

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

Modelado y Simulación de un Motor Diesel Turboaspirado mediante la Técnica Bond Graph



Autores:

**Carlos Mariano Acuña
Ernesto Miguel Bonell**

Director:

Ing. Sergio Junco

Asesores:

**Dr. Ing. Norberto M. Nigro
Ing. Ernesto Kofman
Ing. Mónica Romero**

Objetivos

Modelar un motor diesel turboaspirado, para monitoreo y control.

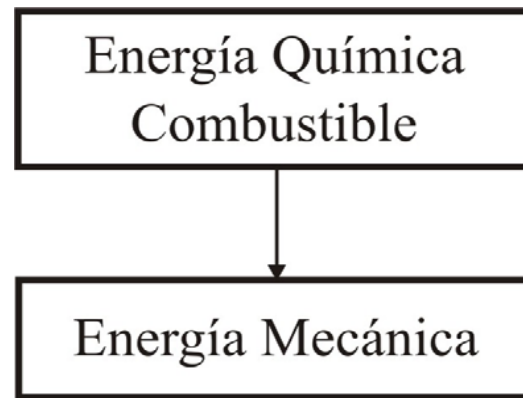
Mostrar como la técnica Bond Graph es útil para el desarrollo de un modelo dinámico y no lineal de un motor diesel

Breve descripción del proyecto

- División del motor en subsistemas y obtención de los modelos.
- Posterior ensamble de los subsistemas para obtener un modelo del motor completo
- Deducción de las ecuaciones de estado gobernantes.
- Implementación del modelo en entorno Matlab /Simulink
- Presentación de resultados típicos de las pruebas de simulación en estado estacionario y transitorio.

Nociones básicas de los MCI

Propósito: producción de energía mecánica a partir de la energía química almacenada en el combustible

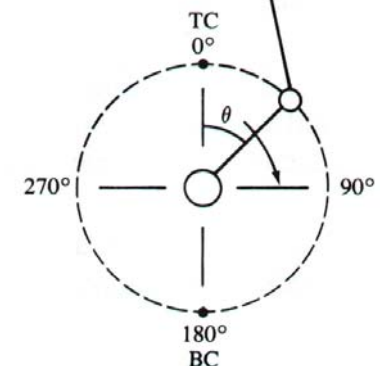
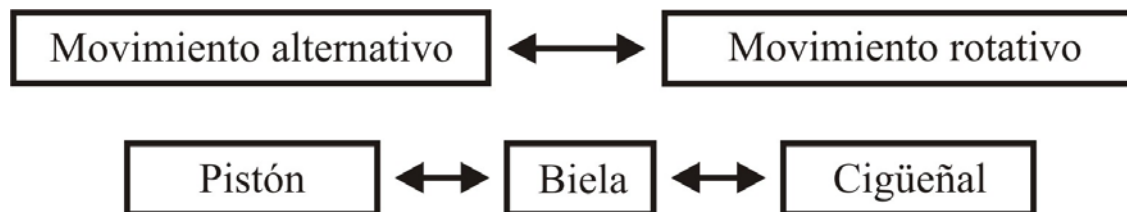
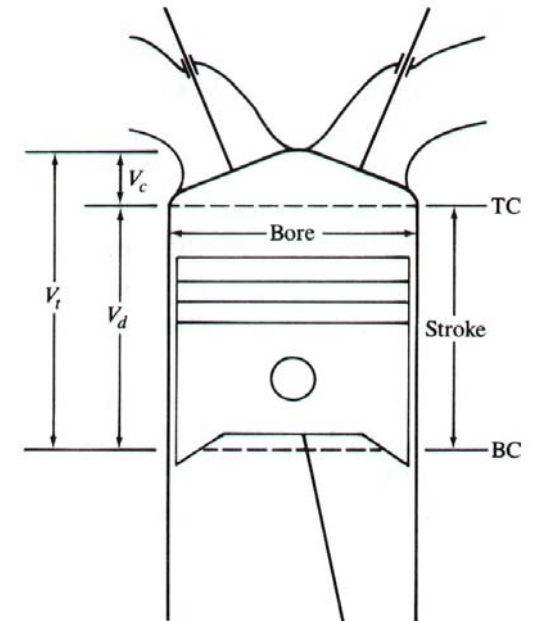


MCI - Encendido por

- Chispa - Ciclo Otto - Nafteros
- Compresión - Ciclo Diesel - Gasoleros

Geometría básica del motor de combustión interna

- Es necesario contar con ciertos elementos mecánicos para que la energía química se convierta en trabajo mecánico en un eje



Ciclo Diesel Ideal de 4 Tiempos

Carrera de admisión: TDC a BDC

En el TDC se abre la válvula de admisión e ingresa el aire al cilindro. La válvula de admisión se cierra cuando el pistón llega al BDC

Carrera de compresión: BDC a TDC

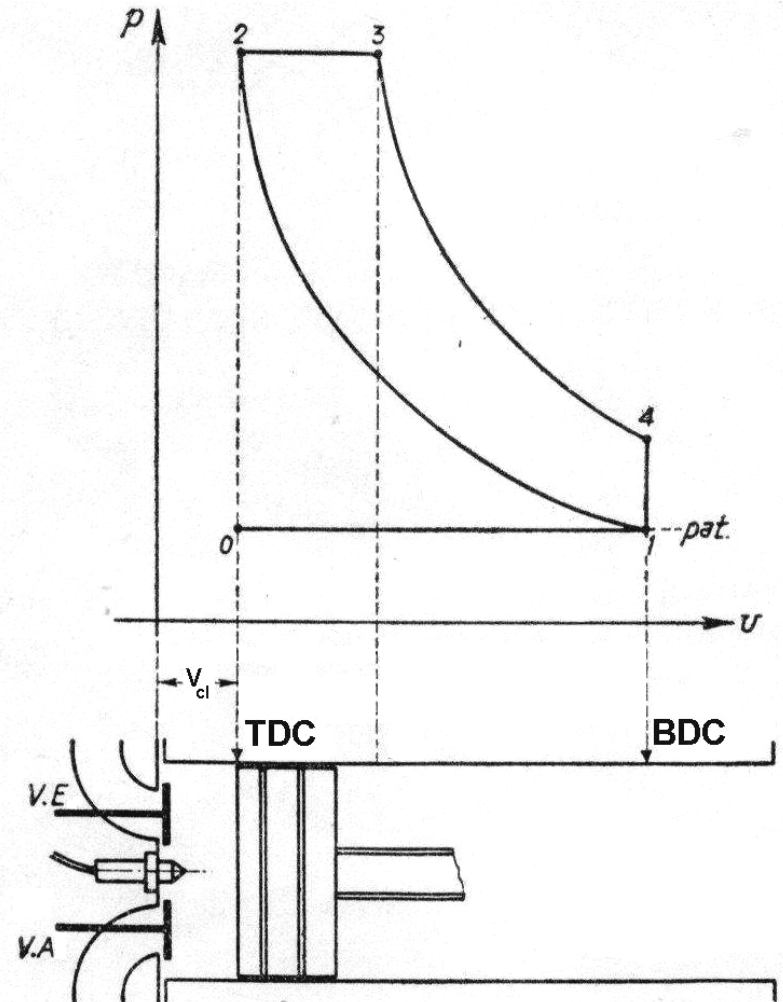
Con las válvulas cerradas el aire se comprime a una pequeña fracción. Al llegar al TDC se **inyecta** el combustible y se produce la **combustión**.

Carrera de expansión: TDC a BDC

La expansión comienza una vez que cesa la inyección hasta que el pistón pasa por su BDC, produciéndose así el torque .

Carrera de escape: BDC a TDC

Con el pistón en BDC se abre la válvula de escape, iniciándose la salida de los gases de combustión. La válvula permanece abierta hasta que el pistón llega al TDC, saliendo continuamente gases. En TDC se cierra la válvula de escape



Bond Graph

- Modelos gráficos de sistemas físicos dinámicos
- Proporcionan una simbología unificada para distintos dominios físicos
- La simbología denota la estructura física y representa fenómenos de intercambio de energía
- Proveen una metodología organizada para el desarrollo de las ecuaciones de estado

Un ejemplo simple

■ $\Sigma \Phi_R \rightarrow \Sigma \Phi_I \rightarrow BG \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} EE \\ DB \\ \text{Simulación} \end{array} \right\}$

■ Velocidad común \rightarrow Vinculo 1

■ Elementos básicos:

$S_e \rightarrow$ Fuerza

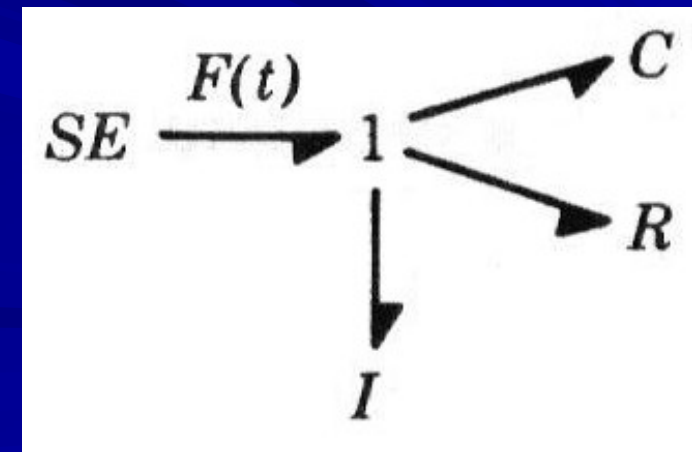
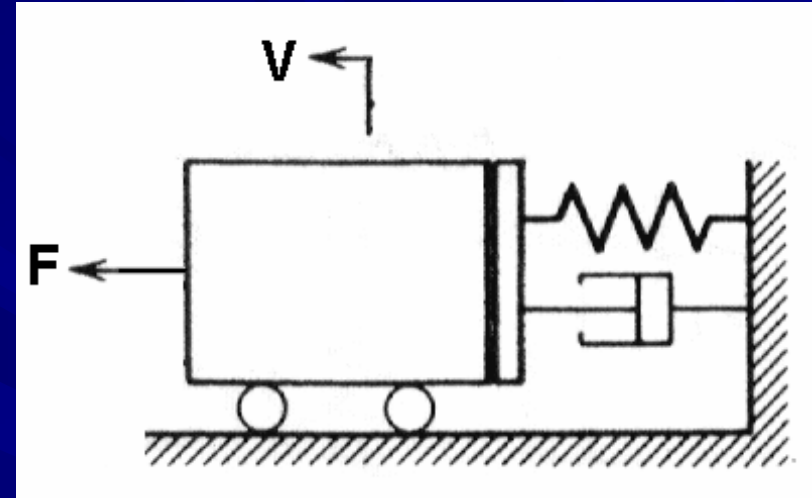
$R \rightarrow$ Amortiguador

$I \rightarrow$ Masa

$C \rightarrow$ Resorte

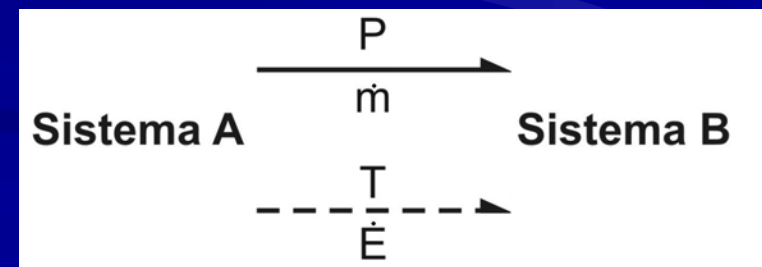
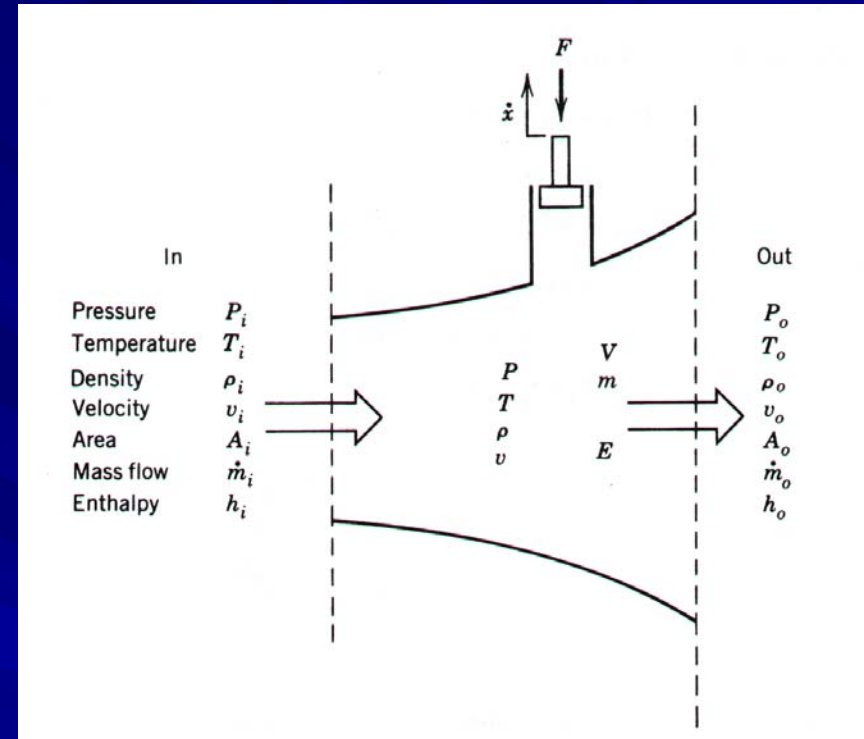
■ Variables de potencia: e, f

$P = e \cdot f \rightarrow$ Potencia en cada enlace



Pseudo Bond Graph

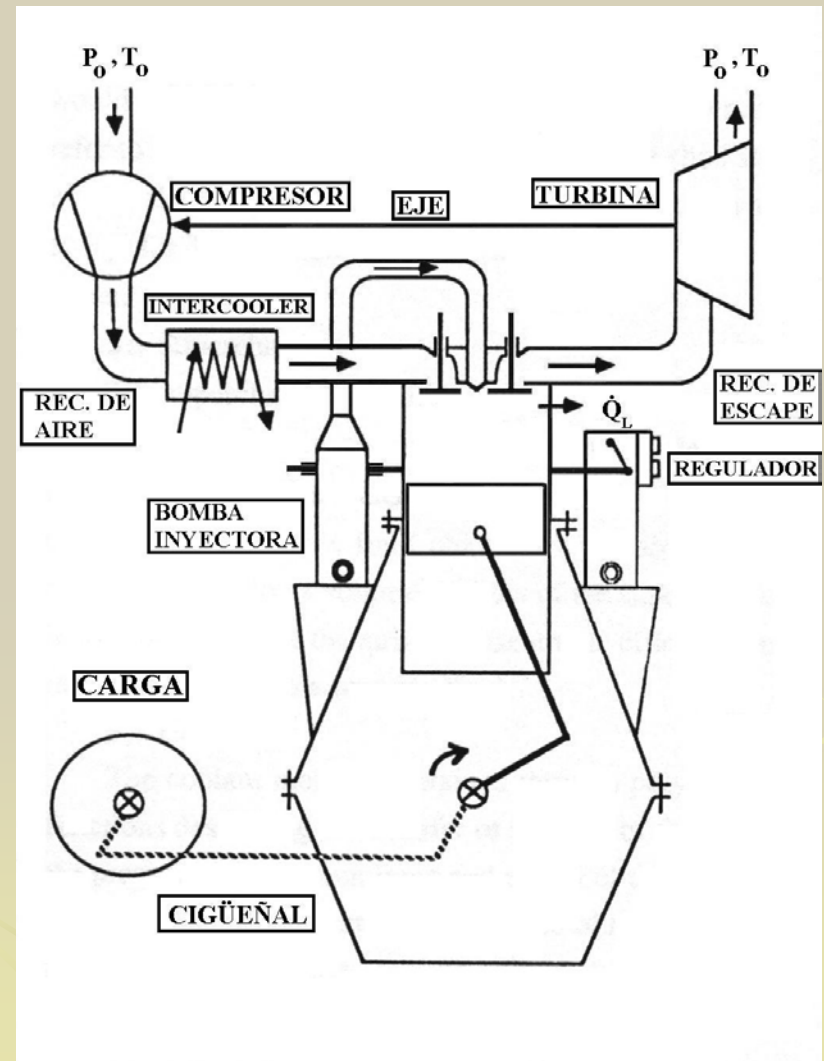
- Se usa para modelar sistemas **termofluídicos** basándose en la teoría de volumen de control (área fija definida)
- Las observaciones están hechas en un punto fijo en el espacio al pasar las diferentes partículas del fluido
- **La interacción de potencia no está dada por el producto de las dos variables (e y f)**
- Se extiende el concepto de enlace de potencia al de enlaces dobles (hidráulico y térmico)



Modelo Bond Graph del Motor Diesel Turboaspirado

Diagrama sinóptico del motor:

- El volumen del cilindro.
- Las válvulas.
- El cigüeñal, y el mecanismo biela-manivela.
- El turboalimentador.
- Los receptores de aire y escape.
- El enfriador de aire
- La bomba de combustible



Ecuaciones del volumen del cilindro

$$P = \phi_{c_1}^{-1}(\vec{q}) = \phi_{c_1}^{-1}(m, E, V) = E \frac{(\kappa - 1)}{V} \quad T = \phi_{c_2}^{-1}(\vec{q}) = \phi_{c_2}^{-1}(m, E, V) = \frac{E}{m \cdot c_v}$$

$$\dot{m} = \dot{m}_{air} - \dot{m}_{ex} + \dot{m}_f$$

$$\dot{E} = \dot{E}_{air} - \dot{E}_{ex} - \dot{Q}_L - P \cdot \dot{V} + \dot{Q}_R$$

Modelo de liberación de calor

Para caracterizar el calor de combustión y predecir el ciclo termodinámico indicado se recurre al modelo de liberación de calor de Wiebe.

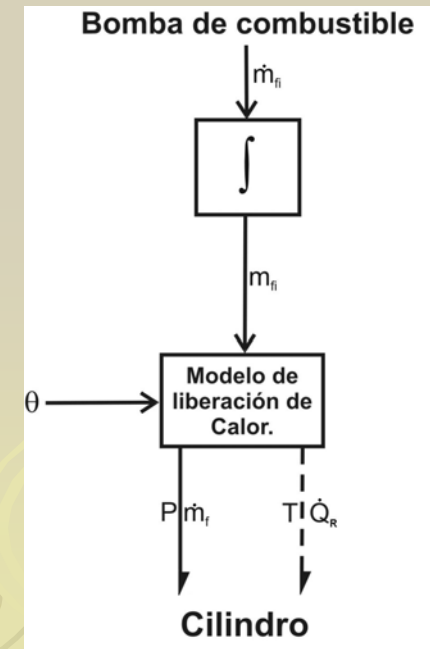
$$\dot{Q}_R = 6,9 \cdot (m + 1) \cdot Y^m \cdot e^{-6,9 \cdot Y^{m+1}} \cdot \frac{Q_R}{\Delta t_R}$$

donde $Y = \frac{\theta - \theta_c}{\Delta \theta_R}$

$$m_{fi} = \rho_f \cdot V_{fi} = \rho_f \cdot f(X, \omega_e)$$

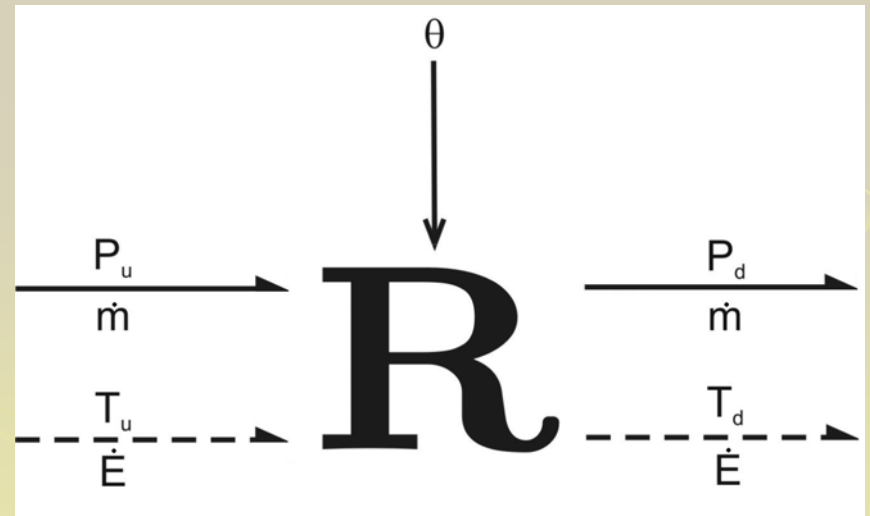
$$Q_R = h_f \cdot m_f = h_f \cdot m_{fi}$$

$$\dot{Q}_R = f_{\dot{Q}_R}(\theta, \Delta \theta_R, \Delta \theta_d, w_e, m_f, X, m, \dots)$$



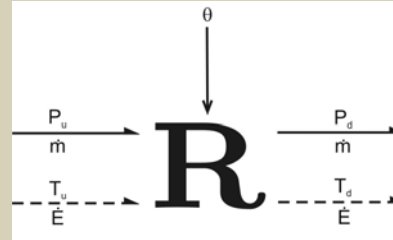
El modelo de las válvulas

- El orificio de la válvula es una restricción de flujo
- El flujo másico de un gas perfecto a través de una válvula se describe mediante ecuaciones básicas de la tobera para flujo de gas unidimensional transitorio
- La válvula se modela como un campo R tetrapuerta porque los flujos se relacionan con los esfuerzos a ambos lados de la restricción



Ecuaciones de las válvulas

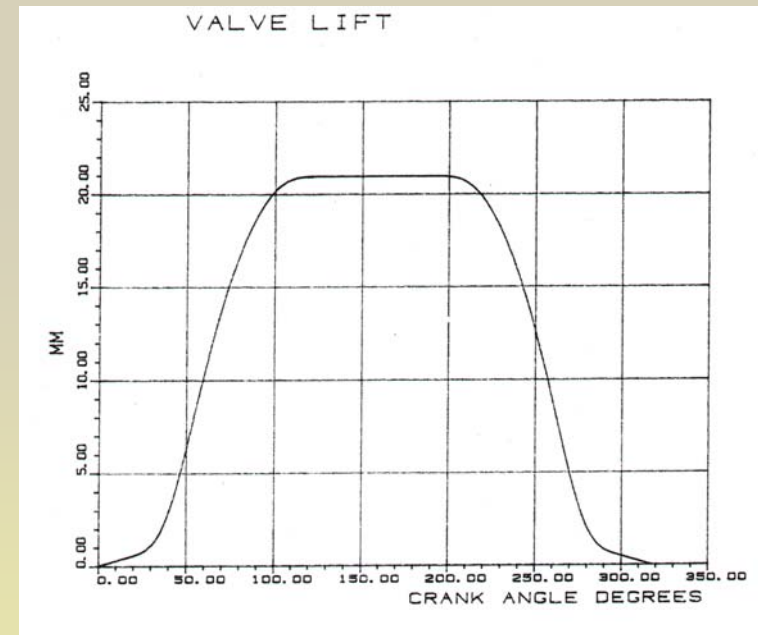
$$\vec{f} = \phi_R^{-1}(\vec{e})$$



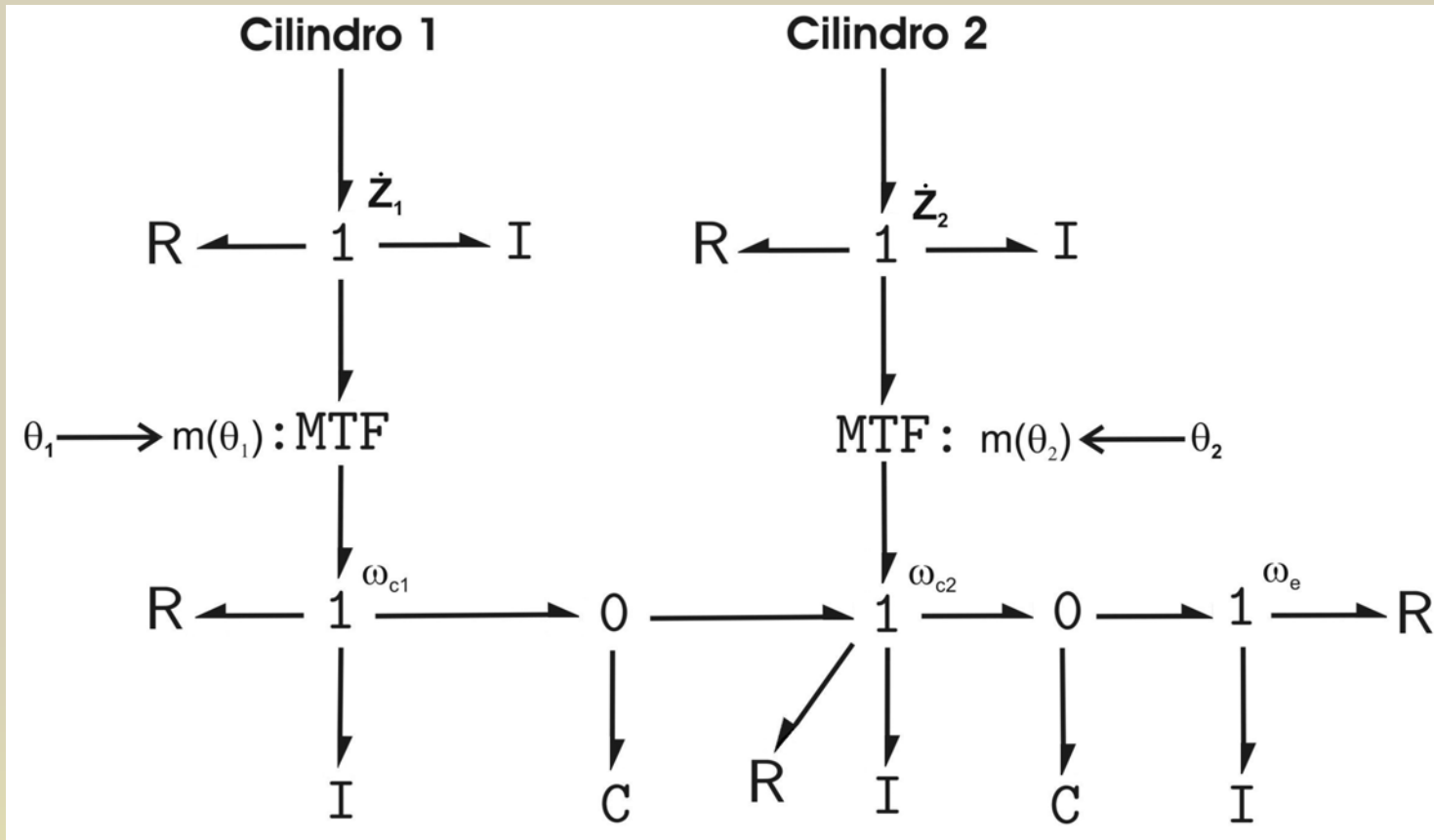
$$\dot{m} = C_D \cdot A \cdot \frac{P_u}{\sqrt{R \cdot T_u}} \cdot \psi(\pi) \quad \dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_u + T_d) + \frac{1}{2} |\dot{m}| c_p \cdot (T_u - T_d)$$

$$C_D = f_{C_D}(Y_v, D_v) \quad Y_v = f_{Y_v}(\theta)$$

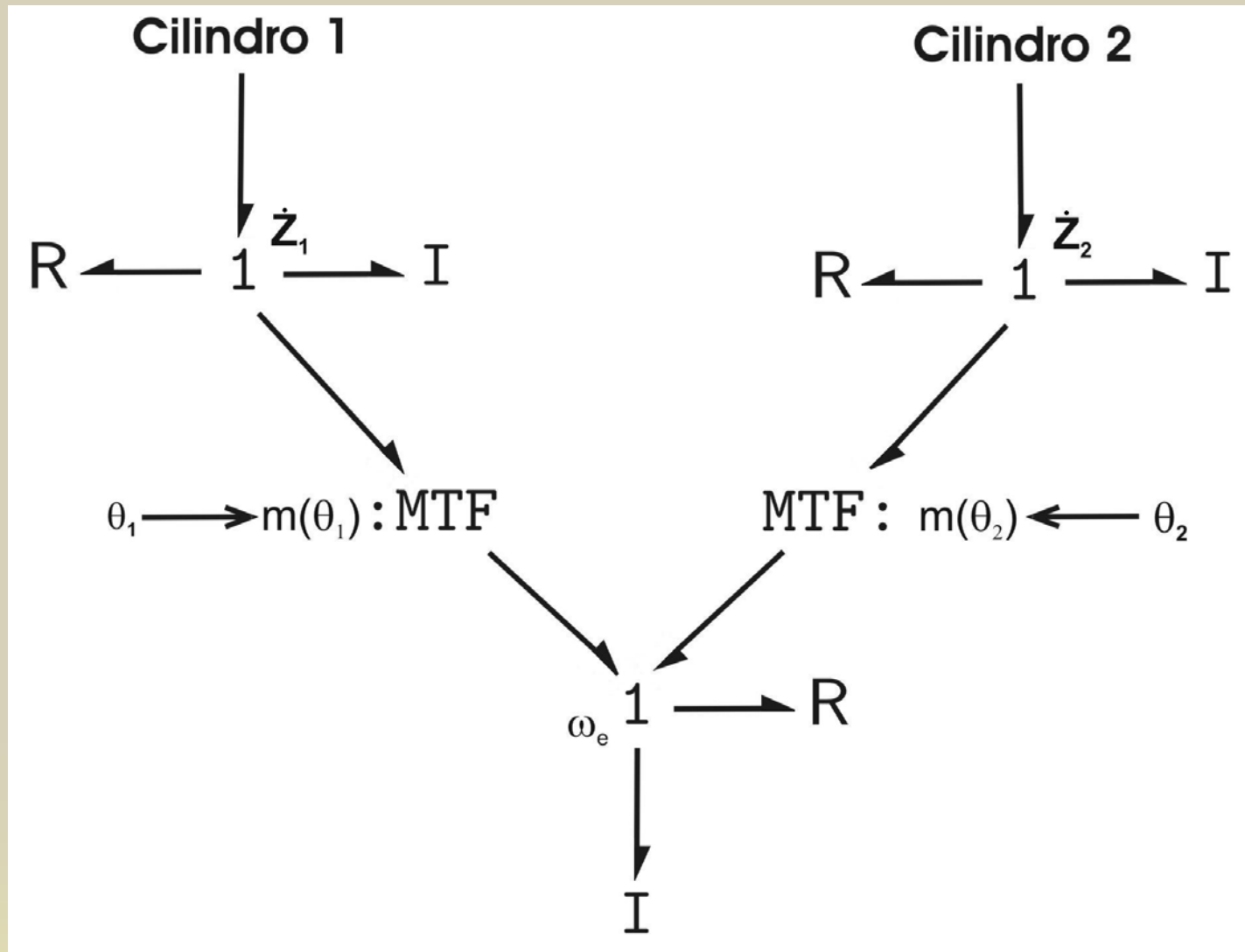
- La **alzada de válvula** es la distancia recorrida por la válvula desde la posición totalmente cerrada hasta la posición totalmente abierta



Modelos del cigüeñal y del mecanismo biela-manivela



- **Considerando elasticidad de torsión**



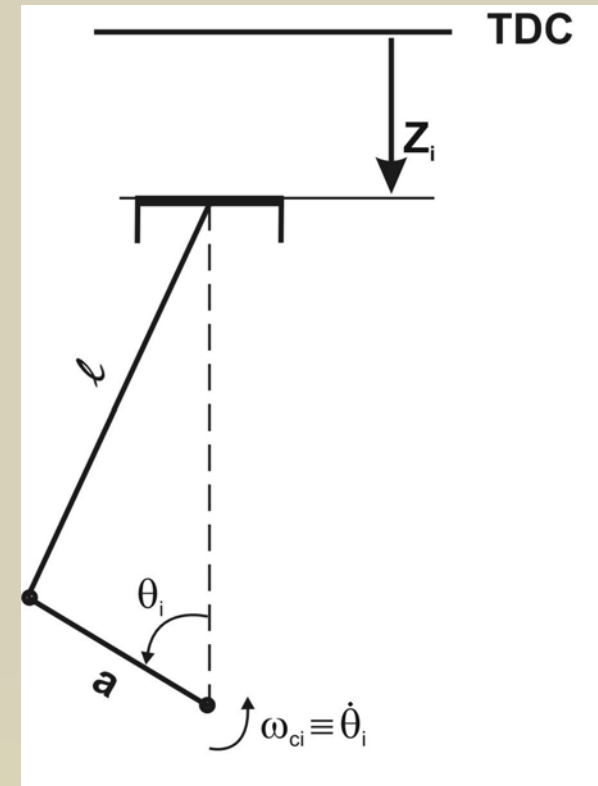
➤ **Despreciando elasticidad de torsión**

El mecanismo biela-manivela “MTF”

$$Z_i = a \cdot \left[(1 - \cos \theta_i) + \frac{1}{\lambda} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta_i} \right) \right]$$

$$\lambda = \frac{a}{l}$$

$$\dot{Z}_i = \left[a \cdot (\sin \theta_i) + \frac{a \cdot \lambda \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \theta_i}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta_i}} \right] \cdot \dot{\theta}_i$$



$$V_i = V_{cl} + A_p \cdot a \cdot \left[1 - \cos \theta_i + \frac{1}{\lambda} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta_i} \right) \right]$$

Descripción del turboalimentador

- Consiste principalmente de dos componentes: ***la turbina y el compresor***
- El propósito es aumentar la masa de aire atrapada en los cilindros elevando la densidad del aire. Esto permite más combustible para quemar, consiguiendo de esta manera el incremento de la potencia de salida del motor.
- Nuestro modelo, se basará en los mapas de performance conjuntamente con la termodinámica común.

Modelo de la turbina

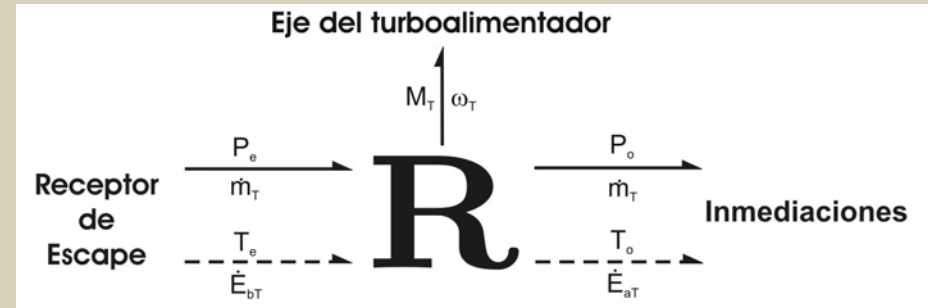
$$\dot{m}_T = C_{DT} \cdot A_T \cdot \frac{P_e}{\sqrt{R \cdot T_e}} \cdot \psi \left(\frac{P_e}{P_o} \right)$$

$$M_T = \frac{\dot{m}_T \cdot \Delta h_{IT} \cdot \eta_{IT}}{\omega_T}$$

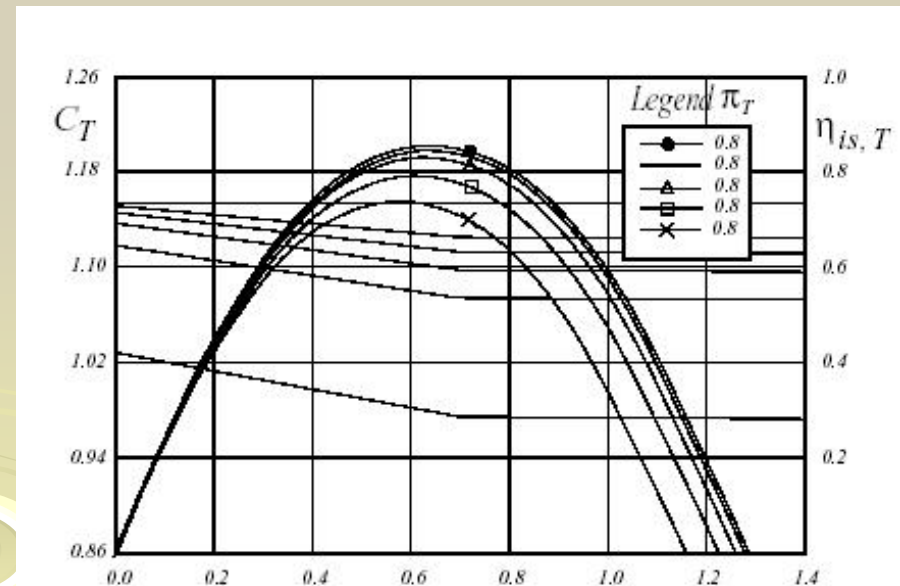
$$\dot{E}_{bT} = \dot{E}_{aT} + M_T \cdot \omega_T$$

$$\eta_{IT} = MAP_{IT} \left(\pi_T, \frac{u}{c_o} \right)$$

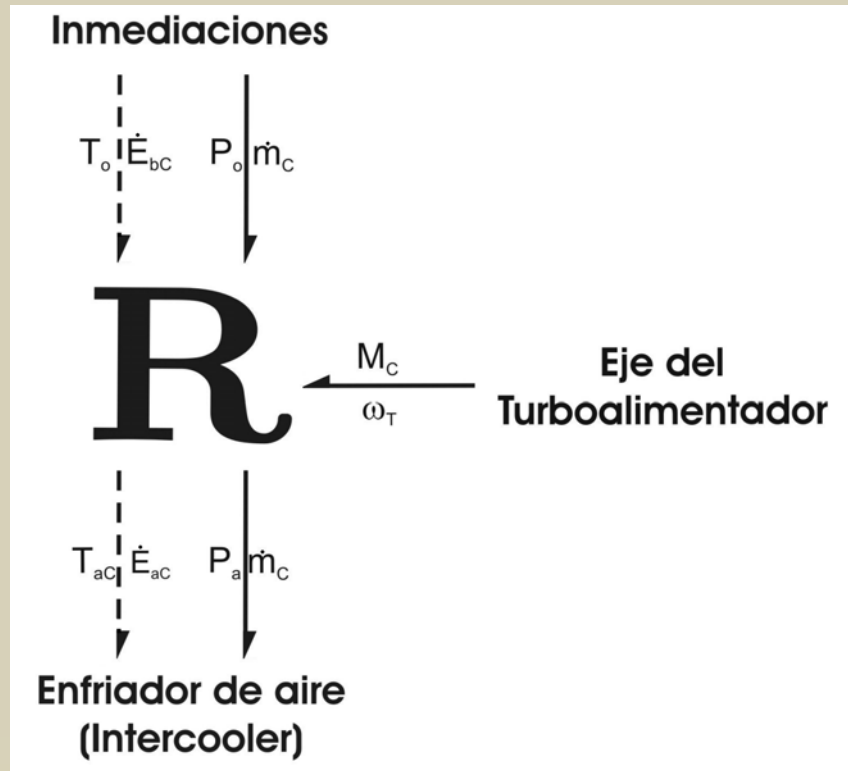
$$C_{DT} = MAP_{C_{DT}} \left(\pi_T, \frac{u}{c_o} \right)$$



- La turbina puede ser considerada como un divisor de flujo de energía



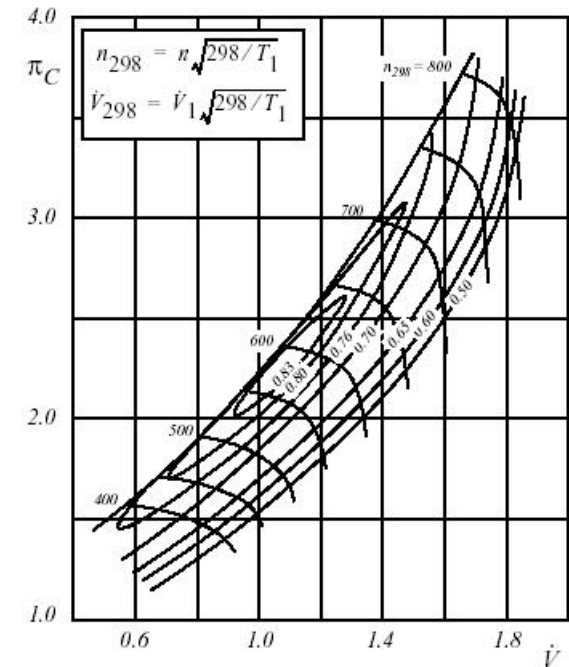
Modelo del compresor



$$M_C = \frac{\dot{m}_C \cdot \Delta h_{IC} \cdot \eta_{VC}}{\eta_{IC} \cdot \omega_C}$$

$$T_{aC} = T_o \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{IC}} \left[\left(\frac{P_a}{P_o} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \right\}$$

$$\pi_c = \frac{P_a}{P_o}$$



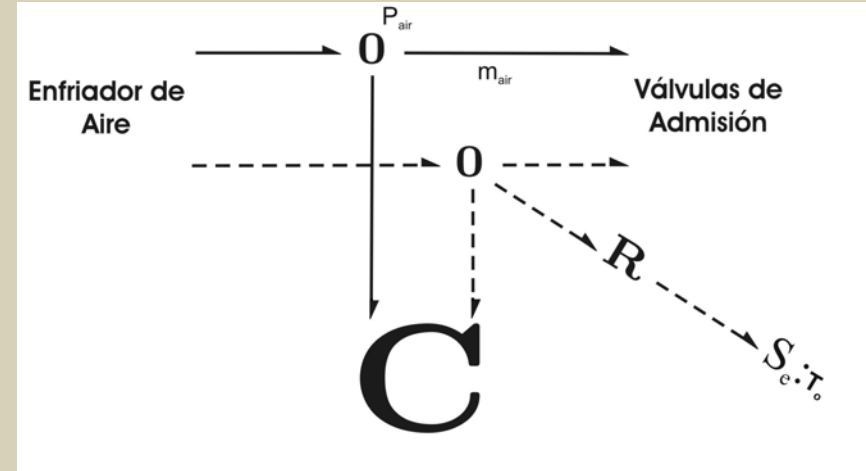
$$\dot{m}_C = \rho_u \cdot MAP_{\dot{m}_C}(\omega_C, \pi_C)$$

$$\eta_{IC} = MAP_{\eta_{IC}}(\omega_C, \pi_C)$$

Modelos de los receptores

Receptor de aire.

- Todos los volúmenes entre el enfriador de aire y la válvula de admisión son representadas por un único volumen equivalente.
- Este volumen se asume constante y a una única presión y temperatura, en cualquier instante.



$$P_a = \frac{E_a \cdot (\kappa - 1)}{V_a} \quad ;$$

Receptor de escape.

- El volumen del receptor de escape representará entonces a todos los volúmenes entre la/s válvula/s de escape y la turbina

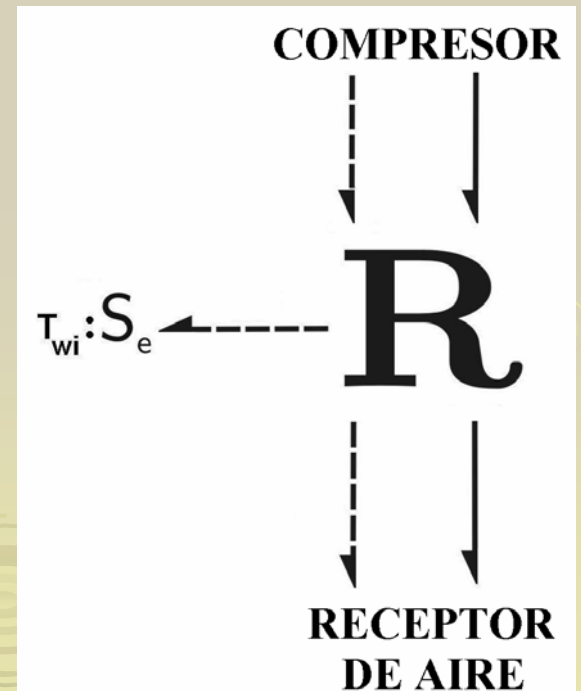
$$T_a = \frac{E_a}{m_a \cdot c_v}$$

Modelo del Enfriador de aire

- Es un intercambiador de calor y se representa por un campo R-Pentapuerta
- La rama horizontal representa el flujo de calor desde el aire hacia el agua de refrigeración y la rama vertical es el flujo de energía hacia el receptor de aire

$$\dot{E}_{aac} = \dot{E}_{aC} - \dot{Q}_{AW}$$

$$\dot{Q}_{AW} = \frac{(T_{AC} - T_{Wi})}{\left(\frac{1}{2 \cdot \dot{m}_C \cdot c_p} + \frac{1}{U \cdot A} + \frac{1}{2 \cdot \dot{m}_W \cdot c_w} \right)}$$



Modelo de la bomba de combustible

$$m_{fi} = \rho_f \cdot V_{fi} = \rho_f \cdot f(X, \omega_e)$$

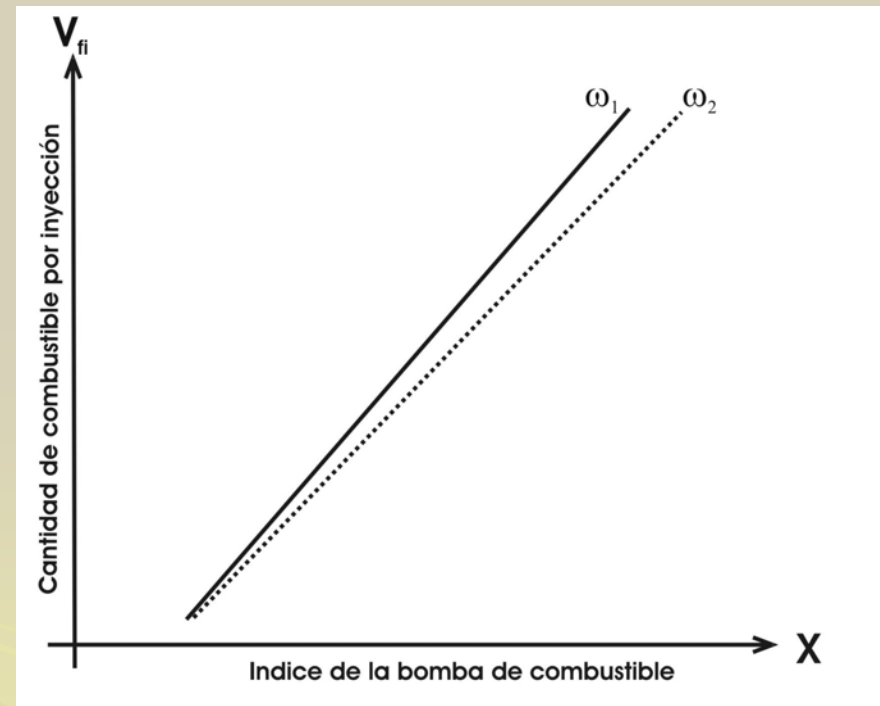
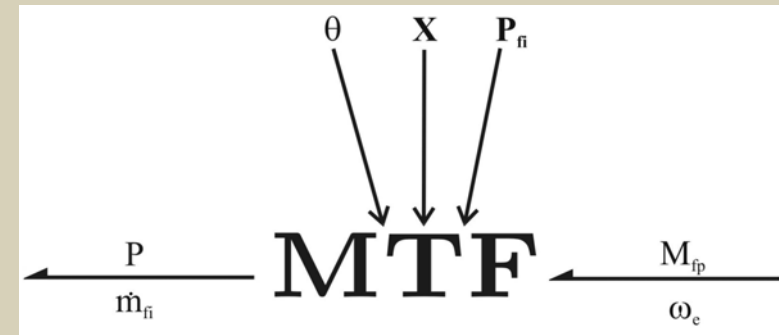
$$\dot{m}_{fi} = \frac{m_{fi} \cdot \omega_e}{2}$$

- Si se supone **combustión completa**, el calor liberado durante la combustión será:

$$Q_R = h_f \cdot m_f \equiv h_f \cdot m_{fi}$$

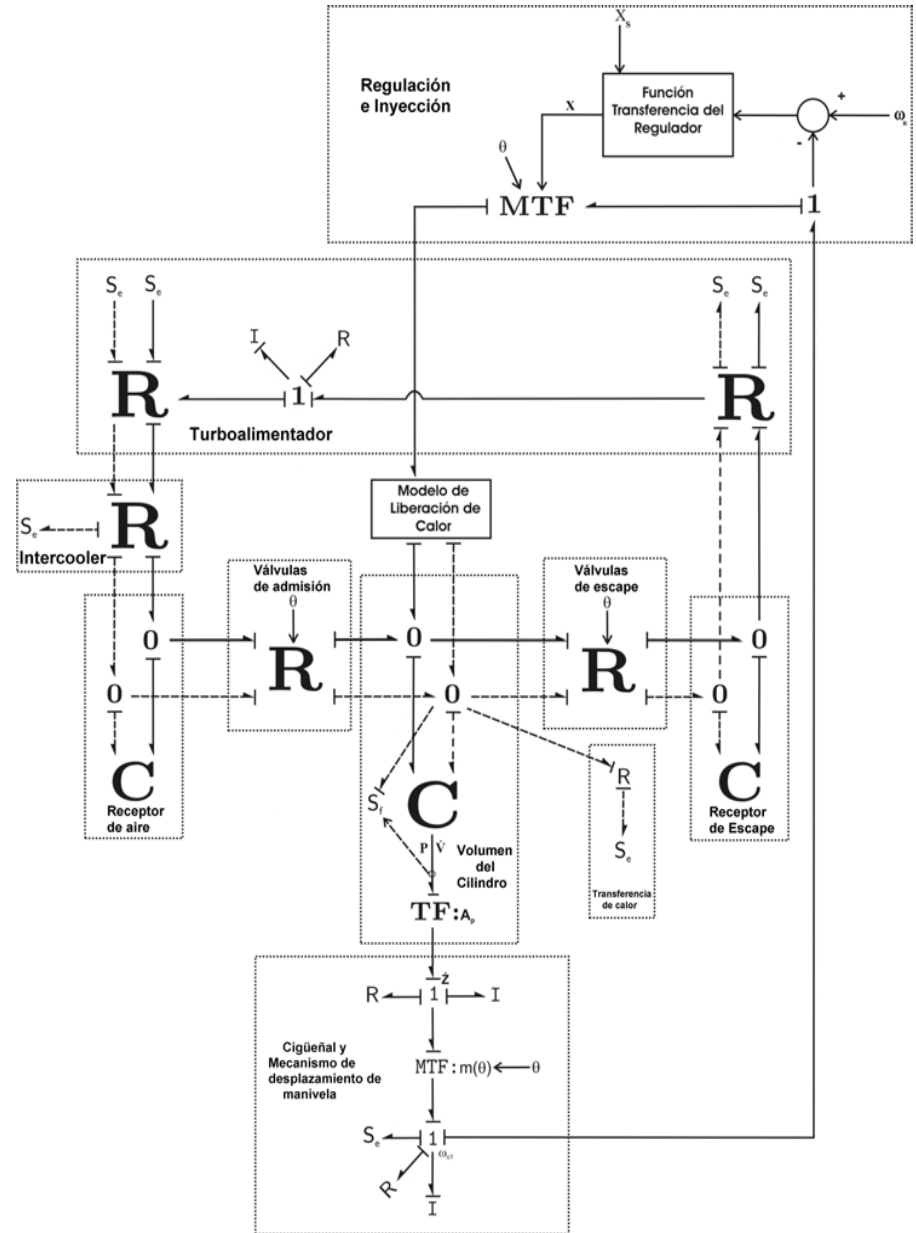
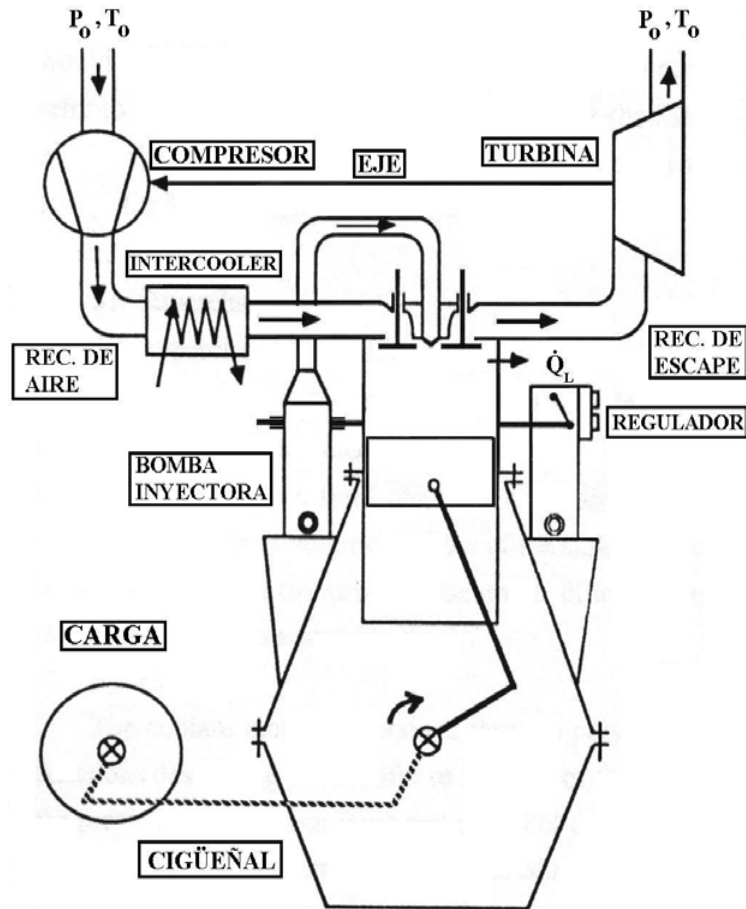
$$\dot{m}_f = \dot{m}_{fi}$$

- h_f : es el poder calorífico inferior del combustible.



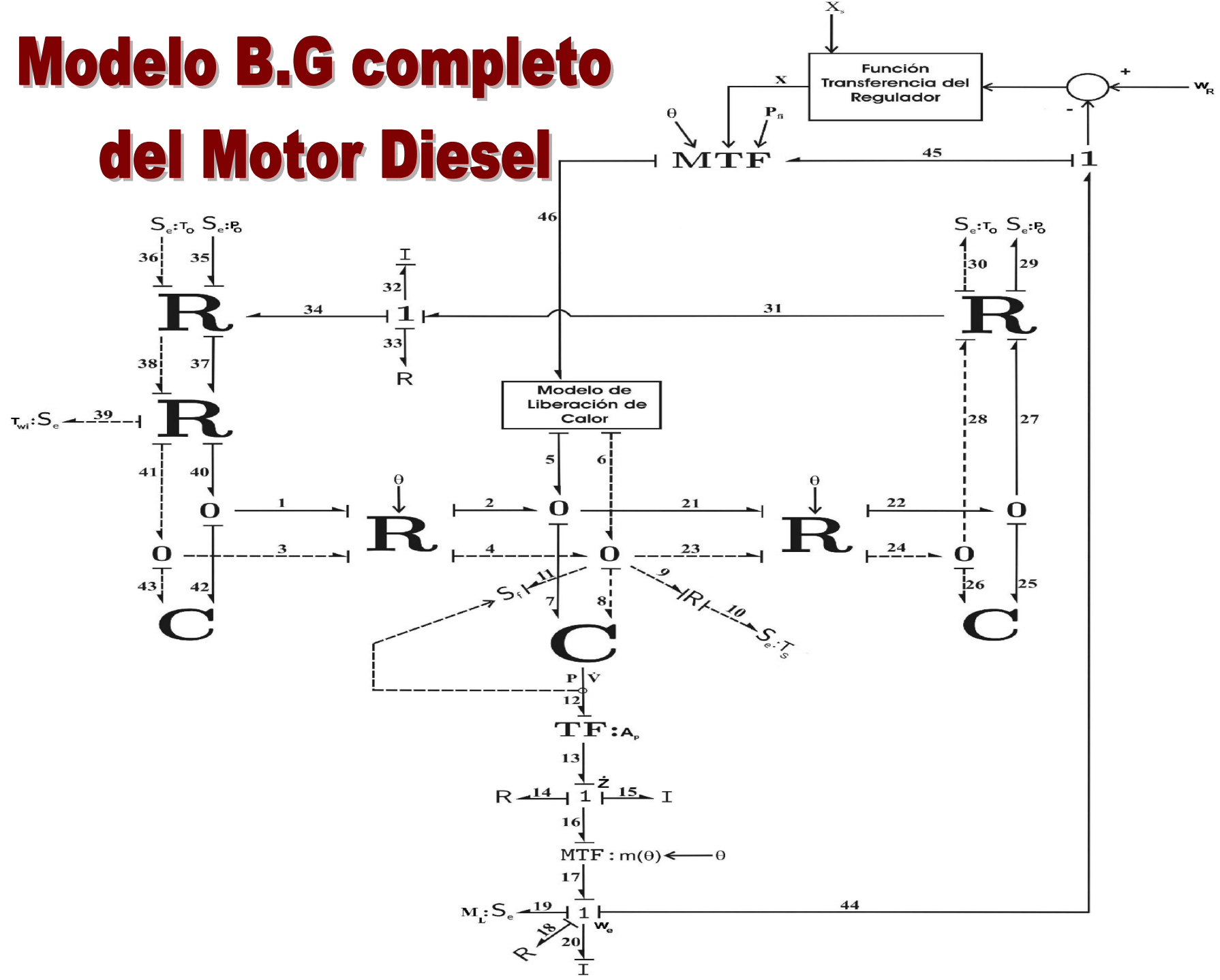
Caracterización de la bomba de combustible

Sistema Físico – Bond Graph

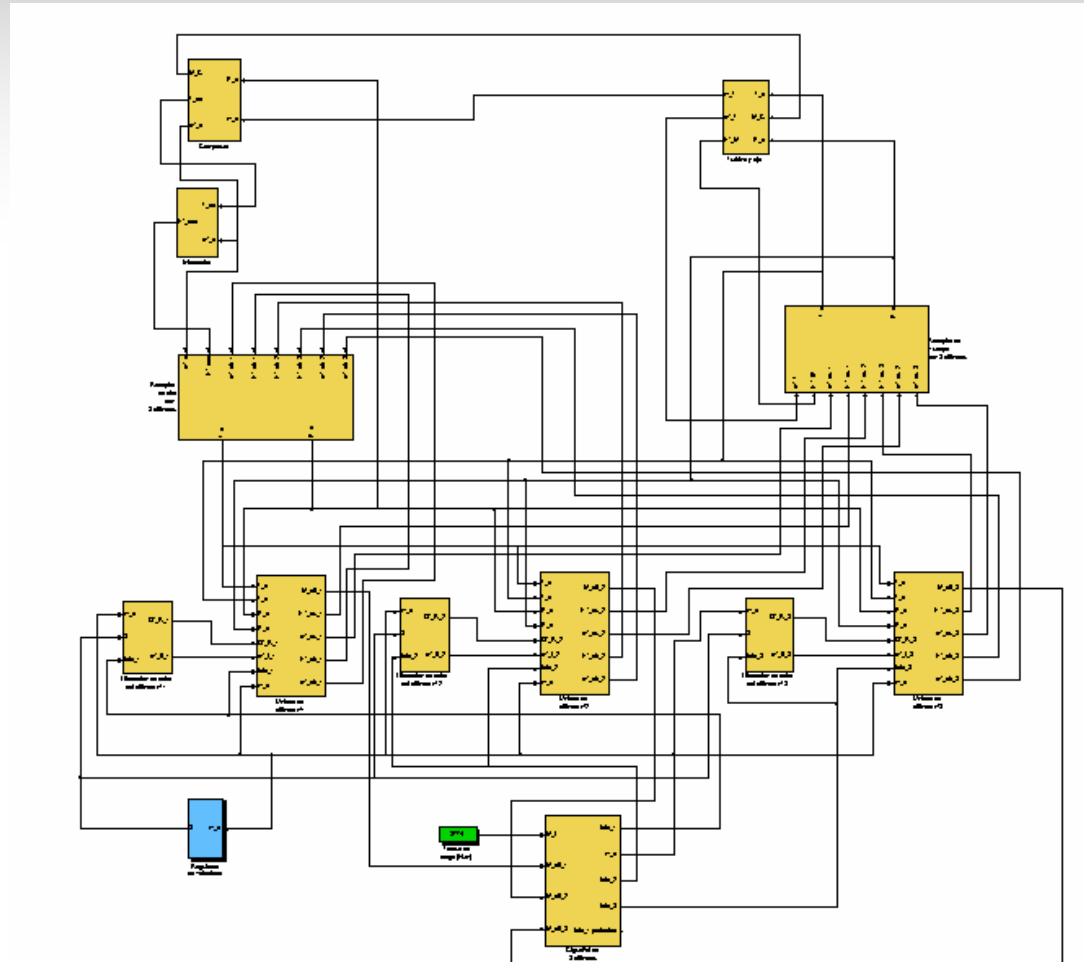


Modelo B.G completo

del Motor Diesel

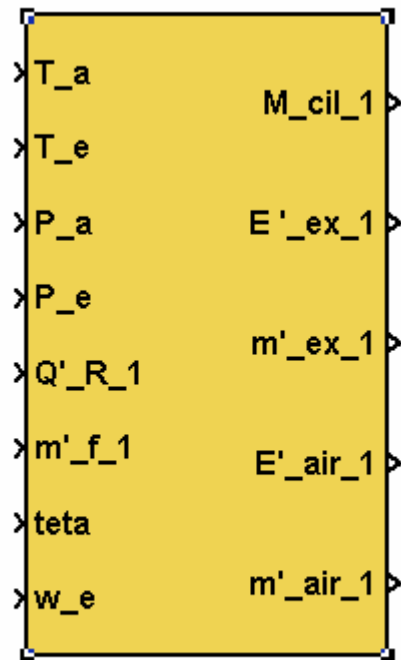


D.B Simulink usados en la simulación

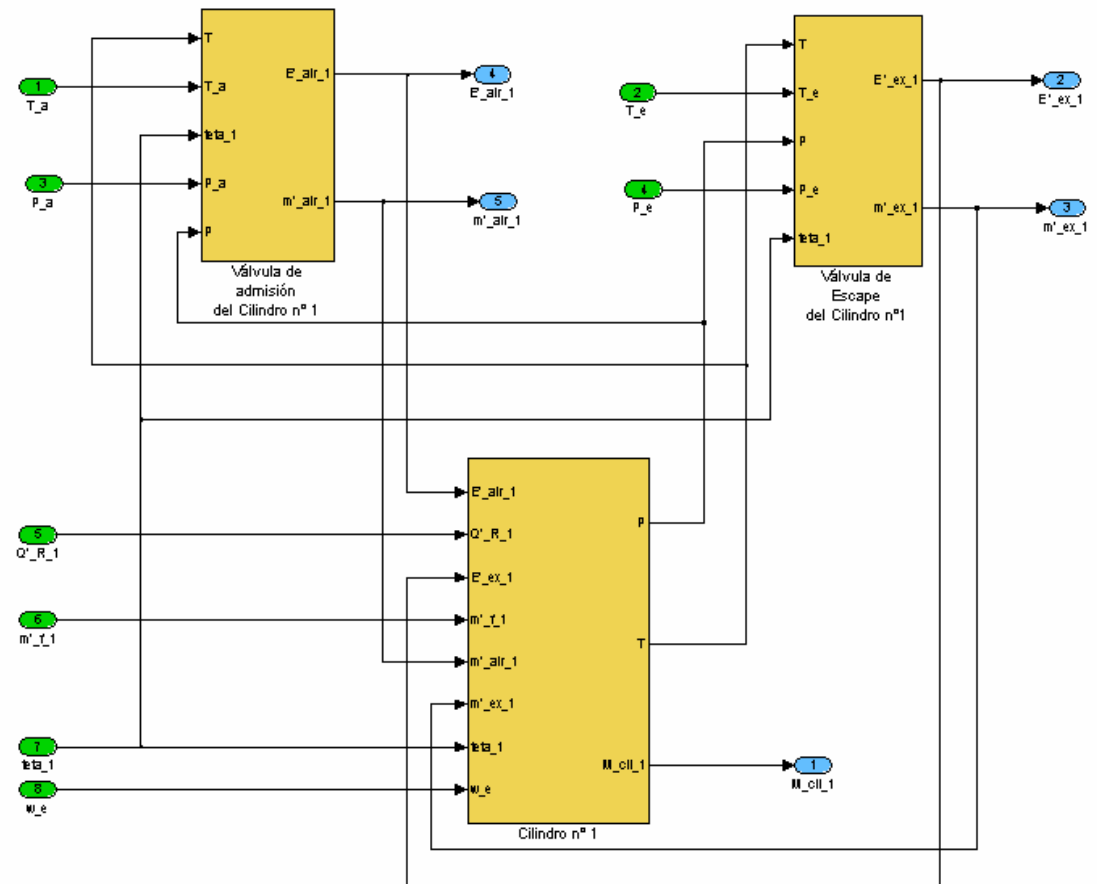
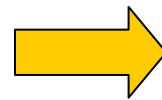


DB Simulink del motor diesel completo.

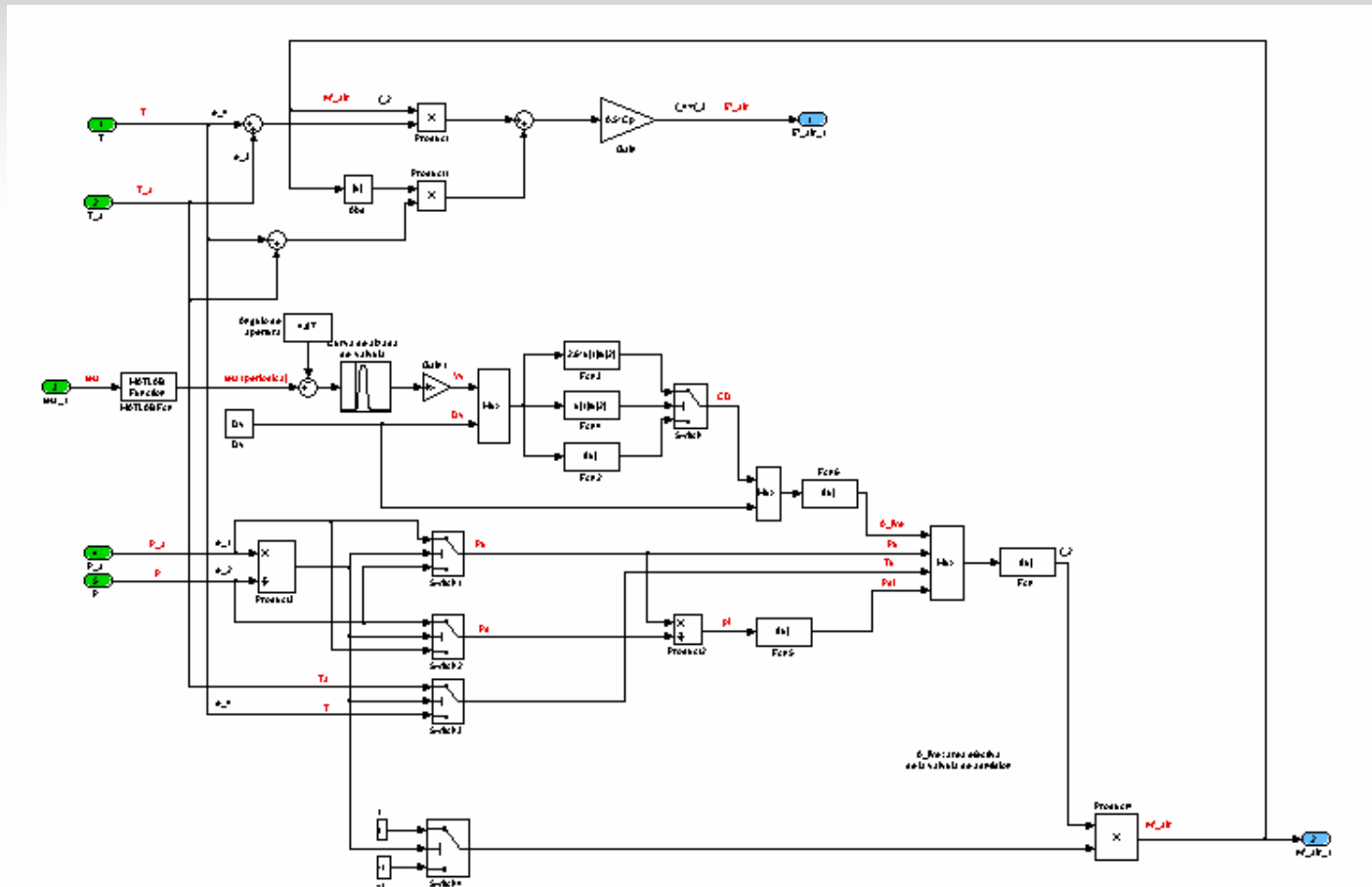
Subsistema Unidad de cilindro "1"



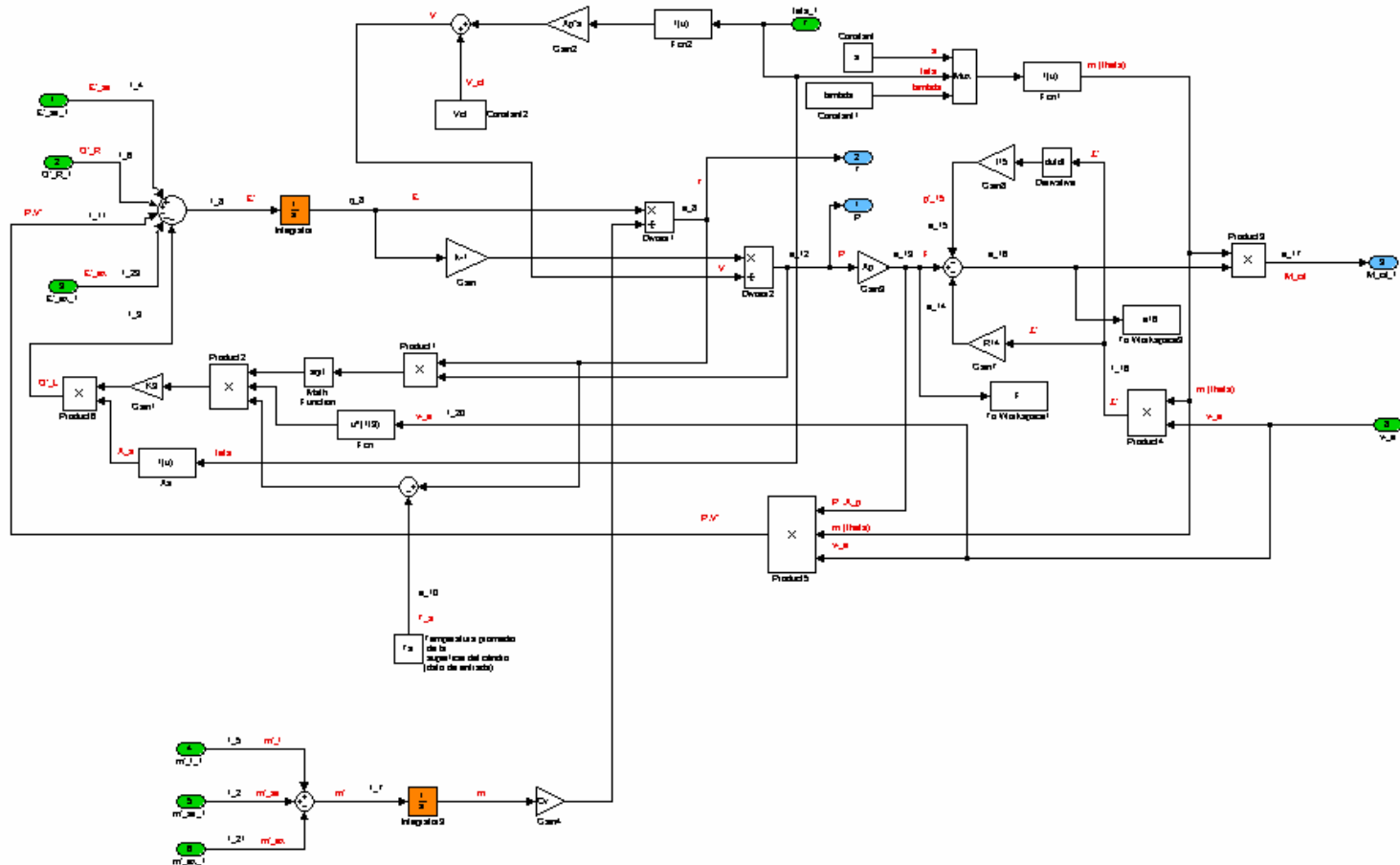
Unidad de cilindro n°1



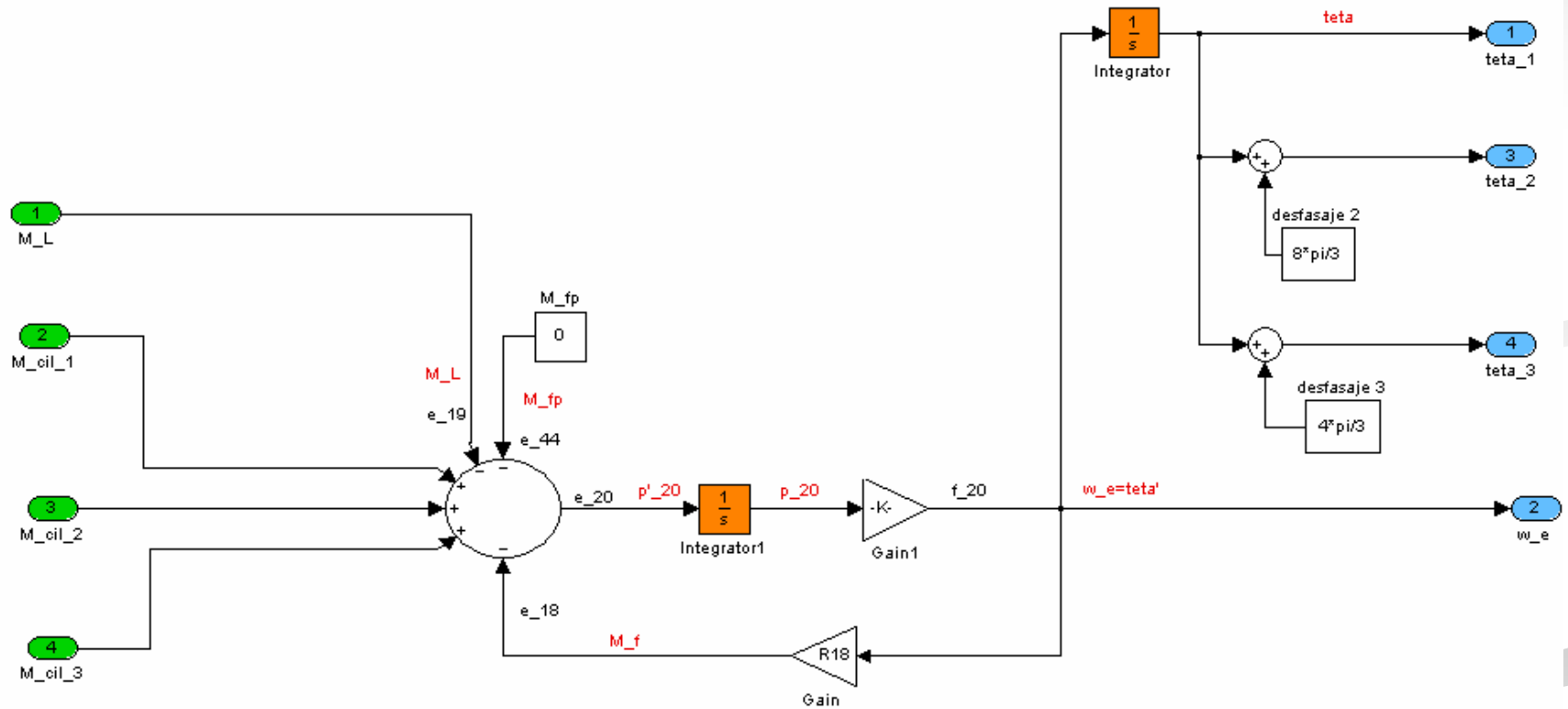
Modelo de la Válvula de Admisión



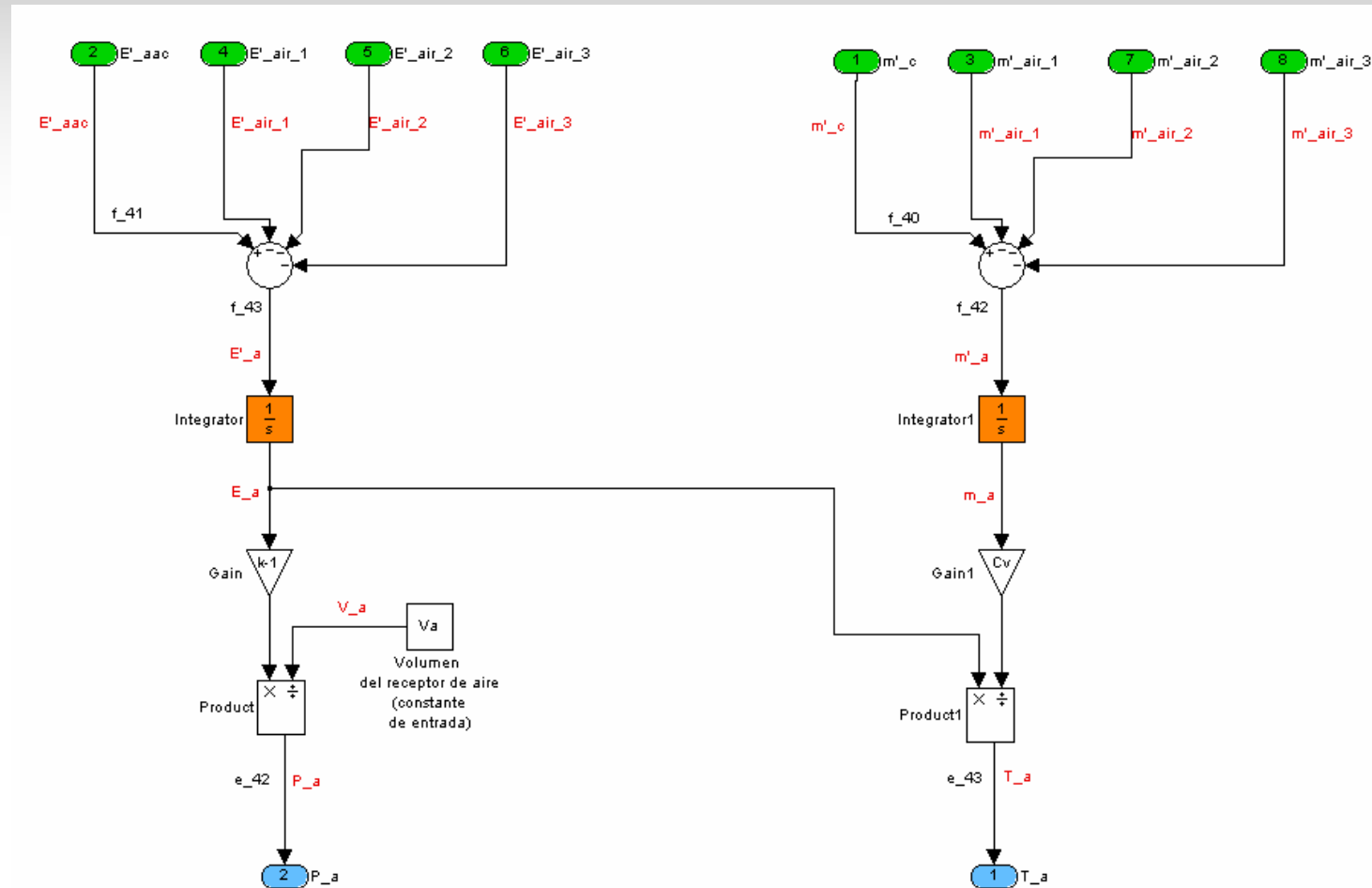
Modelo del cilindro "i"



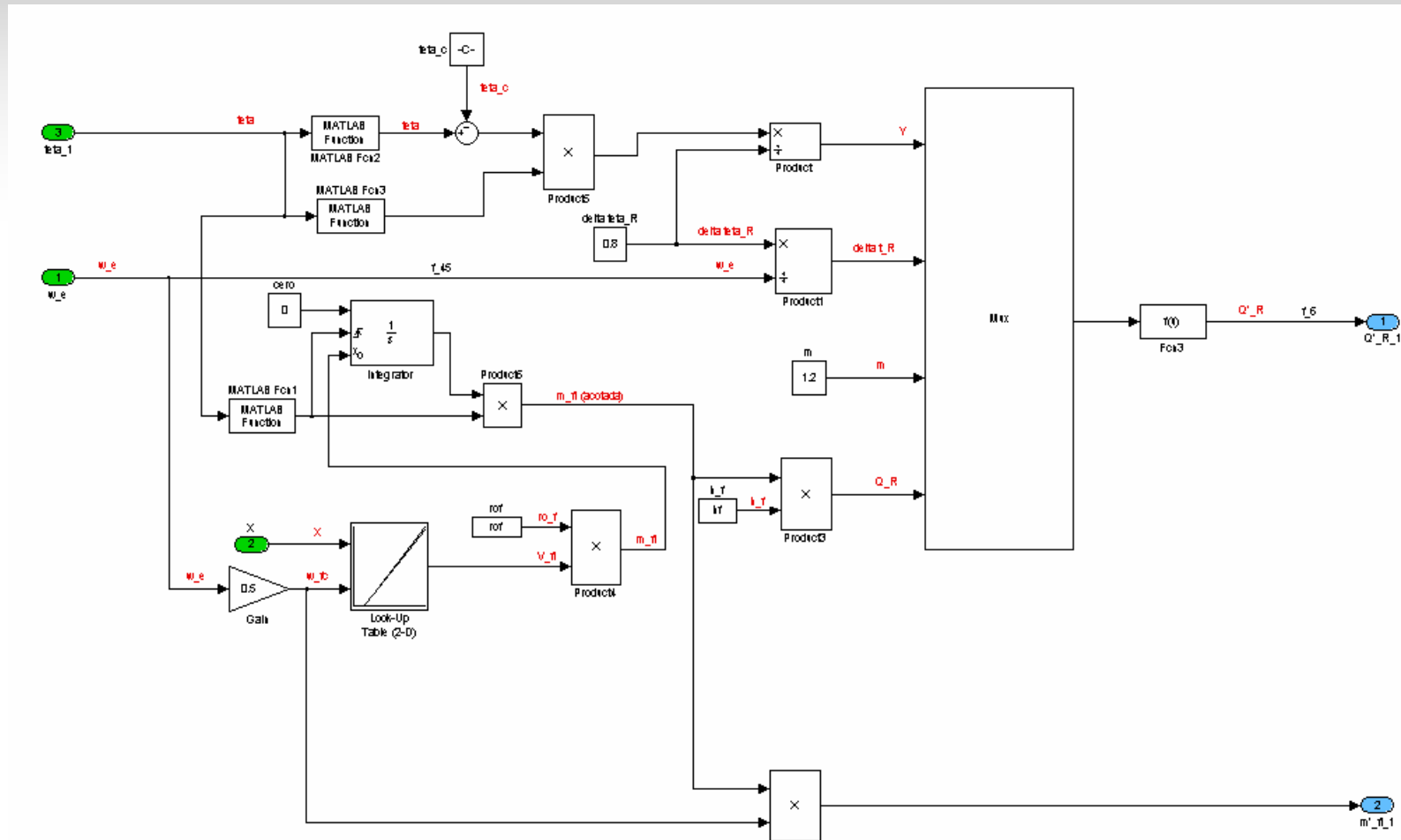
Modelo del Cigüeñal



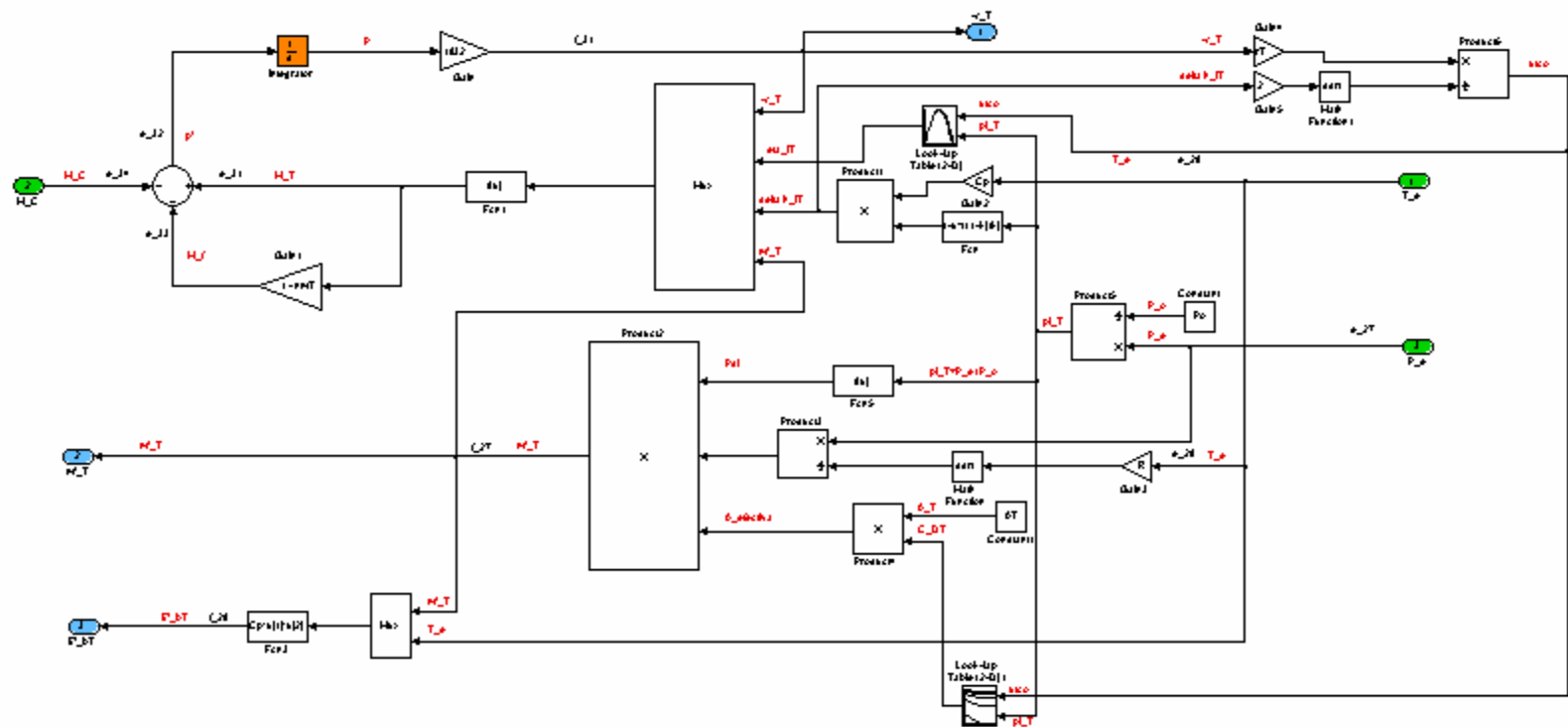
Modelo del Receptor de aire



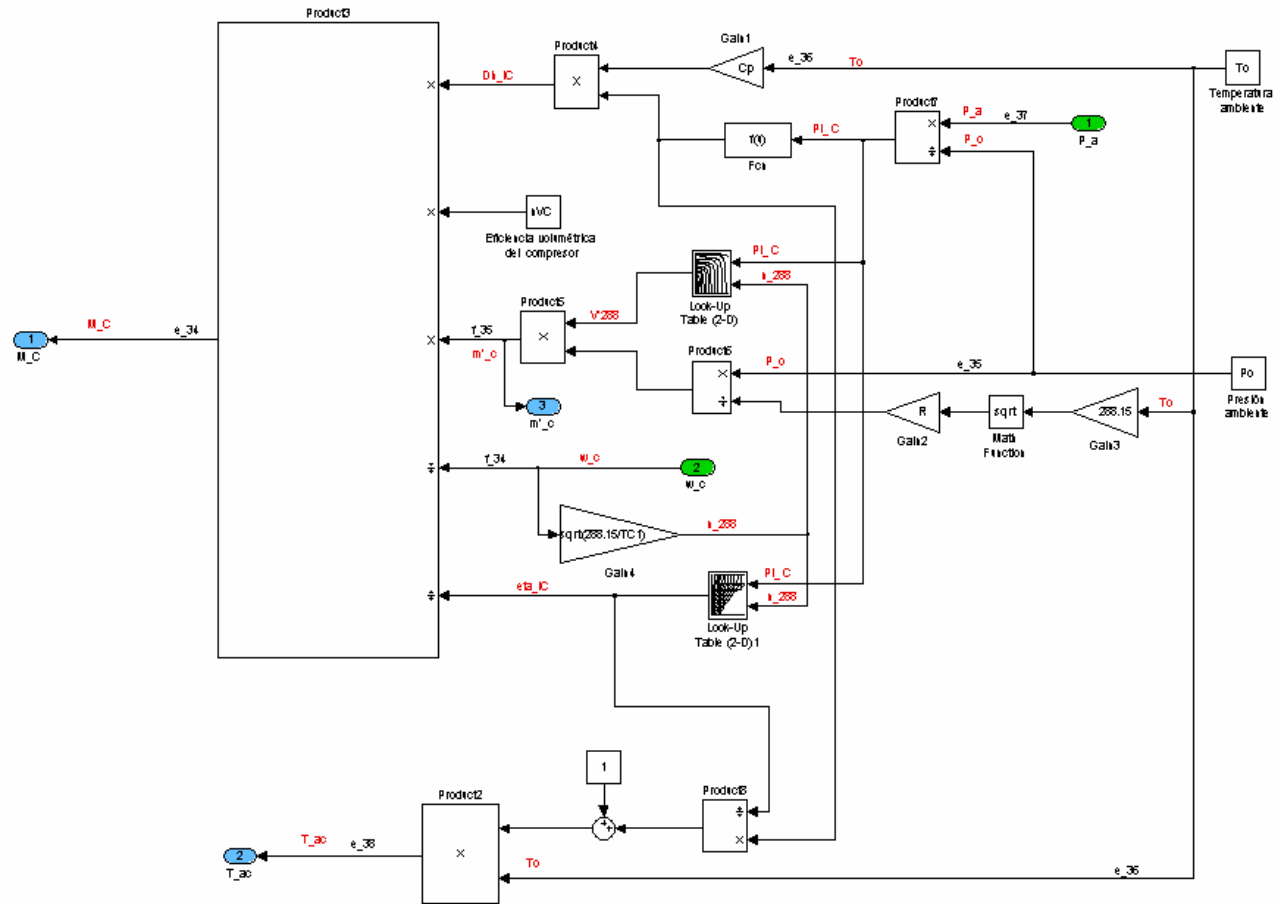
Modelo de liberación de Calor



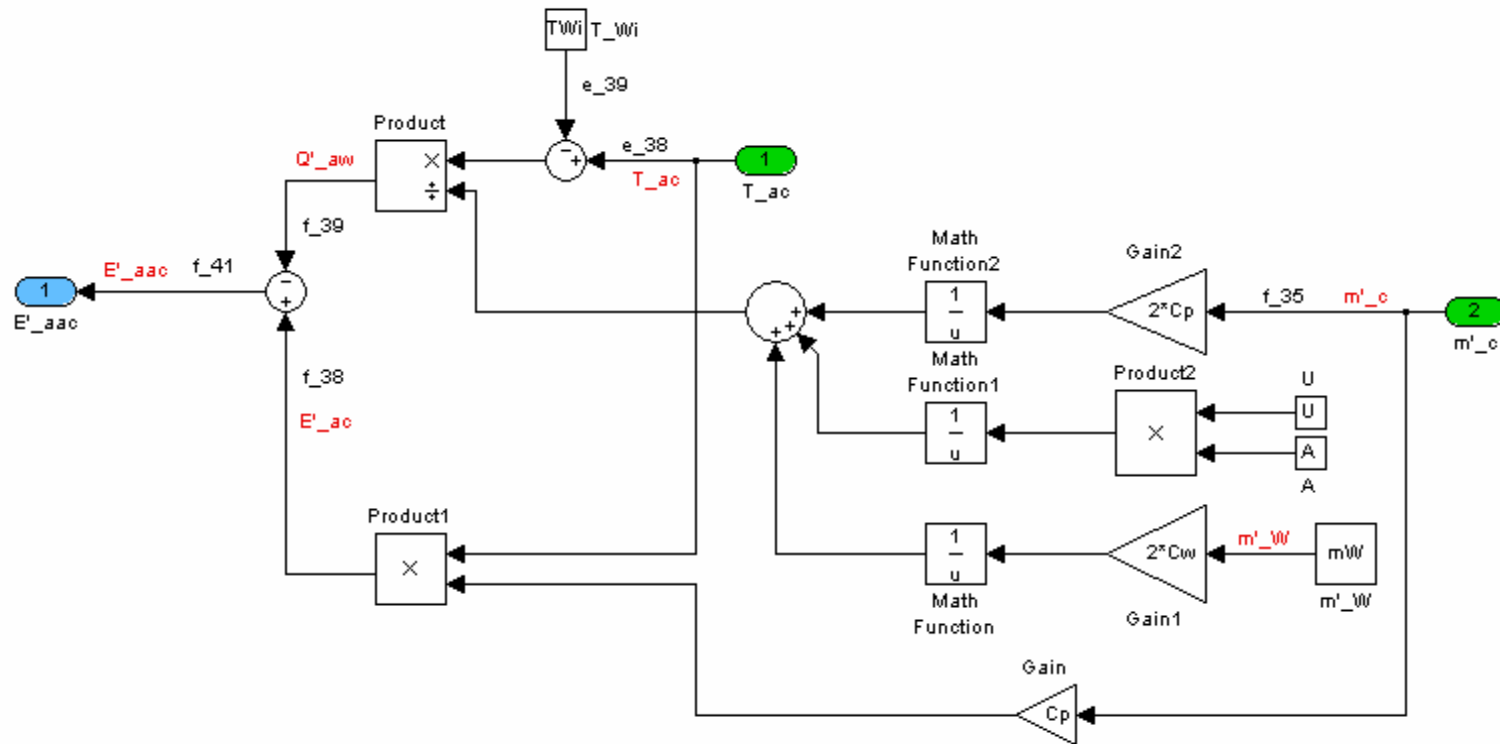
Modelo de la turbina y eje del turboalimentador



Modelo del compresor



Modelo del Enfriador de Aire

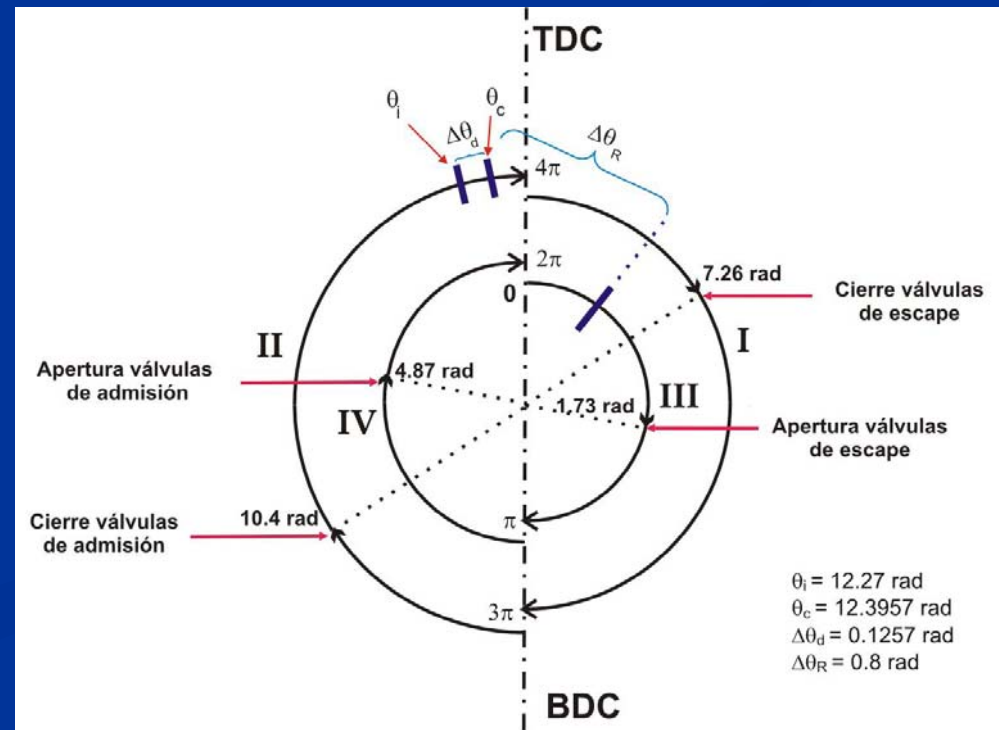


Simulación

- Motor BERGEN DIESEL KRG-3
- Turbocompresor BBC VTR161, fabricado por Brown Boveri Ltd.; Switzerland.

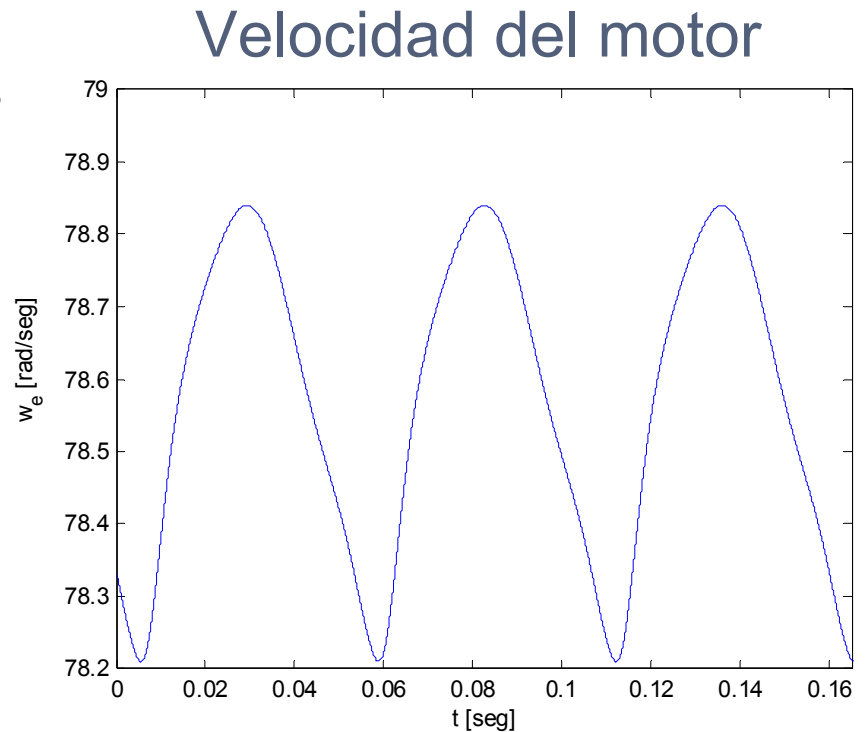
Datos generales

- Carrera del pistón: $L = 300 \text{ mm}$
- Diámetro del cilindro: $B = 250 \text{ mm}$
- Relación de biela: $\lambda = 0.238$
- Relación de compresión: $rc = 12.5$
- Secuencia de encendido: 1 - 3 - 2

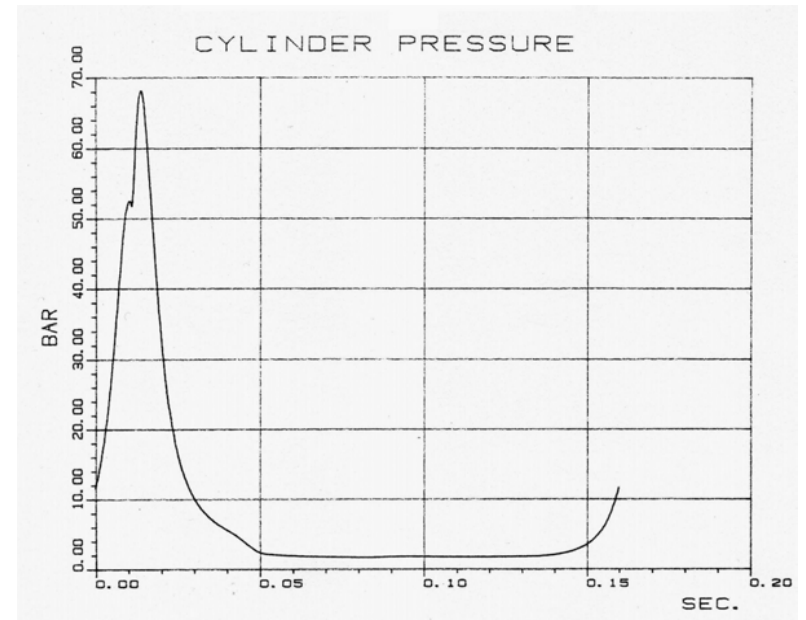
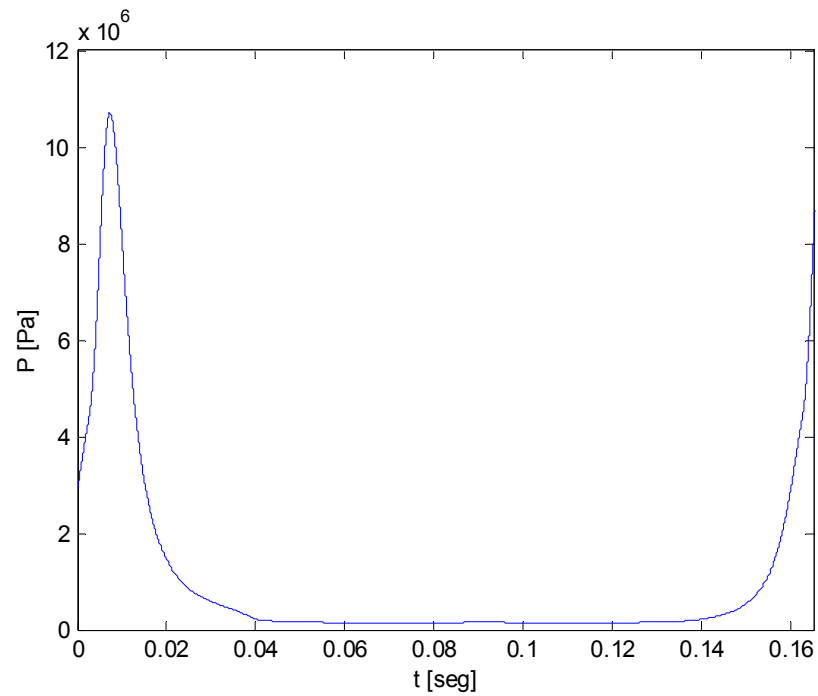


Simulación estacionaria

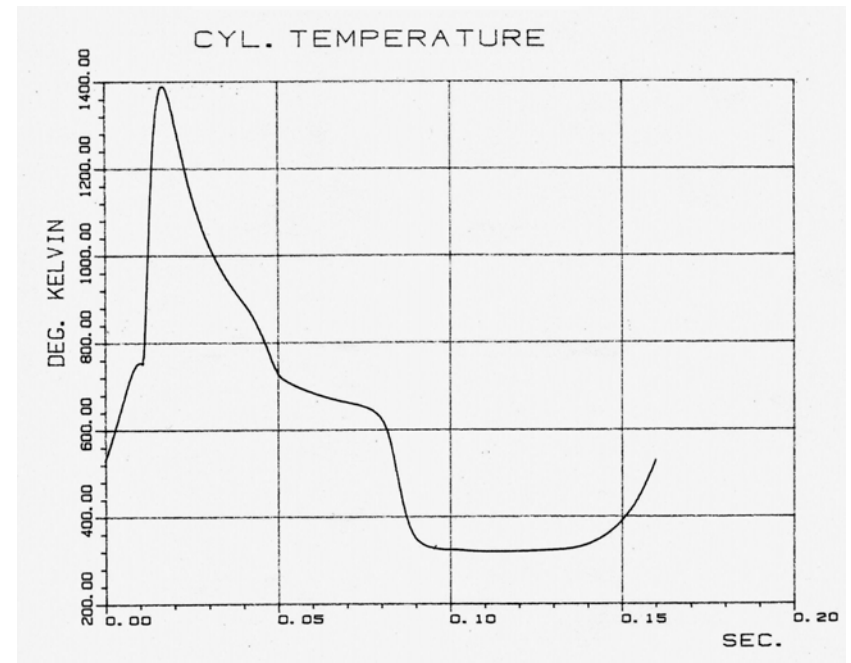
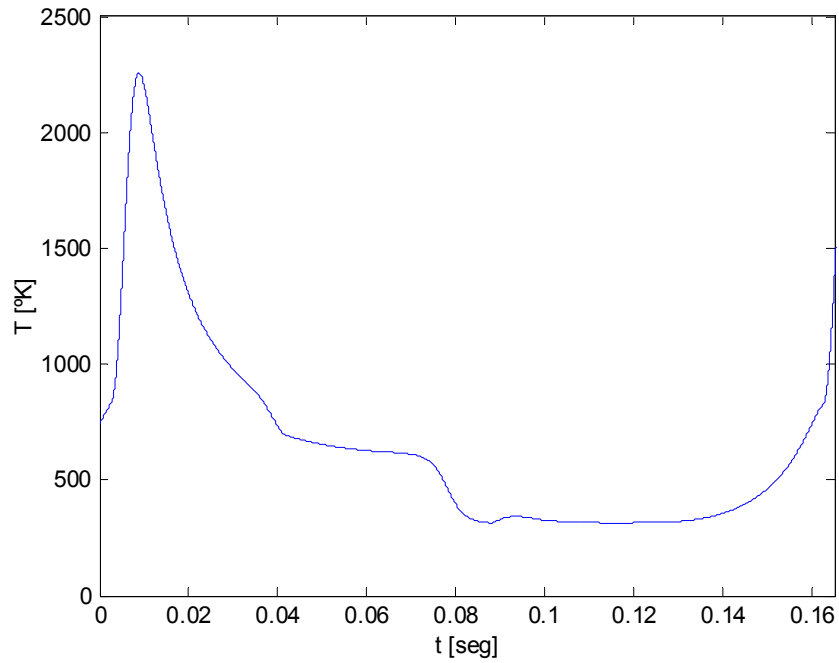
- Las figuras siguientes muestran los resultados de simulación para un torque de carga constante del motor, y un índice estacionario de la bomba de combustible. La velocidad del motor oscila en torno a los 78.5 rad/s (750 rpm).



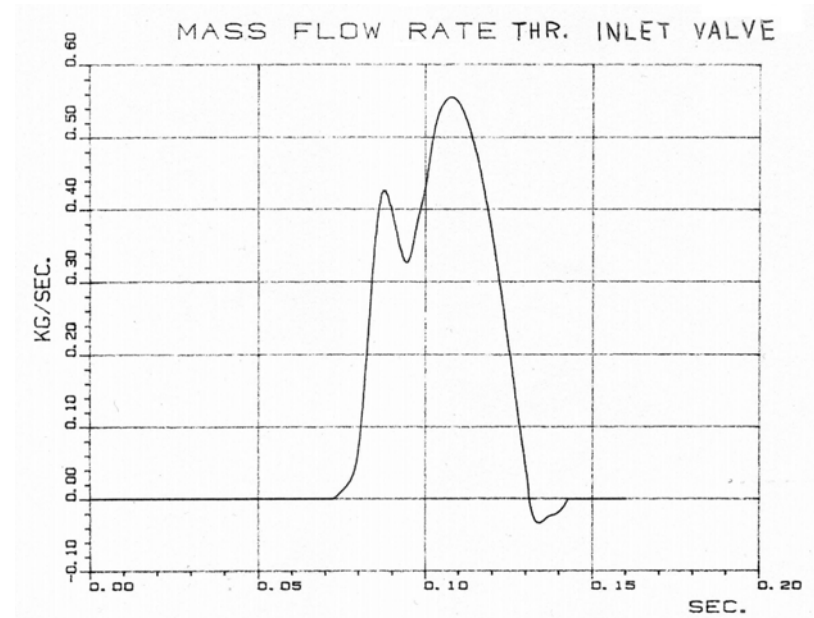
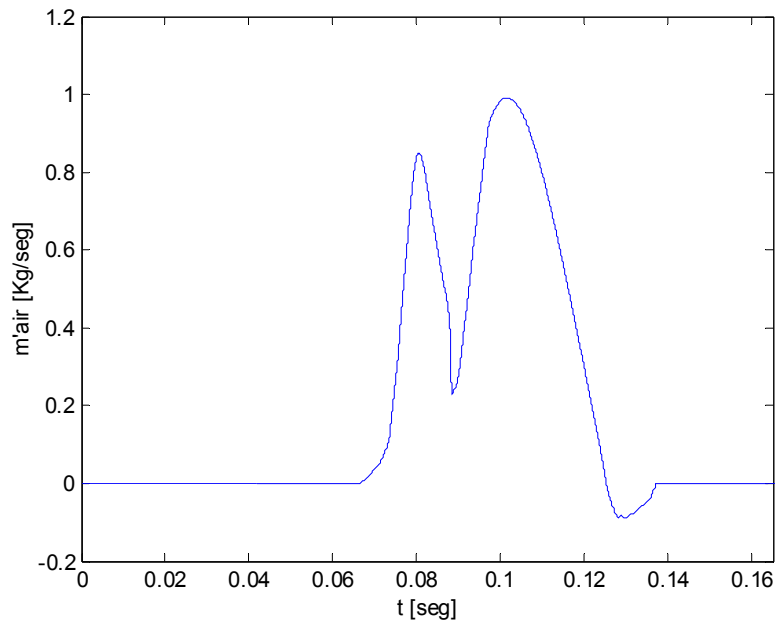
Presión en el cilindro



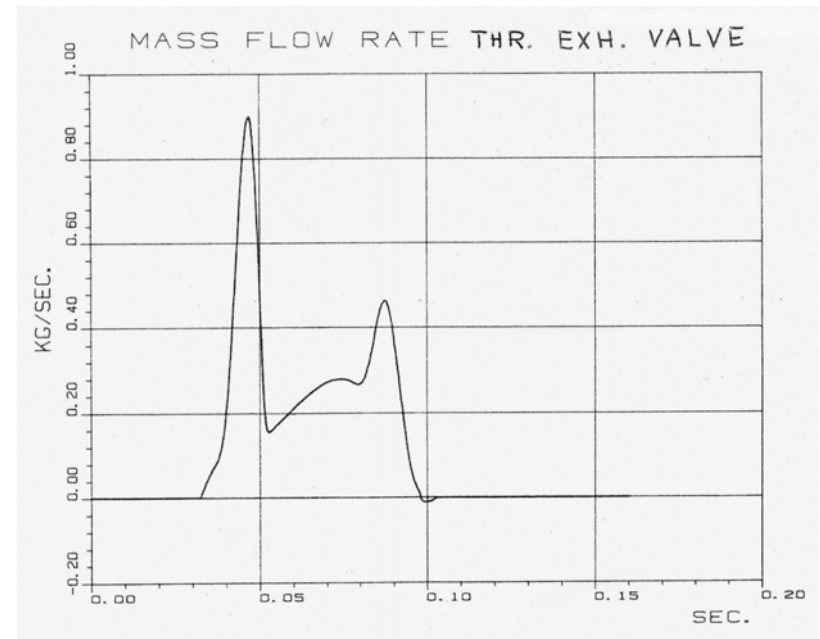
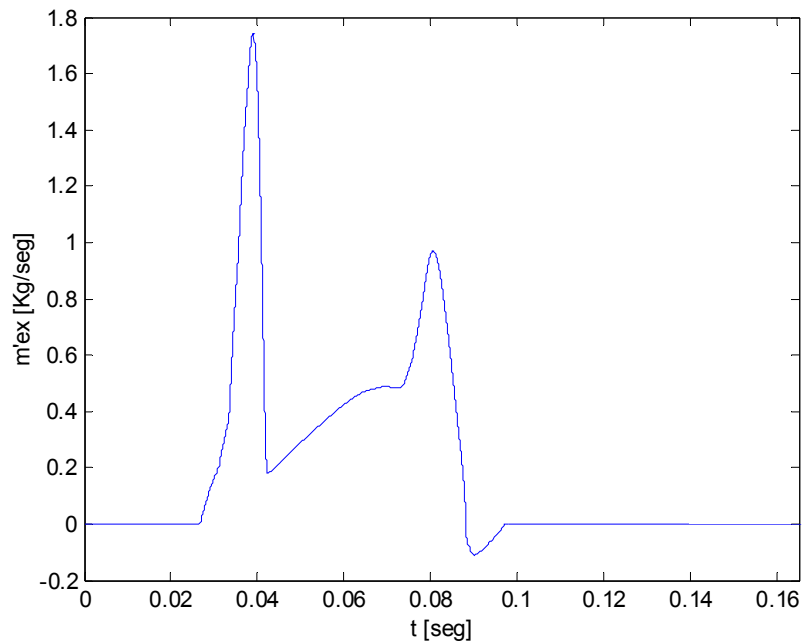
Temperatura en el cilindro



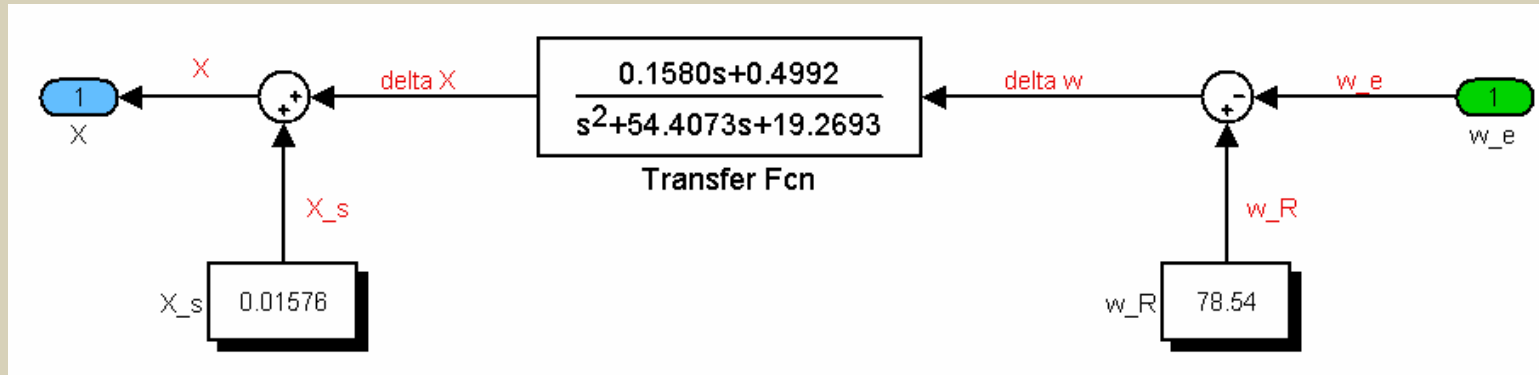
Flujo másico a través de la válvula de admisión



Flujo másico a través de la válvula de escape



Modelo del Regulador Woodward UG8D

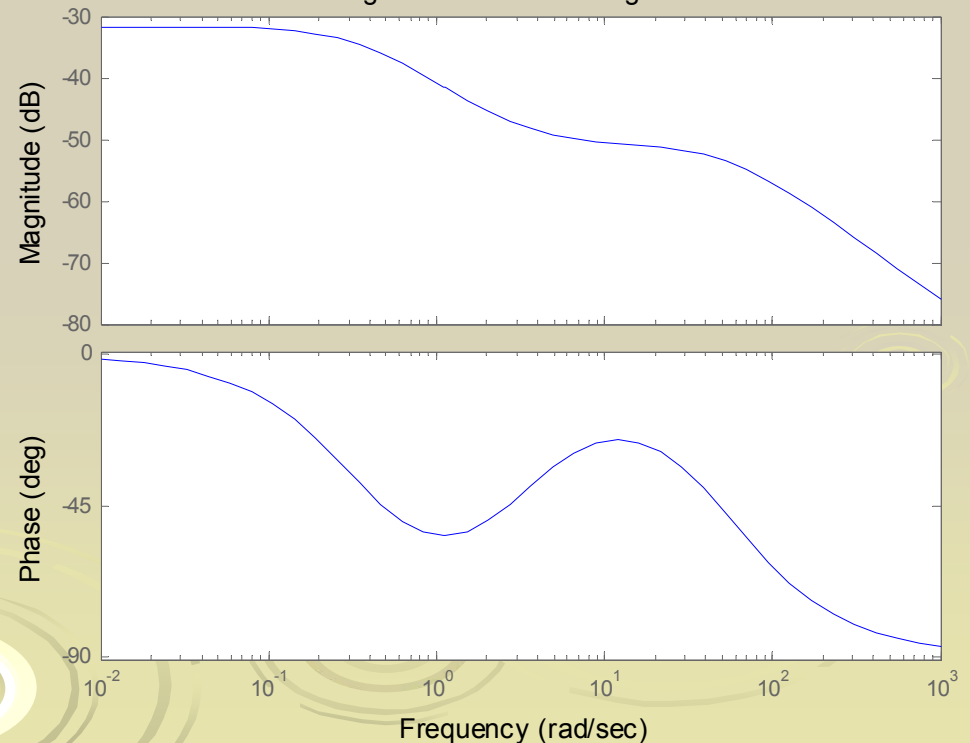


ΔX : desviación desde el índice estacionario de la bomba X_s

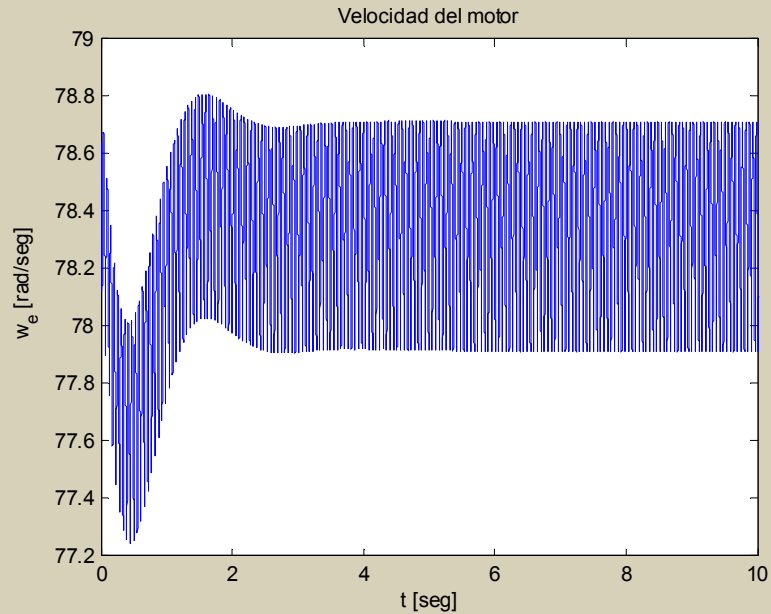
Δw : error de velocidad del motor

UG8D = Controlador PI aproximado + retardo de primer orden

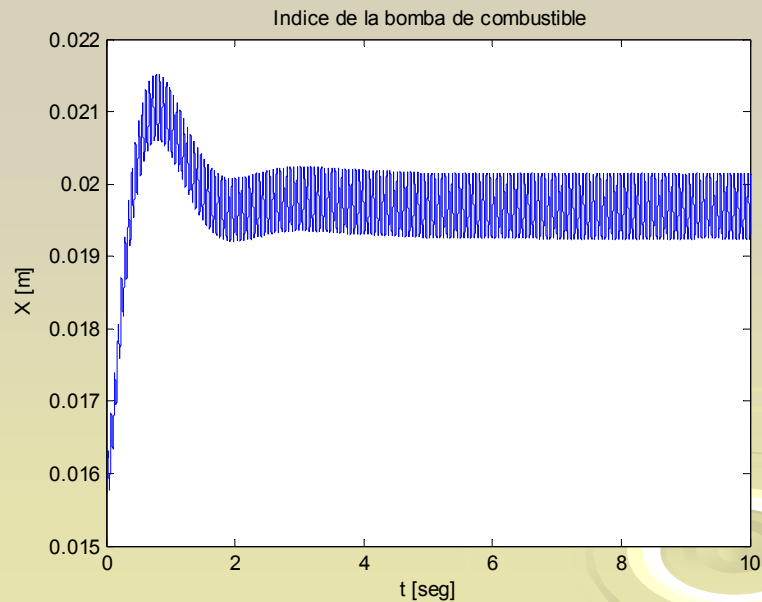
Diagrama de Bode del regulador



SIMULACION TRANSITORIA



- Las figuras siguientes muestran como el motor diesel responde a un incremento del torque de carga de aprox 45%



Conclusiones

- La técnica BG permitió rápida comprensión de la física y el modelado de un sistema complejo
- BG provee una metodología organizada para desarrollar las ecuaciones de estado
- BG permite prototipeado virtual de distintas alternativas de diseño (N° cilindros, N° de válvulas, distintos tipos de turbinas, etc)
- Los resultados de la simulación obtenidos tanto a lazo abierto como a lazo cerrado son altamente satisfactorios

Agradecimientos

- Principalmente a nuestros padres
- Ing. Sergio Junco
- Dr. Norberto M. Nigro
- Ing. Ernesto Kofman
- Ing. Mónica Romero
- Prof., Ph.D Elbert Hendricks
- Dr. Kurt Strand
- Dr. Eilif Pedersen
- Dr. Francis Lorenz y la gente de Lorenz Simulation (Belgium) por la cesión del software MS1 - Web site address (www.lorsim.be).
- Dr. Paul Stangerup y la gente de StanSim (Denmark) por la cesión del software Esacap.
- Prof. Michel Hassenforder
- Prof. Gerald Gissinger
- Prof. Dr. Ronald C. Rosenberg
- Prof. Donald L. Margolis
- Prof. Dean Karnopp
- Prof. Jia Xinle
- Prof. Hallvard Engja
- A la gente del "Department of Marine Engineering" – NTNU –Norwegian University of Science and technology
- A la gente de "NTNU Library"
- Prof. Dr.-Ing. Uwe Kiencke
- Prof. Dr. – Ing. Helmut Pucher
- Dr. Axel Eduardo Larreteguy
- Dr. Jorge Luis Baliño
- Dra. Laura A. Razovich
- Y a todos aquellos que de un modo u otro han contribuido a la concreción de este proyecto.