

# Modelo de sobrealimentación para motores de combustión interna alternativos

Rafael Gómez Marassi, Ricardo Chacartegui Ramírez, Antonio Muñoz Blanco, Fº Jiménez Espadafor A., Tomás Sánchez Lencero

*GMTS Escuela Superior de Ingenieros Sevilla. Avda de los Descubrimientos s/n Sevilla 41092.*

*954487242/ 46 ricardo@esi.us.es*

## Resumen

En este trabajo se muestra un modelo mediante el cual se pretende la caracterización del comportamiento e interacción de un grupo de turbosobrealimentación acoplado a un motor de combustión interna alternativo de cuatro tiempos. El modelo empleado para el grupo de sobrealimentación ha sido desarrollado buscando la compatibilidad del mismo con herramientas numéricas basadas en modelos de acción de ondas para la simulación de flujos en los conductos de admisión y escape, previamente desarrolladas por los autores.

El modelo del grupo de sobrealimentación ha mostrado una buena adaptación tanto en las zonas de funcionamiento normal de las turbomáquinas como ante situaciones de bloqueo, inversión de flujo o bombeo, presentes dada la naturaleza oscilante del flujo en las secciones de entrada y salida de las mismas. Tras un proceso de validación del mismo se ha aplicado el código modificado incluyendo el modelo de grupo de sobrealimentación a una serie de configuraciones de MCIA determinadas.

**Palabras Clave:** sobrealimentación, MCIA, métodos numéricos, modelos de acción de ondas.

## Abstract

In this work a turbocharging system is modeled and integrated within a previously developed numerical tool in order to simulate reciprocating internal combustion engines. The turbocharging model has been tested and applied to a four strokes, four cylinders internal combustion engine model showing the effects of turbocharging in different parameters.

**Keywords:** turbocharging, internal combustion engines, numerical methods, wave action models.

## 1. Introducción

El uso de grupos de sobrealimentación en motores de combustión interna alternativos (MCIA) se encuentra presente en múltiples aplicaciones, desde grandes motores de generación a la práctica totalidad de segmentos de la automoción. El desarrollo de herramientas numéricas que permitan simular el comportamiento del sistema conjunto reduce los costes frente a la experimentación pura, aunque exista una fuerte dependencia de la experimentación en el ajuste de los modelos, siendo además estas herramientas numéricas cada vez más potentes debido al aumento de capacidad de los

ordenadores, permitiendo abordar problemas de mayor complejidad en menores tiempos de cálculo.

En este trabajo se plantea el desarrollo de un modelo de grupo de sobrealimentación para su acoplamiento a un código de simulación integral de motores de combustión interna alternativos previamente desarrollado por los autores. Dicho modelo integral se fundamenta en modelos de combustión en los cilindros y resolución numérica de las ecuaciones del flujo en los conductos acoplados a los cilindros. El modelo de grupo de sobrealimentación que se incorpora interacciona como condición de contorno con los modelos asociados a la simulación de los flujos en los sistemas de admisión y escape. Este tratamiento modular de los diferentes elementos presentes consigue mantener la versatilidad del código original, permitiendo simular gran variedad de motores de combustión interna alternativos.

Los resultados que se presentan ponen de manifiesto tanto la evolución de las magnitudes instantáneas en los sistemas de admisión y escape del MCIA, del grupo de sobrealimentación (gastos, relación de compresión, etc.), así como resultados promediados en el tiempo indicativos de la mejora de las prestaciones al sobrealimentar el motor.

## 2. Modelo del flujo en los conductos de admisión y escape

La herramienta numérica que simula los flujos en los sistemas de admisión y escape del motor, previamente desarrollada por los autores, se basa en flujo unidimensional aplicado a conductos de sección variable, con transferencia de calor. El flujo en los conductos viene modelado por un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales hiperbólicas expresadas de forma genérica por:

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}(\vec{W})}{\partial x} + \vec{C}(\vec{W}) = 0 \quad (1)$$

donde  $\vec{W}(x, t)$  son las variables del flujo,  $\vec{F}(\vec{W})$  es un vector de flujo y  $\vec{C}(\vec{W})$  el término fuente, viniendo definidos por las expresiones:

$$\vec{W}(x,t) = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e_0 \end{pmatrix} \quad \vec{F}(\vec{W}) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u h_0 \end{pmatrix} \quad \vec{C}(\vec{W}) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 \\ \rho u h_0 \end{pmatrix} \cdot \frac{d(\lg \vec{F})}{dx} + \begin{pmatrix} 0 \\ \rho G \\ -\rho q \end{pmatrix} \quad (2)$$

Estas ecuaciones han sido resueltas mediante el método de Lax-Wendroff de dos pasos el cual sigue el siguiente esquema haciendo referencia a la Figura 1:

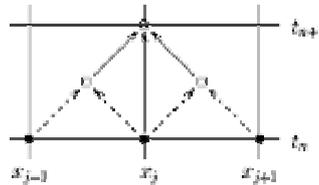


Figura 7. Método de Lax- Wendroff de dos pasos.

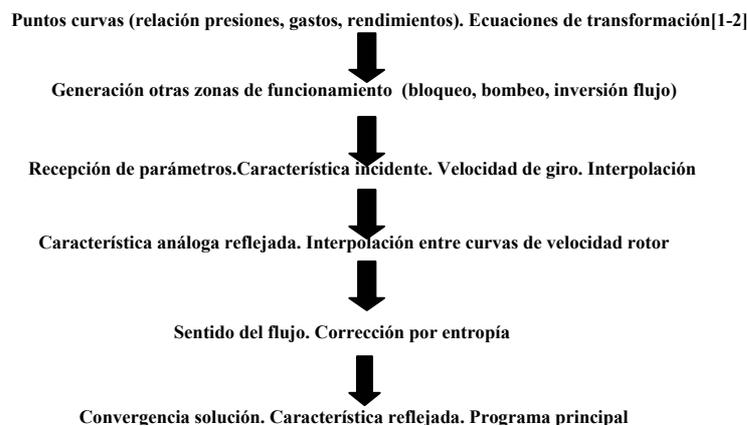
- a) Primer paso: conocidos los vectores W y F al nivel temporal n en los nodos i-1, i, i+1, se calcula el vector solución W avanzando en el tiempo  $\Delta t/2$  para los nodos intermedios i+1/2 a i-1/2.
- b) Segundo paso: con los valores del vector F calculados en el paso anterior en los nodos intermedios, y con el valor de W relativo al nivel temporal precedente, se calcula el vector solución al nuevo nivel n+1.

Este método combina la sencillez de un método de primer orden con la precisión de un método de segundo orden estando ampliamente difundido su uso para la resolución de ecuaciones en derivadas parciales hiperbólicas unidimensionales [1]. Trabajando directamente con las variables del flujo, el método en los nodos internos de los conductos da resultados precisos, sin embargo el tratamiento de las condiciones de contorno de manera directa con estas variables no recoge con exactitud la naturaleza del flujo, siendo necesaria la introducción de artificios matemáticos para ello. La experiencia de los autores ha sido que el clásico método de las características [1-2] es el que mejor recoge la presencia de ondas en los contornos, viniendo dadas por tanto las condiciones de contorno en términos de características incidentes y reflejada.

### 3. Modelo del grupo de sobrealimentación.

El tratamiento numérico del grupo de sobrealimentación acoplado al motor de combustión interna usado en este trabajo se basa en la caracterización de turbinas y compresores mediante el uso de curvas características de los mismos obtenidas en condiciones de flujo estacionario, siendo así proporcionados por los fabricantes de grupos de sobrealimentación, estando además justificado por la menor dificultad en la

obtención de datos experimentales. Las condiciones de flujo en los contornos del modelo presentado en el apartado anterior se caracterizan por las características incidente y reflejada, de modo que se genera una característica reflejada cuya intersección con la variable incidente determina la evolución de las magnitudes fluidas en ese contorno e instante de tiempo. El modelo del grupo de sobrealimentación se sustenta en la transformación de la información contenida en las curvas características en base a relaciones entre variables físicas a una representación equivalente en términos de una variables de Riemann análogas  $\lambda^*$  y  $\beta^*$  [1-2]. Los puntos en las zonas de funcionamiento anómalo se obtienen por incrementos/decrementos de gasto más allá del bloqueo o flujo nulo hasta un valor nominal adoptando simplificaciones sobre la relación de presiones o temperaturas. El desarrollo concreto de estas ecuaciones se puede consultar en la bibliografía [1-2], y da lugar a ecuaciones de transformación específicas para la simulación de turbinas de presión constante o variable en la descarga así como de compresores de presión constante o variable en la admisión. El esquema general de transformación :

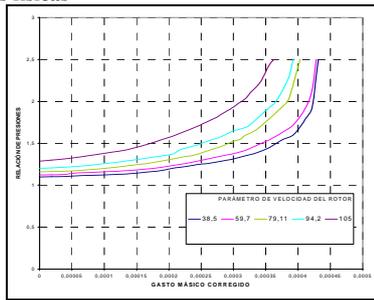


**Figura 8.** Esquema general de la transformación de las curvas características en función de su geometría como relación entre características incidente y reflejada.

Para el modelo de cada elemento se requieren consideraciones específicas. Así la turbina hace uso de la analogía de la tobera mientras que en el caso del compresor se requiere la introducción de una longitud equivalente que tenga en cuenta el tamaño del compresor durante el proceso de compresión, desarrollada por Yano [2].

A modo de ejemplo se presentan las curvas características transformadas de una turbina

Variables físicas



Variables de Riemann análogas  $\lambda^*$  y  $\beta^*$

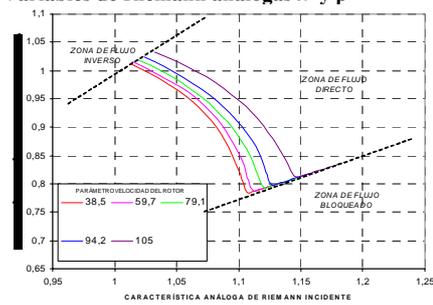


Figura 9. Transformación de las curvas características de una turbina en función de su geometría a una relación entre características incidente y reflejada.

Y el diagrama de flujo para un compresor con presión variable en la admisión:

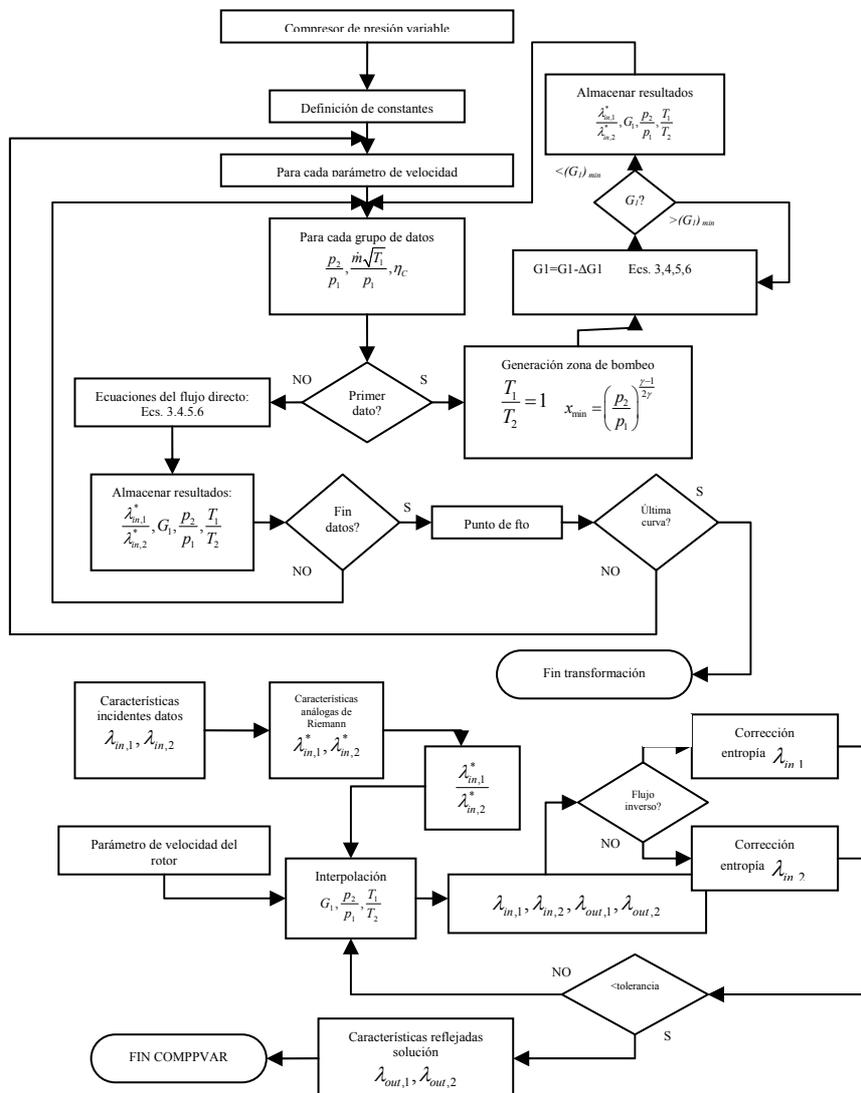


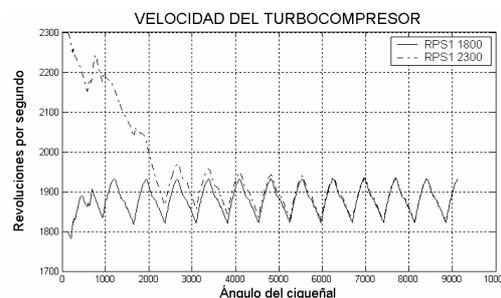
Figura 4. Diagrama de flujo de la transformación de las curvas características de un compresor con presión variable en la admisión, en función de su geometría, en relación entre características incidente y reflejada.

donde para el compresor en la zona normal de flujo la relación de características incidente y reflejada viene dada por las expresiones (3-6), siendo F el área de salida:

$$G_n = \frac{\dot{m}\sqrt{T_n}}{p_n}; n=1,2; \quad (3) \quad C_n = \frac{\gamma-1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{\gamma}\right)} \frac{1}{F_n}; n=1,2 \quad (4)$$

$$\frac{\lambda_{in,1}^*}{\lambda_{in,2}^*} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \cdot \left( \frac{1+C_1 G_1}{1-C_2 G_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right) \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (5) \quad \frac{T_{02}}{T_{01}} = 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right] \quad (6)$$

Una vez transformada la información original de las curvas se hace preciso realizar interpolaciones entre los puntos de funcionamiento y en función de la velocidad de giro del rotor. El modelo de sobrealimentación incorpora la determinación de la velocidad instantánea de giro del turbo, necesaria para la interpolación entre las curvas transformadas, mediante la resolución del balance de potencias en el eje libre. El balance se afecta por la inercia del grupo y por el rendimiento mecánico del acoplamiento. Esta ecuación se integra para cada paso temporal si bien requiere en el instante inicial la asignación de un valor inicial de régimen de giro del turbo, valor que puede condicionar significativamente el punto de funcionamiento y no garantiza la compatibilidad entre las condiciones de flujo en el motor en dicho instante y las derivadas de dicha velocidad en el turbo. En la Figura 5 se muestra la evolución del régimen de giro del grupo de sobrealimentación frente al ángulo de giro de cigüeñal, mostrando la convergencia hacia una evolución estacionaria desde valores iniciales considerablemente diferentes.



*Figura 5. Convergencia frente a la velocidad inicial de giro.*

#### 4. Resultados

A continuación se muestran diferentes resultados obtenidos con el código para un motor de cuatro cilindros comparando los resultados para la misma configuración en las

versiones de motor atmosférico y sobrealimentado. En las Figuras 6, 7 y 11 se muestran las características principales del modelo.

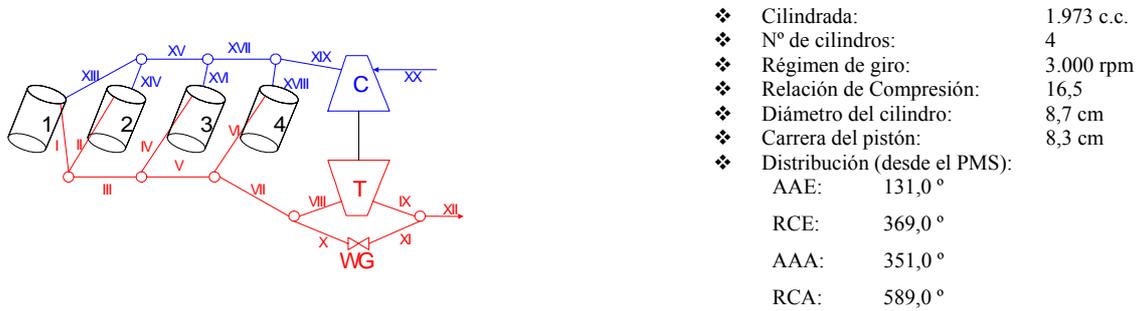


Figura 6. Esquema y características del motor.

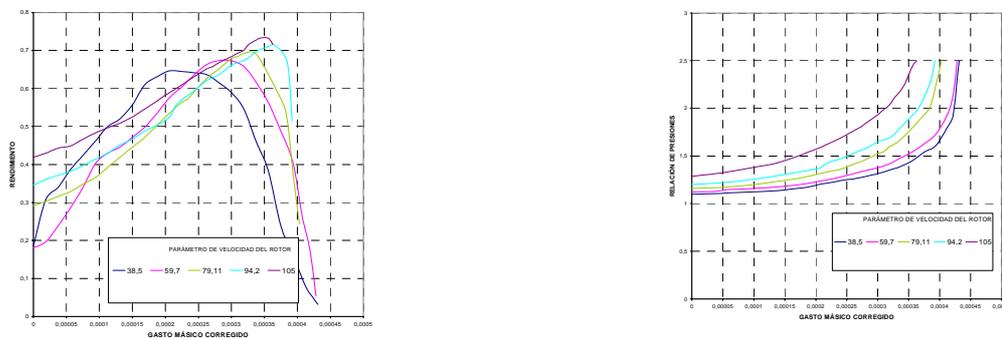


Figura 7. Curvas características de turbina.

En las Figuras 8 y 9 se muestra la evolución de las magnitudes al acoplar el grupo de sobrealimentación. Alcanzado el funcionamiento estacionario se observa un comportamiento cíclico cada dos ciclos completos, ese comportamiento cíclico se ve afectado por la apertura y cierre de la válvula de waste-gate.

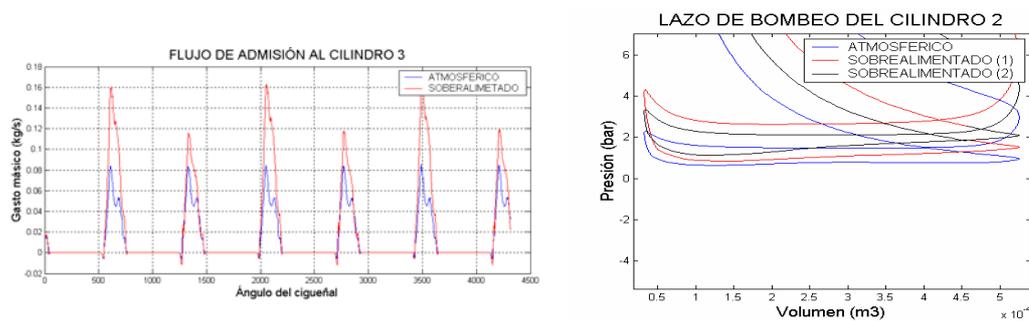
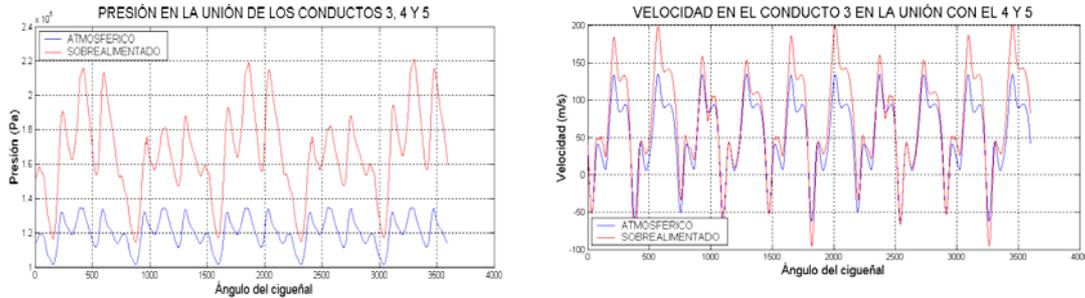


Figura 8. Motor sobrealimentado vs. Motor atmosférico. Flujo admisión y lazo de bombeo.

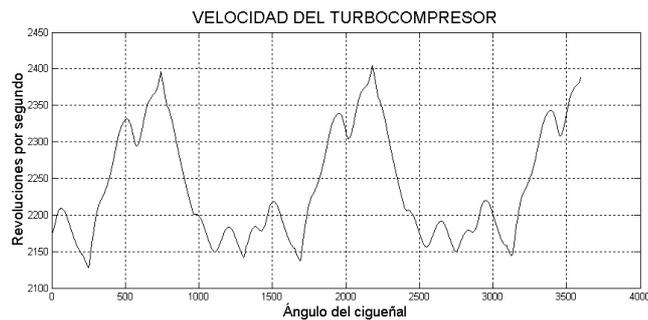
Al sobrealimentar se aprecia un claro aumento del flujo entrante en los cilindros y una mayor presión en los conductos de admisión. Sin embargo se observa que las

velocidades en los conductos se mantienen del mismo orden, estando las diferencias relacionadas con las pérdidas en los conductos y la alteración de los recorridos de las ondas, no resultan significativamente diferentes en ambos casos



**Figura 9.** Motor sobrealimentado vs. Motor atmosférico. Presiones y velocidades.

En la figura 10 se muestra la modificación del régimen de giro del grupo de sobrealimentación debido al efecto de las ondas, una vez alcanzado un comportamiento cíclico del conjunto grupo de sobrealimentación/motor.



**Figura 10.** Oscilaciones del régimen de giro del grupo de sobrealimentación.

En la Figura 11 se muestran el efecto que tiene en diferentes parámetros las variaciones de grado de carga del motor y de régimen de giro. Se aprecia como regímenes de giro superiores del motor dan lugar a gastos crecientes en el compresor, modificándose la intensidad de las ondas. En la Figura 11 también se muestra la representación de la relación entre presiones medias efectivas del motor sobrealimentado y la máxima obtenida para el motor atmosférico así como la superposición de las curvas del compresor con los valores medios a diferentes grados de carga.

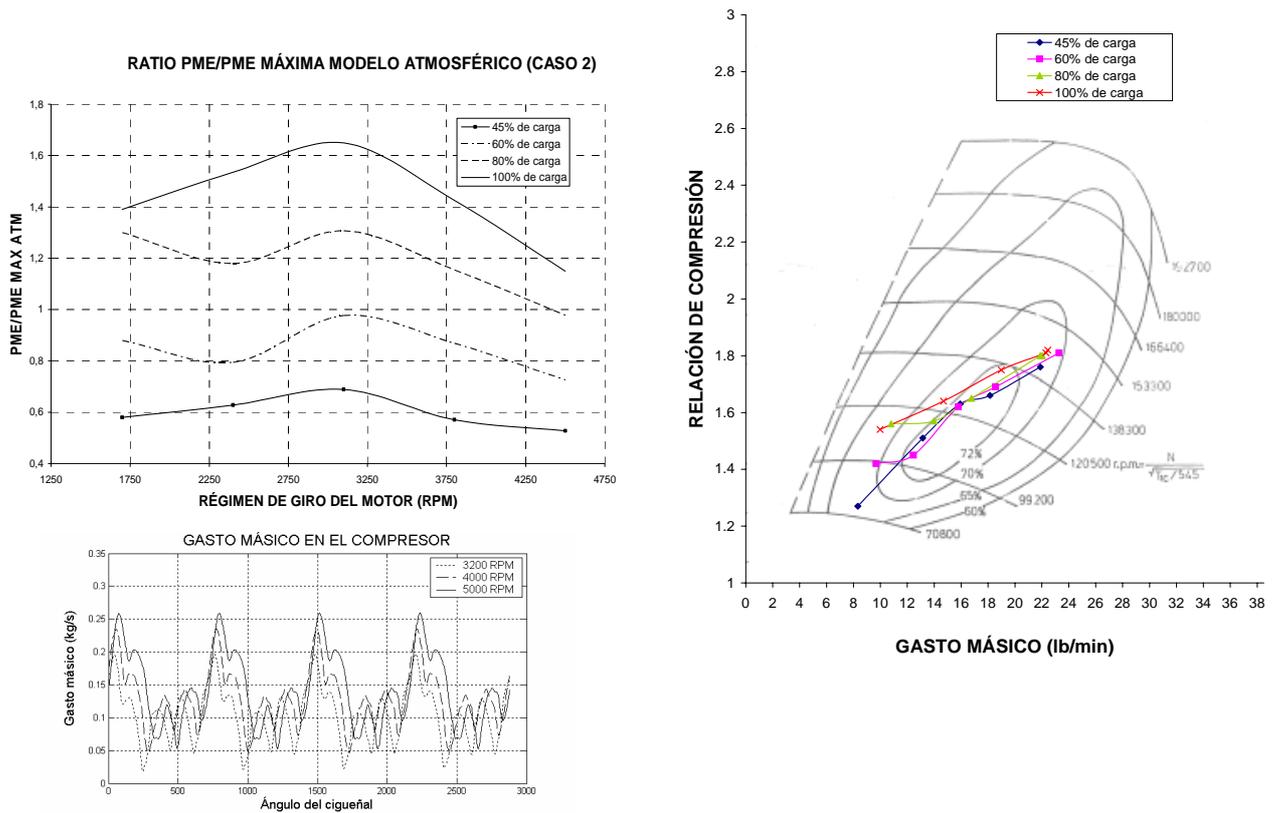


Figura 11 .Efecto del régimen de giro en el gasto másico que evoluciona por el compresor. Efecto del grado de carga en las prestaciones medias del conjunto.

### 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto la robustez del modelo implementado, recogiendo la naturaleza ondulatoria del flujo, adaptándose a condiciones anómalas de funcionamiento en ambas turbomáquinas, manteniéndose la versatilidad del código original. Los límites de aplicabilidad del modelo se encuentran en las extrapolaciones que se deben efectuar sobre el comportamiento de las maquinas en las zonas próximas a la inversión de flujo, siendo esta una de las actuales líneas de mejora en las que se está trabajando.

### 6. Referencias

1. D. Winterbone, R Pearson *Theory of engine Manifold Design* Professional Engineering publishing (2000).
2. R.S Benson, *The Thermodynamics and gas Dynamics of internal combustion engines* ISBN 0-19-856210-1, 1982.