

Capítulo 6

RESUMEN Y CONCLUSIONES.

El Proyecto que se recoge en este documento tiene por objeto la incorporación al software desarrollado por el Grupo de Motores Térmicos de Sevilla.

Para el cumplimiento de este objetivo se han transferido al código del programa un conjunto de subrutinas destinadas a modelar el comportamiento de los elementos encargados de proveer dicha sobrealimentación.

En el Capítulo 1 se han expuesto los motivos que conducen a la aplicación de la sobrealimentación como práctica habitual en la mejora de las prestaciones de los motores de combustión interna alternativos, en especial en el rango de los motores diesel de automoción. Así mismo se han expuesto las consideraciones generales del software desarrollado y de los métodos numéricos que se emplean.

El Capítulo 2 desarrolla las ecuaciones que permiten la implementación de los distintos elementos en el programa. Se ha considerado necesario modelar mediante subrutinas específicas los siguientes elementos:

- Turbina de presión contante en el escape.
- Turbina de presión variable en el escape.
- Compresor de presión constante en la admisión.
- Compresor de presión variable en la admisión.

Estas ecuaciones buscan principalmente expresar la información contenida en las curvas características de los elementos anteriormente mencionados en términos compatibles con la aplicación del método de las características a la hora de determinar condiciones de contorno en los conductos.

Los resultados obtenidos hacen uso de algunas hipótesis simplificadoras sin las cuales el problema resulta tremendamente complicado de abordar. En particular se asume el tratamiento monodimensional del problema, la aplicabilidad de un régimen cuasiestacionario para la caracterización de turbina y compresor, empleo de métodos numéricos de resolución de las ecuaciones como el método de las características o el uso del método de Lax-Wendroff de dos pasos, así como correlaciones empíricas, etc.

Con ello se puede visualizar el comportamiento de un motor sobrealimentado bajo la perspectiva de un modelo de acción de ondas donde las oscilaciones en las propiedades de los fluidos resultan ser muy significativas.

Debido acoplamiento de ambas turbomáquinas ha sido necesario incluir en el programa líneas de código para la resolución del régimen de giro del turbocompresor a partir del balance de potencias en el eje de acoplamiento así como elementos de control como la válvula de waste gate.

La aplicación de estas ecuaciones da lugar a que tanto la turbina como el compresor y la válvula de waste gate reciban un tratamiento de condición de contorno en el extremo de conducto que se resuelve mediante el cruce para un determinado paso

de tiempo de la correspondiente característica incidente con la reflejada que es la que proporcionan las distintas subrutinas.

El Capítulo 3 muestra una amplia comparativa entre los resultados obtenidos para motores que hacen uso de las subrutinas anteriores con los motores equivalentes de aspiración atmosférica. Esta comparativa se ha extendido a múltiples configuraciones respecto al número de cilindros (de 1 a 4), distintas configuraciones de conductos, regímenes de giro así como la posibilidad de aplicar la sobrealimentación en motores de encendido provocado.

En el Capítulo 4 se ha llevado a cabo un barrido sobre aquellos aspectos geométricos u operativos que pueden afectar al funcionamiento de la turbina o el compresor con vistas a la identificación de tendencias e influencia sobre el grado de sobrealimentación suministrado por el turbocompresor.

El acoplamiento de una máquina de carácter alternativo como un motor con turbomáquinas de flujo más o menos continuo es el objetivo del desarrollo llevado a cabo en el Capítulo 5. Para ello se han realizado múltiples experiencias y se ha obtenido una representación conjunta del funcionamiento de ambas máquinas así como una perspectiva de cómo se modifican las prestaciones de un motor sobrealimentado a diferentes regímenes y cargas.

La obtención de un modelo fiable y robusto de turbina y compresor aplicados a la sobrealimentación de un motor alternativo resulta ser una empresa no exenta de obstáculos, de hecho en el texto de Pearson y Winterbone [2] se hace mención expresa a la dificultad de aplicar de forma práctica las ecuaciones que caracterizan el comportamiento de un compresor con presión variable.

Una de los principales problemas con los que se ha lidiado en la realización del Proyecto ha sido la dificultad en la identificación y aislamiento de las fuentes de error.

A la hora de realizar una prueba para ver la validez para un determinado modelo, se introducen una serie de incertidumbres y fuentes de error de manera conjunta de modo que resulta complicado discernir la sensibilidad del modelo a una cierta fuente de error. Entre estas fuentes de error se puede contabilizar la inapropiada selección de la velocidad de giro del turbocompresor, la incompatibilidad del motor con los gastos y relaciones de presiones de turbina y compresor, la interpretación que se realiza sobre algunas de las ecuaciones a aplicar que no resultan suficientemente explícitas en la bibliografía [1] (en concreto en lo relativo al compresor de presión constante) así como la posibilidad de errores a la hora de transcribir las ecuaciones al código.

Además al introducir la sobrealimentación en el programa ha sido necesario alargar notablemente el tiempo de cálculo frente a la situación del modelo anterior donde a partir del segundo ciclo de combustión (unos 720°) de cigüeñal se registraban evoluciones más o menos periódicas. En algunos de los casos se han tenido que realizar experiencias a más de 12.000° de giro del cigüeñal para poder caracterizar el comportamiento oscilatorio por lo que las pruebas (muchas de ellas fallidas) han llevado una considerable inversión de tiempo.

Por todo ello se puede afirmar, que si bien el modelo presentado en este documento dispone de una gran aplicabilidad en el sentido de que puede resultar válido para prácticamente cualquier configuración, adolece de la robustez y automatización necesaria para que esta aplicabilidad quede garantizada sin tener que acometer la tediosa tarea de realizar un ajuste pormenorizado de las curvas o las secciones de los conductos de entrada y salida a las turbomáquinas.

La obtención de los resultados que se presentan en los Capítulos anteriores muestran por un lado que el modelo tiene capacidad para reproducir con cierta bondad las modificaciones que sufren tanto el fluido como las prestaciones del motor debido a la aplicación de la sobrealimentación. En los modelos del Capítulo 3 se muestra que el modelo tiene capacidad para proporcionar resultados consistentes bajo distintas configuraciones del motor.

En el Capítulo 4 también se han puesto de manifiesto resultados aceptables aunque la determinación de las relaciones existentes entre los distintos parámetros sea bastante limitada. Además en el conjunto de resultados se muestra una consistencia importante entre las magnitudes que denotan el comportamiento del motor (masa en los cilindros, diagramas $p-v$) con los que describen el funcionamiento del turbocompresor (relación de compresión, gastos, régimen de giro, etc).

A pesar de ello no se puede afirmar que uno de los objetivos relativo a que el modelo fuese robusto y capaz de tratar múltiples configuraciones y reglajes del motor, que formaba parte de los objetivos iniciales del Proyecto se haya llevado a cabo al menos de forma satisfactoria. Esto es debido a que si bien el modelo ha funcionado aceptablemente para configuraciones distintas (en el Capítulo 4 se presentan resultados obtenidos para más de 40 modelos que varían en algún parámetro de uno a otro mientras que en el Capítulo 3 los motores modelados tienen desde 1 hasta 4 cilindros con regímenes de giro que varían entre las 2.500 y las 5.500 rpm) han sido necesarios probar muchas de estas configuraciones en sucesivos fallos del programa hasta dar con la apropiada combinación entre los parámetros geométricos y operativos del motor y las curvas características lo que resulta poco eficaz más aún si se tienen que modificar parámetros (como diámetros de conductos) que en una posible aplicación real tendrían un cierto valor fijo.

Sin embargo una vez que se garantiza la adecuada compatibilidad entre todos los elementos presentes, el modelo ha manifestado su potencial para representar múltiples condiciones de funcionamiento para un determinado motor, puesto que los resultados del Capítulo 5 se han obtenido variando los regímenes del motor entre las 1.700 rpm y las 4.500 rpm y los grados de carga entre plena carga y el 45 % de la misma.

En virtud de los resultados mostrados y las pruebas que se han realizado, se puede decir que en el caso de los motores de mayor número de cilindros y que desplazan mayores gastos y de forma más continua, el modelo ha dado mejores resultados mientras que se han tenido que realizar muchas más pruebas para que las configuraciones mono o bicilíndricas a bajos regímenes operen de forma aceptable.

La visión del problema bajo la perspectiva de un modelo de acción de ondas también se ha llevado a cabo. En este sentido las magnitudes a la entrada y salida de las turbomáquinas modeladas presentan evoluciones pulsantes y transitorias cuyo patrón en

el tiempo da lugar a unos valores medios que pueden ser consistentes con los valores obtenidos cuando se modelan estos elementos bajo otras hipótesis de trabajo. Los resultados ponen de manifiesto que resulta muy interesante obtener una mejor caracterización de los rendimientos y prestaciones de las turbomáquinas, en vistas a caracterizar su comportamiento en zonas de funcionamiento como la de flujo inverso o zona de bombeo, que al menos bajo el punto de vista de la acción de ondas pueden ocurrir con relativa frecuencia en la operación de un turbocompresor.

El modelo también ha puesto de manifiesto su capacidad para tratar situaciones anómalas de funcionamiento de las turbomáquinas, en concreto en aquellas situaciones en las que se produce inversiones de flujo o el fenómeno de bombeo.

La capacidad de regulación obtenida mediante el desarrollo de una condición de contorno asimilable a la válvula de waste gate también ha dado resultados satisfactorios. Pese a que intrínsecamente el proceso de sobrealimentación induciría una aceleración sostenida del grupo de sobrealimentación, en todos los modelos se llega a unas condiciones más o menos estacionarias en cuanto al grado de sobrealimentación. En el análisis llevado a cabo en el Capítulo 4 se ha contrastado la estabilidad que aporta este dispositivo.

Otros resultados también han puesto de manifiesto limitaciones inherentes del código original que suponen un obstáculo en cuanto a la veracidad del modelo de turbocompresor. En concreto, el modelo de combustión parece insuficiente para que se caracterice con rigor la relación de la sobrealimentación y el grado de carga, puesto que el estado energético en el escape de los cilindros ha resultado ser menos sensible de lo esperado. Por ello, junto con el resto de incertidumbres existentes en el modelo, los resultados mostrados en el Capítulo 5 no son plenamente satisfactorios al observarse una dependencia menor de lo esperado para un parámetro tan significativo.

Dado que en aquellas configuraciones donde ambas máquinas resultan más compatibles los resultados obtenidos se pueden considerar bastante satisfactorios se puede concluir que el modelo presentado en este Proyecto es una herramienta para caracterizar la sobrealimentación de motores de combustión interna de forma adecuada siempre que el acoplamiento de estos elementos resulte razonablemente compatible.

Aún así se puede considerar que el actual trabajo es otro paso añadido en esta dirección. Futuras líneas de mejora podrían orientarse a tres acciones fundamentales:

- Aumentar la aplicabilidad del modelo. En la actualidad sólo se pueden tratar curvas características de turbina de tipo radial, por lo que sería interesante incorporar herramientas para tratar otro tipo de curvas. Del mismo modo se podría trabajar sobre la posibilidad de emplear turbinas de geometría variable en lugar de la válvula de waste gate para regular el funcionamiento del turbocompresor. Ante la creciente tendencia de sobrealimentar motores de gasolina se podría incluir condiciones de contorno para modelar un intercooler o una compresión en dos etapas.
- Reducir las incertidumbres y fuentes de error. Deben desarrollarse procedimientos alternativos a la extrapolación del comportamiento de la turbina en el entorno de flujo nulo o del rendimiento de la turbina así

como al empleo de interpolaciones lineales en la determinación de las características reflejadas. En este sentido puede acometerse la mejora del modelo de combustión al estar muy relacionado con la sobrealimentación obtenida por la turbina.

- Desarrollar herramientas orientadas a garantizar una cierta compatibilidad de todos los elementos implicados. El hecho de conocer a prior si un determinado grupo de sobrealimentación puede ser compatible con cierto motor, reduciría sustancialmente los tiempos de necesarios para llegar a tal conclusión mediante el ajuste de parámetros geométricos. El empleo de variables adimensionales que tengan en cuenta como parámetro fundamental los gastos que pueden circular por el motor o el turbo en cuestión puede ser la estrategia adecuada para ello.
- En el estado actual del modelo tanto los grados de carga como el régimen de giro del motor permanecen constantes a lo largo del cálculo. El modelo de sobrealimentación aquí presentado podría tener un mejor comportamiento si la dependencia de la velocidad inicial de giro del turbo disminuyera apreciablemente. En lugar de imponer una velocidad inicial de giro arbitraria (con la posibilidad de que se produzcan errores al no ser compatible con las condiciones de flujo en los conductos) se podría obtener la velocidad en todo instante del balance de potencias en el eje de modo que la evolución de giro del turbocompresor se podría ajustar a una evolución variable de giro del motor. Así al inicio de los cálculos conforme se acelera el motor se debe incrementar de forma compatible la velocidad de giro del turbo. Dado que la velocidad de giro del motor es un parámetro que se determina en el fichero de datos, la manera de conseguir esto es suministrar, en lugar de un valor fijo, algún tipo de función entre el régimen inicial del motor, el tiempo o ángulo del cigüeñal y la velocidad final a la que se pretende que gire el motor

Con todo ello se estaría en disposición de afrontar un contraste experimental destinado a evaluar la aplicabilidad de las ecuaciones que sustentan el desarrollo de todo el modelo de forma definitiva.