

MOTORES DEL PRESENTE PARA EL FUTURO

PARTE I.-

LOS PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO



En diferentes ocasiones se han analizado, desde las páginas de **agrotécnica**, los motores que se utilizan en los tractores agrícolas. En el año 2004, se hizo un análisis de la normativa que limita las emisiones contaminantes en los gases de escape, poniendo de manifiesto que, como consecuencia de ella, se deberían de producir grandes cambios en el diseño del motor tradicional para uso agrícola.

En muy poco tiempo se ha visto cómo la industria del tractor agrícola se ha ido adaptando; primero con soluciones relativamente sencillas, en las que, en la mayoría de los casos, quedaba

penalizado el consumo de combustible. Las fuertes inversiones realizadas en investigación y desarrollo han permitido, de manera progresiva, llegar a nuevas soluciones que garantizan la eficiencia en la utilización del

combustible, aunque con un aumento considerable de la tecnología del motor, principalmente sobre base electrónica.

Esto, no sólo va a permitir superar las limitaciones establecidas, sino estar preparados para cumplir los límites de las etapas más exigentes que se presentan en el horizonte, llegándose a situaciones en las que se consiga que las emisiones en el escape lleguen a ser más limpias que el propio aire aspirado por los motores.

En las líneas que siguen a continuación, y en artículos sucesivos, se analizan la evolución de la normativa que afecta a los motores diésel de uso agrícola, y las diferentes soluciones que

ofrecen los fabricantes de motores, para superar los límites reglamentarios establecidos en el ámbito internacional.

■ Introducción

El motor transforma la energía química del combustible en energía mecánica, mediante un proceso de combustión que se realiza en los cilindros. La cantidad de oxígeno disponible en cada cilindro, que llega a través del aire aspirado desde la atmósfera, condiciona la cantidad de combustible que podrá quemarse y, por tanto, la energía mecánica que puede suministrar el motor en cada ciclo.

Por cada litro de combustible se necesita contar con 9.5 m³ de aire, lo que permite producir unos 10 kWh de energía, de los cuales 4.2 kWh se transforman en energía mecánica, perdiéndose el resto, aproximadamente a partes iguales, entre los gases de escape y la refrigeración.

De los 4.2 kWh de energía mecánica obtenida, algo menos de 1 kWh se pierden en rozamientos, con lo que quedarían unos 3.3 kWh de energía utilizable, o sea que el rendimiento obtenido en el motor sería del 33%.

■ El aire necesario

La cantidad de aire que llega al cilindro depende de lo que se conoce como cilindrada unitaria, que es el volumen barrido por el pistón cuando se desplaza en el interior del cilindro. Así, el motor, durante su funcionamiento, necesitará que los cilindros se llenen de aire durante el periodo que se conoce como carrera de admisión. Los colectores y demás conducciones que facilitan la llegada del aire atmosférico deben de estar diseñados para que las pérdidas de carga en las mismas sean lo menor posible.

Suponiendo que el llenado de los cilindros es perfecto, el caudal de aire que debe de llegar al motor será igual a la cilindrada por el número de veces que se realiza el ciclo termodinámico por unidad de tiempo. Así, en un motor de 4 cilindros, con 4 086 cm³ de cilindrada total, trabajando a un régimen de giro del cigüeñal de 2 200 rev/min, con un ciclo diésel de 4 tiempos, el caudal de aire necesario será:

$$C = 4.086 \text{ (L)} \times 2200 \text{ (rev/min)}$$

$$2 = 4496.4 \text{ L/min} = 26.97 \text{ m}^3/\text{h}$$

El aire que llega a los cilindros substituye a los gases quemados en cada ciclo, con el fin de repetir el proceso termodinámico. Esto es lo que se conoce como renovación de la carga.

La eficiencia con la que se realiza la renovación de la carga es de especial importancia, ya que de ella depende la potencia que puede proporcionar el motor.

Esto es una consecuencia de que la potencia tiene una expresión de la forma:

$$N_e = \text{gasto másico de aire} \times \text{dosado absoluto} \times \text{poder calorífico} \times \text{rendimiento efectivo}$$

Dado que no es posible contar con mejoras importantes en el rendimiento efectivo de los motores a plena carga y el dosa-

do máximo está limitado por los humos en el escape (diésel), la potencia máxima de un motor depende de la masa de aire admitida por unidad de tiempo.

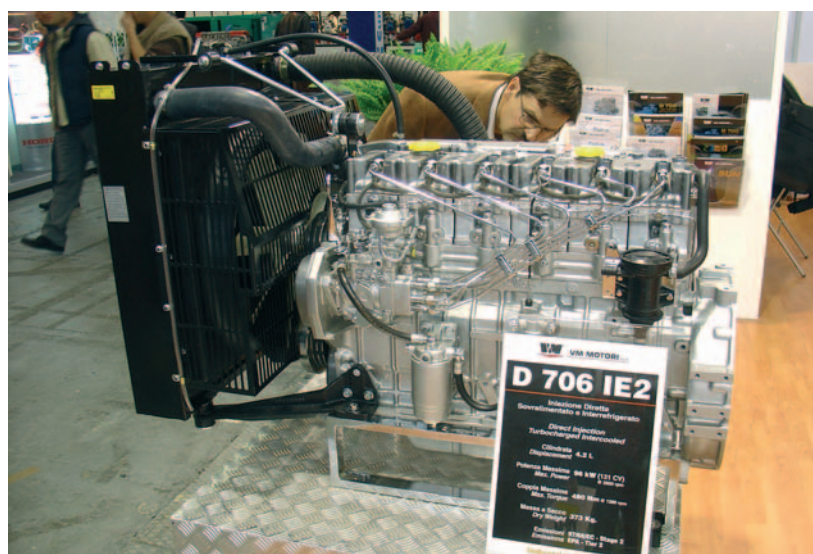
■ El rendimiento volumétrico

El proceso de llenado de los cilindros es un proceso dinámico, por lo que resulta difícil conseguir que el llenado sea perfecto, lo que condiciona el proceso de combustión que posteriormente se va a producir, ya que con menos cantidad de aire (y de oxígeno) la combustión será menos perfecta, o habrá que reducir la cantidad de combustible que llega al motor por cada ciclo.

La masa de aire admitida en los cilindros es proporcional a la cilindrada del motor, a su régimen de giro y a la densidad del fluido que llega al cilindro.

El rendimiento volumétrico se define como la relación entre la masa del aire que entra en el motor por ciclo y la que llenaría totalmente la cilindrada en unas condiciones óptimas.

Los obstáculos que frenan la entrada de aire hasta los cilindros, como son los filtros de aire, reducen la eficiencia volumétrica. Con el diseño de los colectores se pretende minimizar las pérdidas de carga de la corriente



de aire que pasa hacia los cilindros. Los motores con más de dos válvulas por cilindro permiten mejorar el llenado, al aumentar la sección de entrada.

Por el contrario, cuando se utilizan sistemas que comprimen el aire que llega a los cilindros (compresores), la masa de aire aumentará sin que se haya producido un aumento de la cilindrada, lo cual permite quemar mejor el combustible (mejorando la eficiencia), o bien aumentar la cantidad de combustible disponible por ciclo, lo que incrementa la potencia específica del motor (por unidad de cilindrada)

Por otra parte, las condiciones de temperatura y de presión atmosférica existentes afectan al llenado de los cilindros, ya que el aire al calentarse pierde densidad, de la misma manera que sucede cuando baja la presión atmosférica. Esto obliga a considerar fórmulas para corregir la potencia que puede proporcionar un motor cuando cambian las condiciones ambientales, o bien cuando funciona a mayor altitud.

El calentamiento que sufre el aire en su recorrido hasta el cilindro también afecta al llenado en términos de masa, lo que asi-

mismo se produce cuando es sometido a un proceso de compresión (motores con compresor), o por el contacto con los gases quemados y con las paredes del cilindro al que llega.

Desde un punto de vista práctico, en la situación más favorable, considerando motores de aspiración normal, el coeficiente de llenado máximo es del orden de 0.9 y disminuye con el régimen de manera que se llegan valores de hasta el 0.6. A bajo régimen se producen fugas durante el bombeo de aire que realizan los pistones. A régimen elevado se produce un frenado de la corriente de aire a la vez que pérdidas debidas a la dilatación que sufre el aire al calentarse.

Por otra parte, hay que contar que no todos los gases procedentes de la combustión producida en el ciclo anterior habrán sido expulsados, por lo que impedirán que ocupe su lugar aire fresco.

Asimismo, cuando se trata de motores diésel, la combustión necesita un exceso de aire para que se realice sin que la emisión de humos supere los va-



lores establecidos por la normativa ambiental.

Así, en un motor diésel, cuando la relación aire/combustible es menor de 20-25, la emisión de humos supera los límites establecidos. Esto limita la potencia que se puede conseguir para una determinada cilindrada, salvo que se comprima el aire que llega a los cilindros.

En la Figura 1 se pone de manifiesto la variación de la presión media efectiva, para un régimen de funcionamiento constante, en función de la riqueza de la mezcla con la que se alimenta, y el consumo específico de com-

Figura 1.- Relación aire-combustible y prestaciones del motor

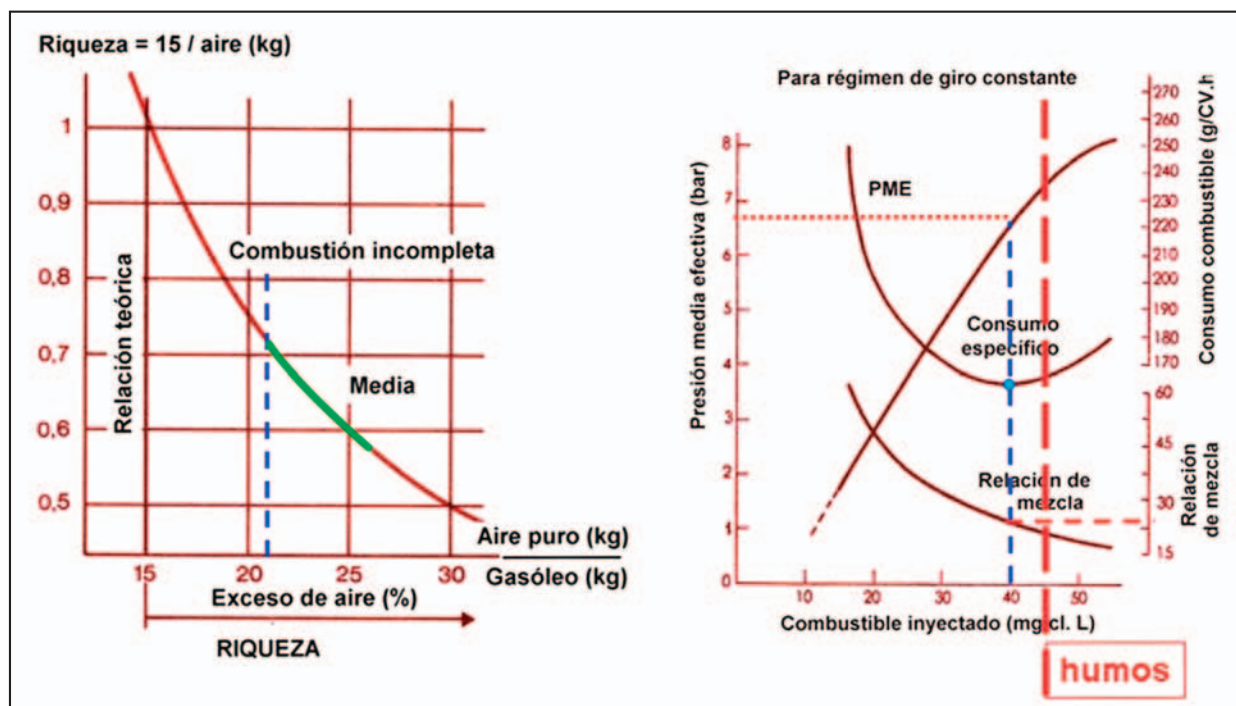
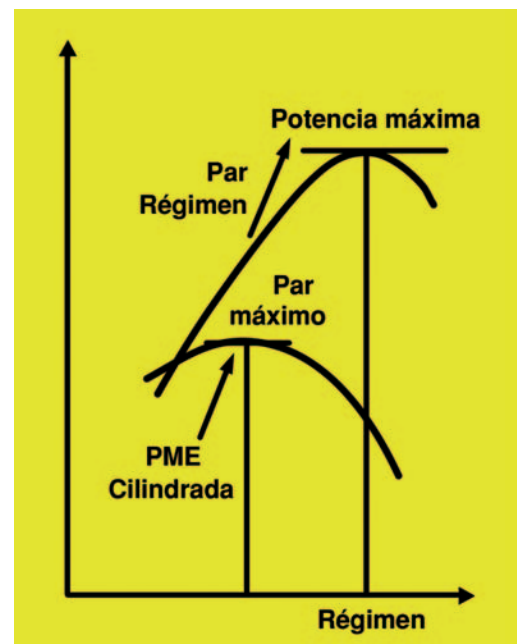


Figura 2.- Parámetros que determinan la potencia del motor



bustible (g/CVh). Trabajar con inyección de más de 45 mg por ciclo y litro de cilindrada, daría lugar a un excesivo nivel de humo en los gases de escape. Como la cantidad de aire que llega a los cilindros varía en función del régimen de giro del motor, las prestaciones de los motores son diferentes en función del régimen.

Para aumentar la potencia

Por otra parte, el aumento de la potencia de un motor, sin aumentar la cilindrada, puede conseguirse incrementando su régimen máximo de giro, o bien la presión media efectiva en el ciclo termodinámico.

Un aumento del régimen de giro hace aumentar la masa de aire que llega a los cilindros en la unidad de tiempo y simultáneamente la de combustible quemado. Sin embargo, el aumento del régimen de funcionamiento produce una reducción en el coeficiente de llenado, así como del rendimiento mecánico del motor, ya que se incrementan los rozamientos internos.

En consecuencia, la potencia obtenida crece en una propor-

PARA AUMENTAR LA POTENCIA CON LA CILINDRADA CONSTANTE HAY QUE SOBREALIMENTAR CON AIRE PREVIAMENTE COMPRIMIDO

ción menor al aumento del régimen de funcionamiento y al aumento del consumo de combustible. Por ello, en el campo del motor diesel de uso agrícola no se suele superar las 2 500 rev/min, para mantener un consumo específico de combustible en límites bajos.

El aumento de la presión media efectiva (PME) se deriva de un incremento de la presión real conseguida en los gases de combustión, lo que se produce reduciendo el exceso de aire al máximo. Sin embargo, este aumento de la PME también está limitado, ya que la riqueza de la

mezcla no puede sobrepasar el 0.7, lo que sólo produce valores del PME de alrededor de 7 bar. En líneas generales, limita el incremento de la potencia a un máximo del 15% para un determinado régimen de giro.

Por ello, la única forma de aumentar la potencia, manteniendo constante la cilindrada, es recurriendo a la sobrealimentación con aire previamente comprimido, con lo que la masa de aire que llena los cilindros se puede incrementar considerablemente.

De esta manera se puede inyectar más combustible, sin modificar la riqueza de la mezcla, a la vez que reducir las pérdidas de carga que limitan el llenado de los cilindros.

La sobrealimentación

La sobrealimentación permite introducir en los cilindros una masa de aire superior a la que se consigue con aspiración natural, consiguiendo mayor potencia con la misma cilindrada, así como compensando las pérdidas que se producen cuando los motores tienen que trabajar con baja presión atmosférica. Al estar comprimido el aire que llega a

los cilindros se puede inyectar mayor cantidad de combustible, con lo que aumenta su potencia específica (por litro de cilindrada).

Para comprimir el aire se utiliza un compresor que debe ser accionado, normalmente, por el mismo motor que sobrealimenta; lo más frecuente es que el compresor aproveche la energía residual de los gases de escape (turbocompresor). En cualquier caso, el incremento de la energía que suministrará el motor sobrealimentado debe de ser mayor que la que consume el compresor que lo sobrealimenta.

Especialmente aplicada a los motores diésel, con la sobrealimentación se puede conseguir:

- Un aumento de la potencia disponible para la misma cilindrada.
- Fabricación de motores más pequeños, y más baratos, para situarlos en espacios reducidos.
- Mayores eficiencias, que se ponen de manifiesto en la reducción de los consumos específicos.
- Compensar el efecto de bajada de presión cuando se trabaja a mayor altitud.

Con el turbocompresor, se consigue un aprovechamiento

de la energía residual de los gases de escape, para aumentar la presión del aire de admisión que llega a los cilindros. Para ello, se utiliza una turbina que 'interrumpe' la salida de los gases de escape, que va unida, mediante un eje, a un compresor situado en las conducciones de aspiración.

El aire de admisión resulta comprimido, de manera que aumenta su densidad, y, con mayor

cantidad de aire (en masa), también puede aumentarse en combustible inyectado, lo cual provoca un incremento notable de la potencia que puede proporcionar el motor de la misma cilindrada cuando sólo cuenta con aspiración atmosférica.

El aire, al ser sometido a presión, se hace más denso, pero también aumenta su temperatura (hasta 140° C), lo que en cierto modo se opone al aumento de la densidad.

CON EL TURBOCOMPRESOR SE APROVECHA LA ENERGÍA RESIDUAL DE LOS GASES DE ESCAPE, PARA AUMENTAR LA PRESIÓN DEL AIRE DE ADMISIÓN QUE LLEGA A LOS CILINDROS

El post-enfriado del aire comprimido

Si se utiliza un intercambiador de calor (*intercooler*) que reduzca esta temperatura del aire comprimido por el turbo, hasta niveles normales en la admisión (70° C), habrá un nuevo aumento de la densidad, lo que favorece el incremento de potencia que puede conseguirse en el motor.

En un motor sobrealimentado se puede obtener una presión de admisión de poco más de 1.6 bar, lo que en términos de potencia significa un incremento del 15% sobre la del motor con aspiración normal.

Si además, se refrigera el aire de aspiración, la presión en la aspiración puede aumentar a 2.5 bar y el incremento de potencia puede ser del 60% con respecto al mismo motor con aspiración atmosférica, aunque hay una pérdida de energía para el funcionamiento del sistema de refrigeración.

Además de esto, y como consecuencia de la turbulencia del aire de aspiración y del mejor llenado de los cilindros, el consumo específico disminuye notablemente.

Con el empleo del 'turbo' se ha conseguido, sobre la misma cilindrada, un motor más potente y más eficiente, aunque para ello tenga que estar sometido a mayores tensiones internas, por lo que, si no está suficientemen-

Figura 3.- Recuperación de la energía residual de los gases de escape

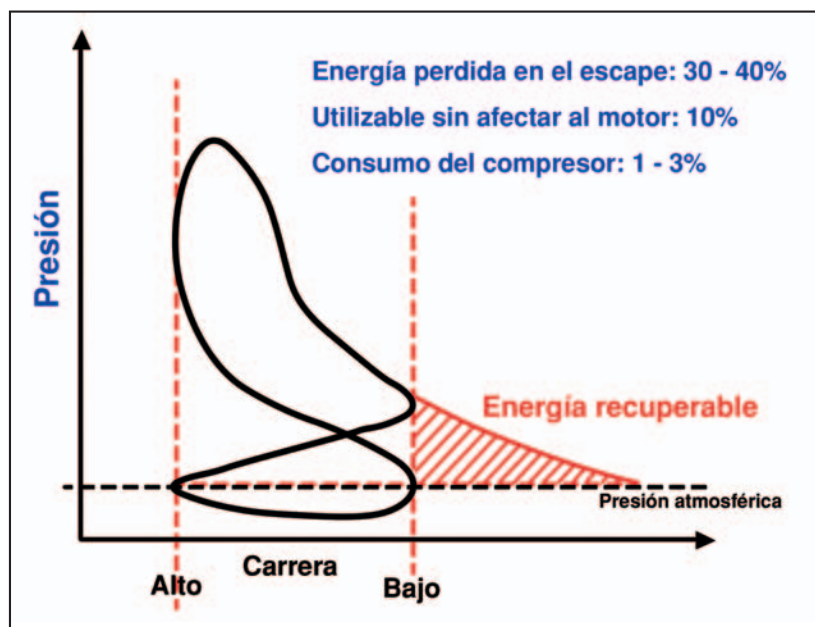
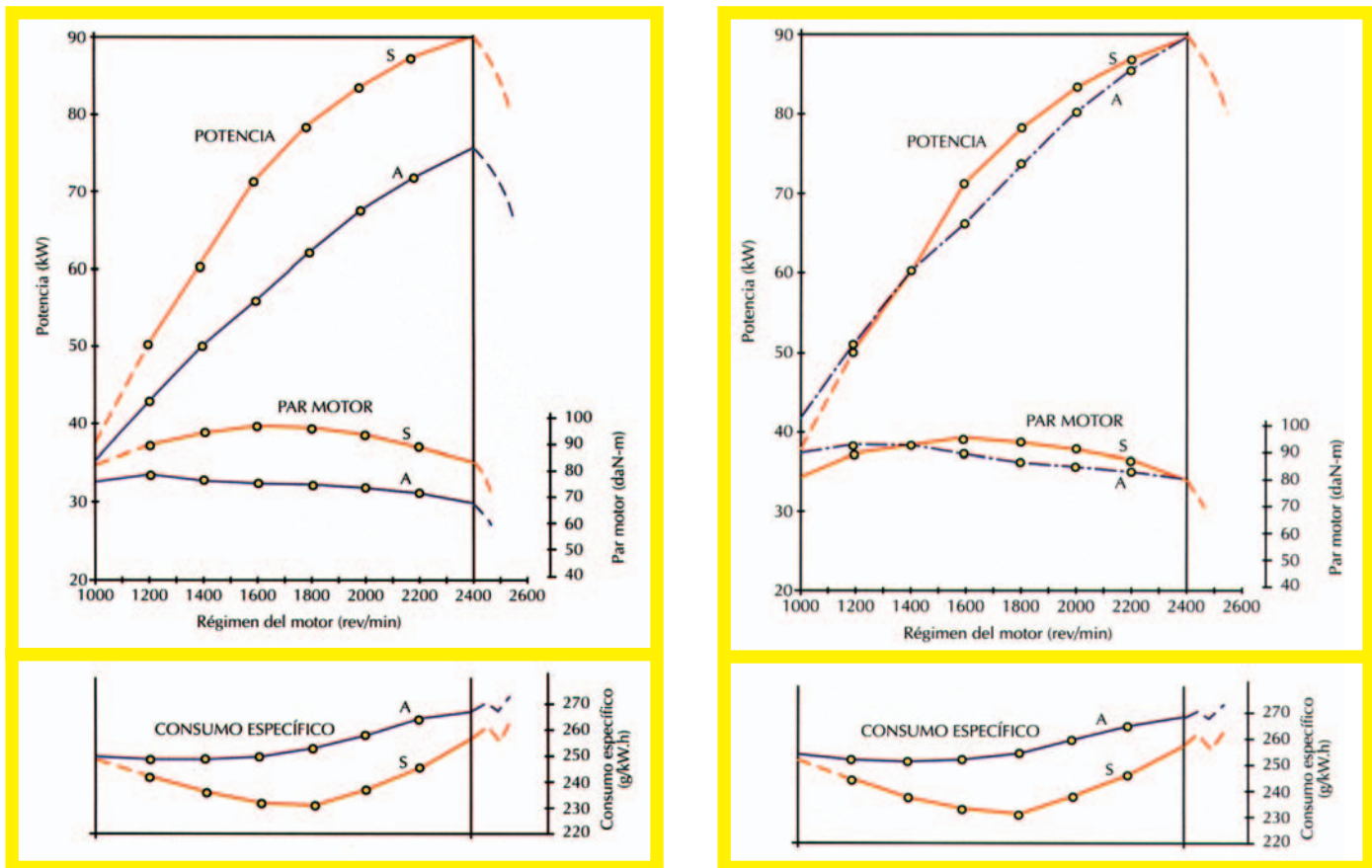


Figura 4.- Curvas características de motores turboalimentados (S) en comparación con los de aspiración natural (A)



te dimensionado, resultará afectada su vida útil.

La respuesta del motor

La actuación del turbocompresor es diferente para cada régimen de funcionamiento del motor. Para dos motores con igual potencia máxima, uno turboalimentado y otro atmosférico (éste último de mayor cilindrada), a bajo régimen de giro el motor de aspiración atmosférica proporciona más potencia de la que puede obtenerse en el motor sobrealimentado, aunque con los nuevos diseños del 'turbo' y la incorporación de válvulas de descarga, se pueden conseguir motores turboalimentados que se comporten a bajo régimen de giro de forma similar a como lo hacen los de aspiración natural.

Se suele limitar la presión máxima de soplado, para que no supere un límite aceptable, mediante la instalación de un regu-

lador de presión (membrana y resorte) separado en dos cámaras, una que va unida al colector en el intervalo situado entre el compresor y la admisión del motor y otra comunicada con el aire libre (escape).

Cuando se supera una determinada presión el regulador desvía una parte de los gases de escape que llegan a la turbina, lo que hace disminuir su velocidad, y, de esta manera, la del compresor.

Durante la aceleración del motor es preciso compensar el retraso que se produce por la inercia en el funcionamiento del turbocompresor. En este momento la inyección es máxima y el aire de admisión es insuficiente.

La reducida entrada de aire con una gran cantidad de combustible lleva a una mezcla muy rica, que resulta incompletamente quemada, aumentando el nivel de humos en el escape. Para evitarlo se necesita incorporar

un dispositivo de regulación de la inyección para ajustarla a la presión del aire en la admisión.

Para obtener un par motor máximo al régimen deseado, el turbocompresor debe de estar especialmente adaptado para el funcionamiento a este régimen, admitiéndose la reducción de la potencia máxima utilizando la citada válvula reguladora de presión.

Por otra parte, la presión media eficaz que se puede conseguir con la sobrepresión que introduce el turbocompresor queda limitada a consecuencia de:

- Aumento de la temperatura de los pistones que puede llegar a 300°C.
- Aumento de la temperatura de los gases de escape que alcanza los 800°C.
- Aumento de la temperatura del aire de admisión, que llegaría a 150°C; esto se corrige utilizando el postenfriado del aire comprimido. ■

 **LUIS MÁRQUEZ**
DR. ING. AGRÓNOMO