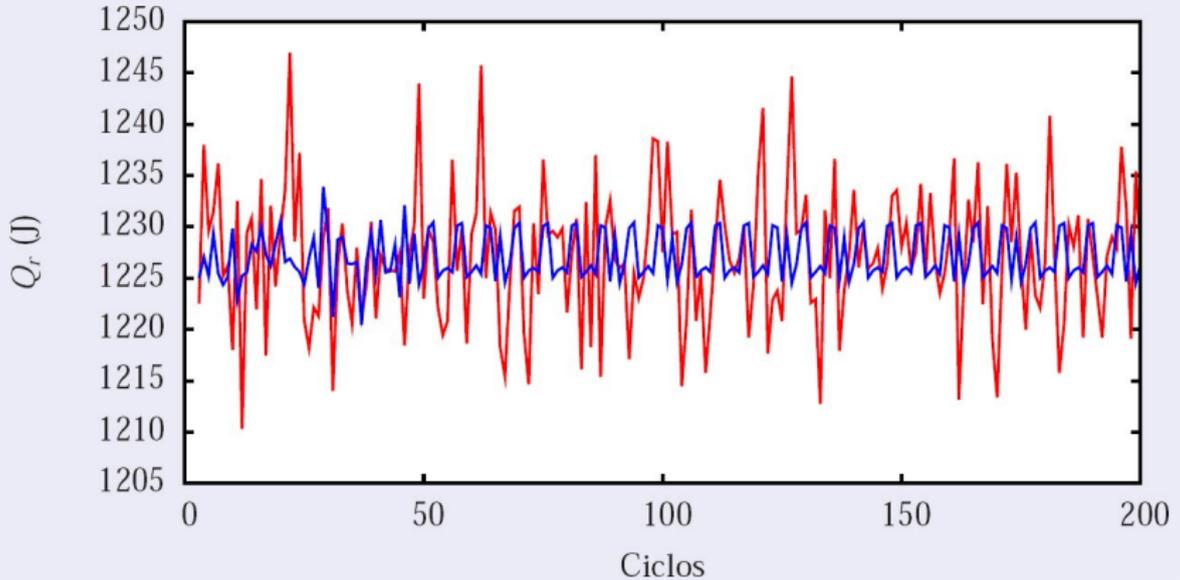
AJUSTE

Hemos ajustado los resultados experimentales de Beretta (1983) para l_t , considerándola como una variable aleatoria con una distribución de probabilidades *log-normal*, $\text{LogN}(\mu_{\log l_t}, \sigma_{\log l_t})$.



SERIE TEMPORAL DEL CALOR LIBERADO

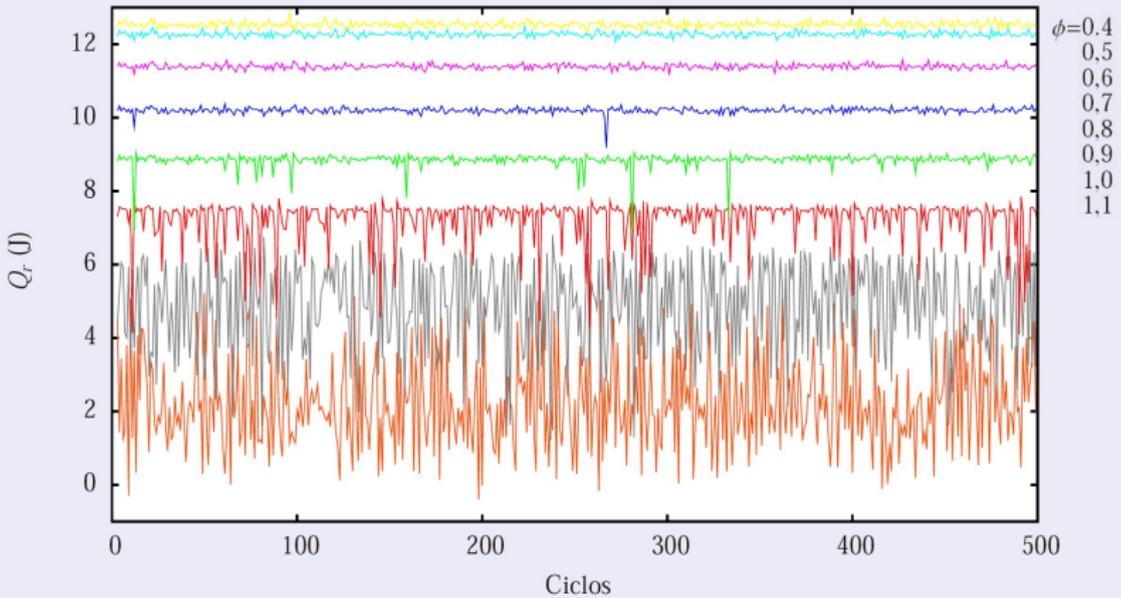
CALOR LIBERADO, Q_r , DETERMINISTA Y ESTOCÁSTICO





SERIES TEMPORALES DEL CALOR LIBERADO

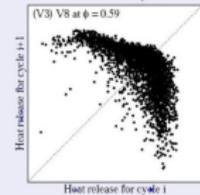
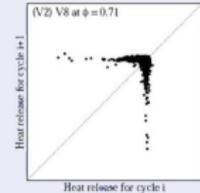
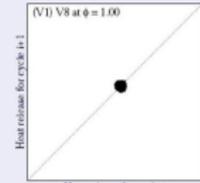
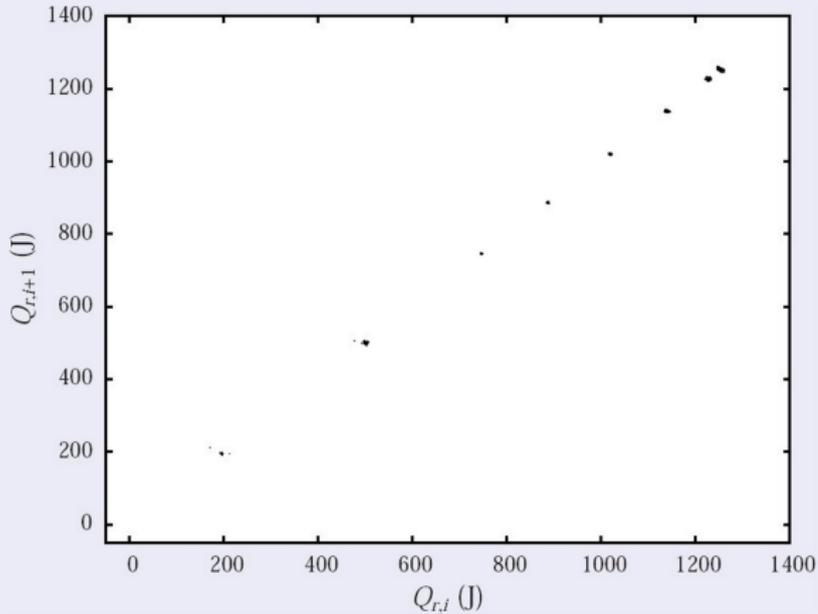
EVOLUCIÓN DE Q_r PARA DIFERENTES ϕ





MAPA DE RETORNO

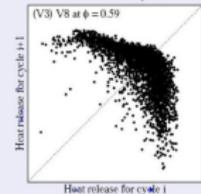
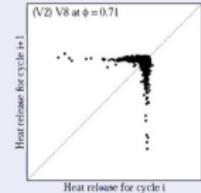
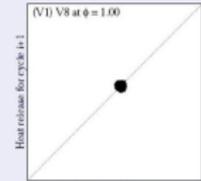
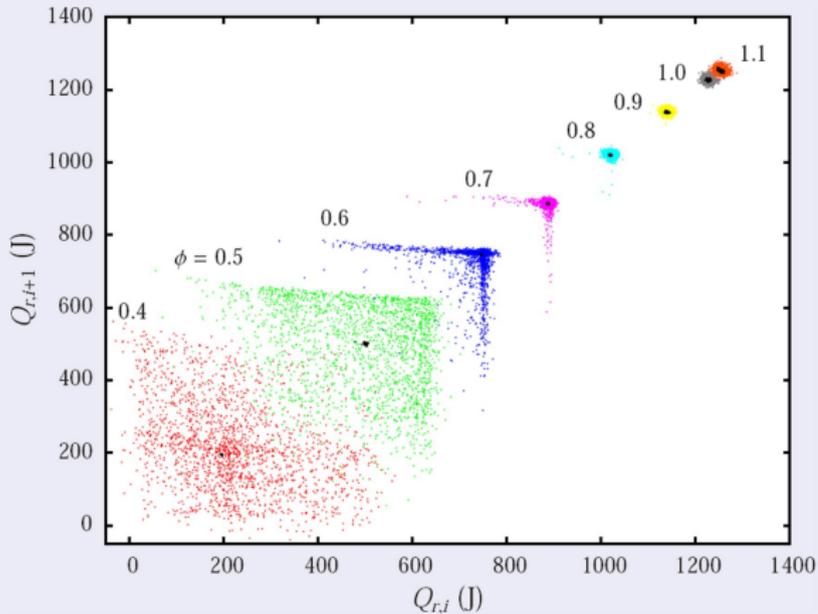
MAPA DE RETORNO PARA EL CALOR LIBERADO





MAPA DE RETORNO

MAPA DE RETORNO PARA EL CALOR LIBERADO



La incorporación de un modelo estocástico para I_t reproduce los resultados experimentales



DIAGRAMA DE BIFURCACIÓN

DIAGRAMA DE BIFURCACIÓN DETERMINISTA

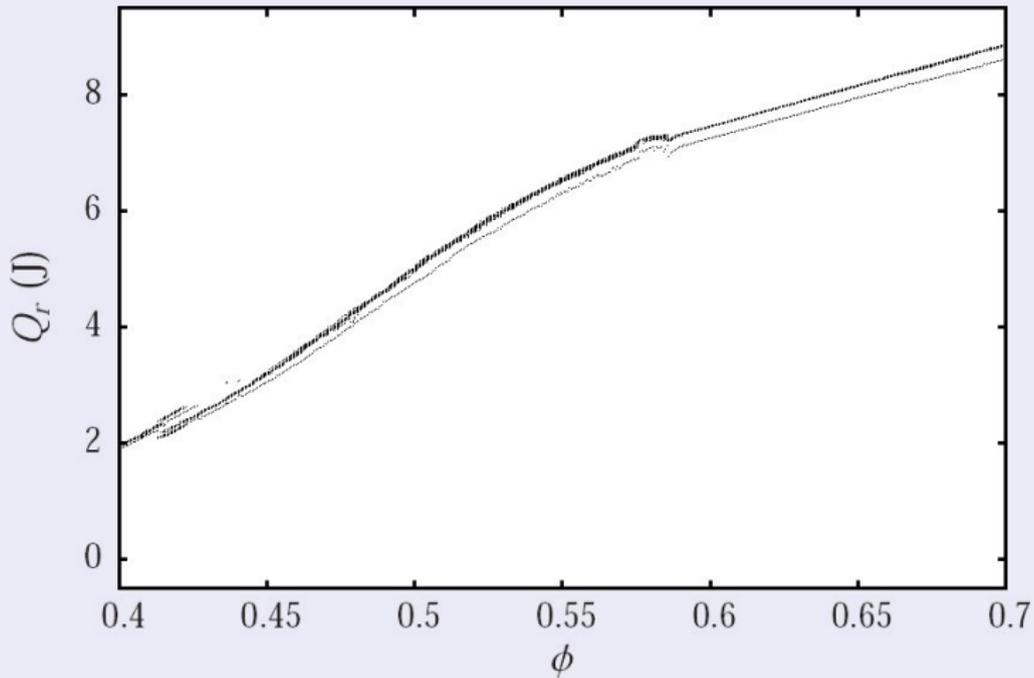
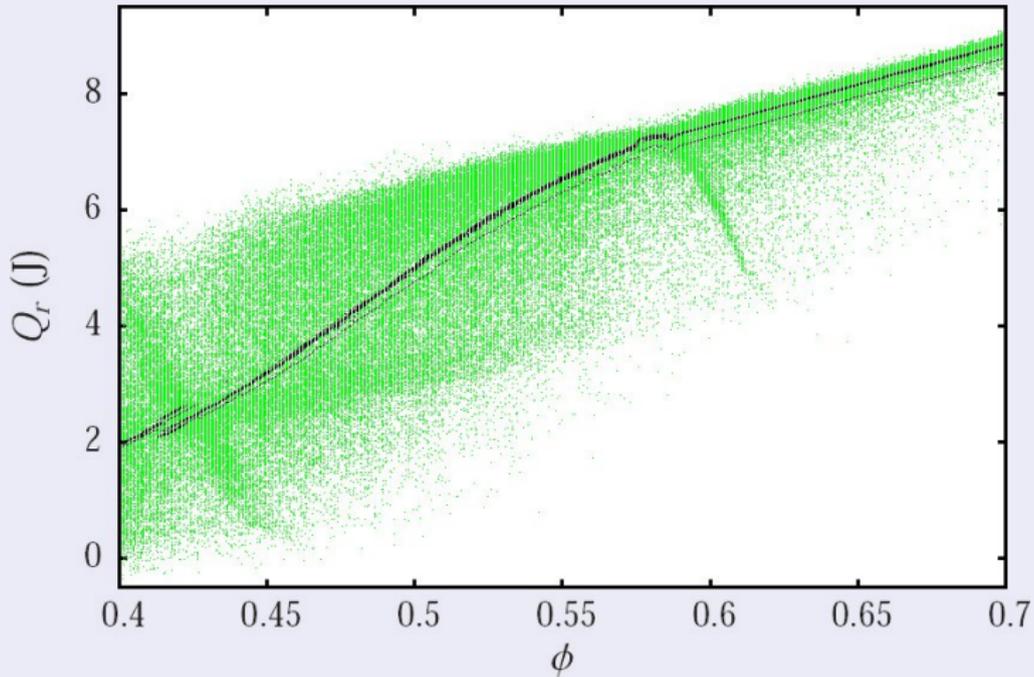




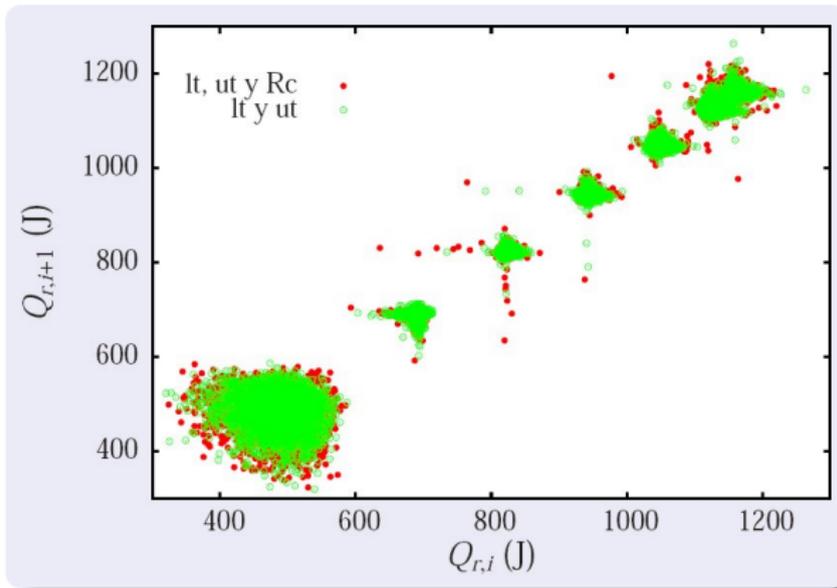
DIAGRAMA DE BIFURCACIÓN

DIAGRAMA DE BIFURCACIÓN DETERMINISTA Y ESTOCÁSTICO



MAPA DE RETORNO

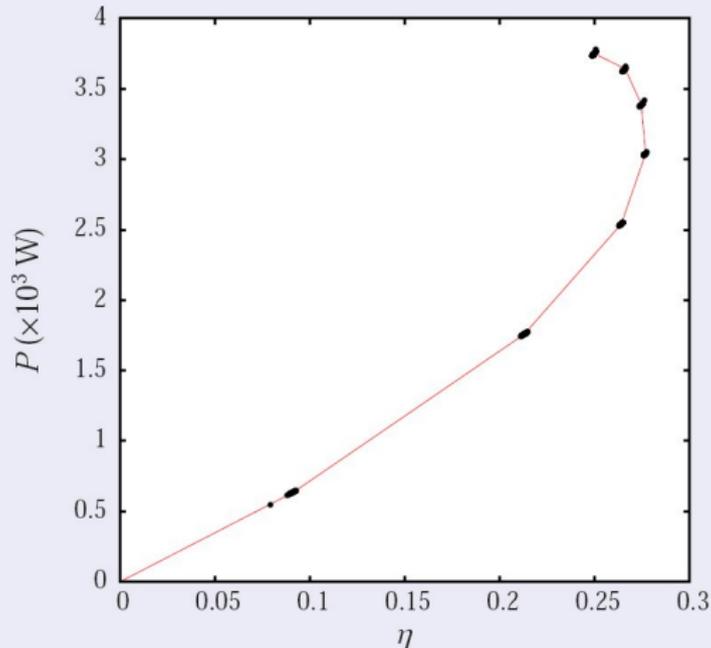
Mapa de retorno para el calor liberado considerando el efecto de l_t , u_t y R_c independientes y su comparación cuando se considera únicamente l_t y u_t .





CONSIDERACIONES DE VCC EN LA OPTIMIZACIÓN

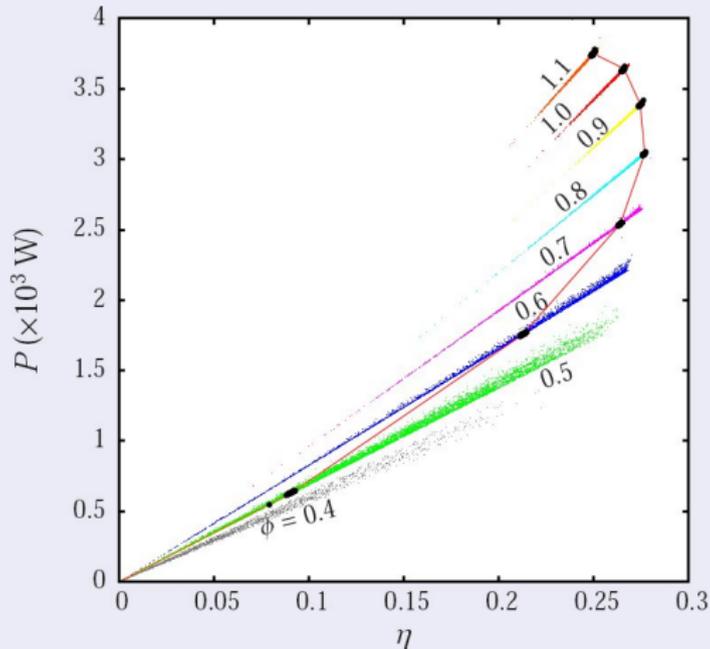
EFEECTO EN LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





CONSIDERACIONES DE VCC EN LA OPTIMIZACIÓN

EFEECTO EN LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO





RESUMEN

PRINCIPALES CONCLUSIONES

- Vimos el desarrollo y la validación de un modelo numérico de un motor monocilíndrico de encendido por chispa.
- Optimizamos los principales parámetros de diseño y de funcionamiento de un motor, obtenidos de la simulación según un criterio de optimización para máquinas de potencia variable.
- Analizamos el comportamiento de la variabilidad ciclo a ciclo y sus posibles causas. Observamos que hay dos parámetros fundamentales en ese comportamiento, que modificando adecuadamente, permiten al modelo reproducir cuantitativamente los resultados experimentales.



RESUMEN

PRINCIPALES CONCLUSIONES

- Vimos el desarrollo y la validación de un modelo numérico de un motor monocilíndrico de encendido por chispa.
- Optimizamos los principales parámetros de diseño y de funcionamiento de un motor, obtenidos de la simulación según un criterio de optimización para máquinas de potencia variable.
- Analizamos el comportamiento de la variabilidad ciclo a ciclo y sus posibles causas. Observamos que hay dos parámetros fundamentales en ese comportamiento, que modificando adecuadamente, permiten al modelo reproducir cuantitativamente los resultados experimentales.



RESUMEN

PRINCIPALES CONCLUSIONES

- Vimos el desarrollo y la validación de un modelo numérico de un motor monocilíndrico de encendido por chispa.
- Optimizamos los principales parámetros de diseño y de funcionamiento de un motor, obtenidos de la simulación según un criterio de optimización para máquinas de potencia variable.
- Analizamos el comportamiento de la variabilidad ciclo a ciclo y sus posibles causas. Observamos que hay dos parámetros fundamentales en ese comportamiento, que modificando adecuadamente, permiten al modelo reproducir cuantitativamente los resultados experimentales.



FIN

Gracias por su atención