

MOTORES TÉRMICOS

EVOLUCIÓN DEL

MECANISMO DE LA

DISTRIBUCIÓN EN LOS

MOTORES DE CUATRO

TIEMPOS MIF.

JOSÉ SANZ SANZ

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Diciembre 2001

INDICE:

1. OBJETO DEL TRABAJO.

2. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN TEÓRICO.

3. VARIACIONES EN EL DIAGRAMA TEÓRICO. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN REAL.

4. DISTRIBUCIÓN VARIABLE.

4.1. Variación del ángulo del árbol del levas con respecto a la corona.

4.2. Sistema encargado de variar la alzada de la válvulas.

4.2.1. Sistemas discretos.

4.2.1.1. i-VTEC (Honda)

4.2.1.2. VVTI-i (Toyota)

4.2.2. Sistemas continuos.

4.2.2.1. Optimización del llenado del cilindro.

4.2.2.2. Valvetronic.

4.2.2.2.1. Galería de imagenes.

1. OBJETO DEL TRABAJO.

El objeto del presente documento es explicar el funcionamiento de la distribución del motor alternativo de cuatro tiempos, sus limitaciones a lo largo de la historia, y los últimos avances que se han obtenido en esta materia en los motores de gasolina (MIF).

2. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN TEÓRICO.

El funcionamiento de las válvulas teórico de un motor alternativo de 4 tiempos es:

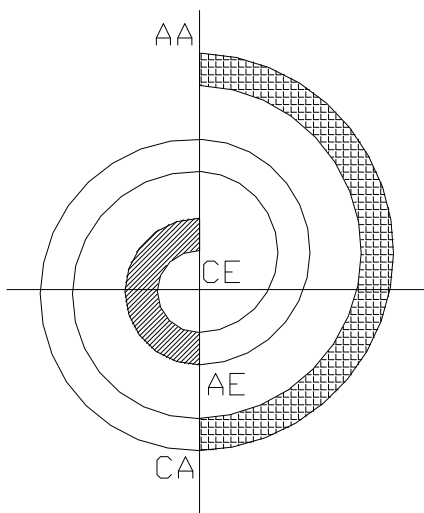


Fig. 1. Diagrama de distribución teórico

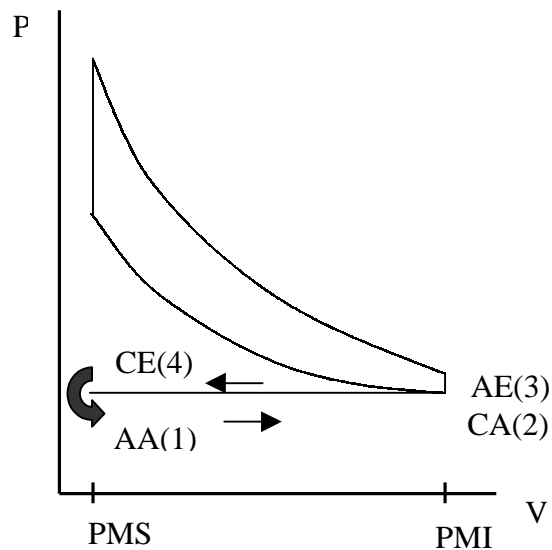


Fig. 2. Ciclo indicado teórico

Partiendo de la carrera de expansión, al llegar el embolo al PMI se abre instantáneamente la válvula de escape (AE) (ver figs. 1 y 2). Se inicia la carrera de ascensión provocando la expulsión de los gases quemados. Al llegar al PMS, se cierra la válvula de escape (CE), y se abre la de admisión instantáneamente (AA), permaneciendo abierta hasta que el pistón llegue al PMI, donde también de forma instantánea se cerrará (CA), pasando al tiempo de compresión.

3. VARIACIONES EN EL DIAGRAMA TEÓRICO. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN REAL.

Los tiempos de apertura y cierre de las válvulas no pueden ser instantáneos, ya que ello obligaría a tener aceleraciones infinitas en las partes móviles de la distribución provocando la rotura de las piezas.

Ello conlleva a que los elementos de la distribución tengan que tomarse un cierto tiempo desde que empiezan a abrir las válvulas hasta conseguir su total apertura.

Debido a ello el diagrama de la distribución teórico tiene variaciones, ya que para conseguir una apertura de válvulas plena en el inicio de la carrera hay que comenzar a abrir un poco antes.

En la practica para conseguir un mejor llenado del cilindro se puede aprovechar la energía cinética de los gases. Esto implica un aumento del rendimiento volumétrico del motor, y por tanto un aumento de potencia.

Para conseguirlo se adelantan y retrasan la apertura y cierre de las válvulas adecuadamente consiguiendo los siguientes efectos:

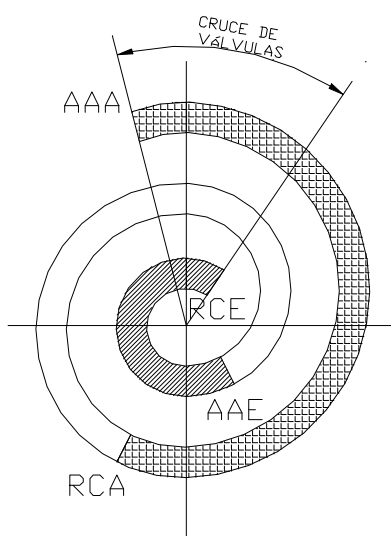


Fig. 3. Diagrama de distribución real

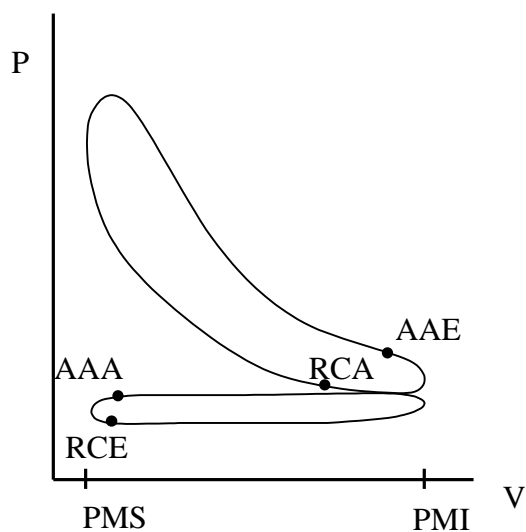


Fig. 4. Ciclo indicado real

1.- (AAA) Adelanto a la apertura de la admisión. En la carrera de escape antes de llegar al PMS (fig. 3), se abre la válvula de admisión para conseguir una total apertura al llegar a él, y disminuir así las pérdidas de presión de remanso a través de la válvula.

3.- (RCA) Retraso al cierre de la admisión. Los gases frescos al final de la carrera de admisión tienen una energía cinética que se puede utilizar para introducir más masa de aire en el cilindro una vez que el pistón ha llegado al PMI. Esto se consigue retrasando el cierre de la válvula de admisión un cierto ángulo.

4.- (AAE) Avance a la apertura del escape. Durante la expansión los gases a alta presión empujan el embolo hacia el PMI, transformando así parte de su energía en energía mecánica.

Antes de llegar al PMI se comienza a abrir la válvula de escape con lo que los gases al estar a mayor presión que la atmosférica salen hacia el exterior, de manera que al iniciarse la carrera de escape, la presión en el interior del cilindro es próxima a la atmosférica. Con ello se consigue una disminución del trabajo que absorbe el pistón al efectuar el barrido de los gases, a costa de no expansionar completamente los gases.

2.- (RCE) Retraso al cierre del escape. Durante la carrera de escape los gases quemados adquieren una energía cinética, por lo que si se retrasa el cierre de la válvula de escape, por estar la válvula de admisión abierta, los gases en su salida arrastran los gases residuales de la cámara de combustión siendo sustituidos por gases frescos. Con esto se consigue un aumento de la masa de gases frescos introducida en el cilindro.

El ángulo comprendido entre el AAA y el RCE se llama solape o cruce de válvulas.

Puesto que el régimen de giro en los motores de automoción no es constante, lo ideal sería que el diagrama de distribución variase con él, adaptando los ángulos de cierre y apertura de las válvulas a los valores que maximizan el área del bucle de alta del ciclo indicado (fig. 4). De esta manera se conseguiría una renovación de carga óptima en cualquier régimen de giro.

Por su sencillez el diagrama de distribución usado tradicionalmente en los motores de automoción es fijo, el cual se diseña para conseguir una renovación de la carga óptima a unas revoluciones determinadas.

Esto ha llevado a la clasificación de los motores en motores rápidos o lentos en función de si la renovación de la carga óptima se realiza a regímenes de giro elevados (buscando la mayor potencia), o a regímenes bajos (buscando una curva de par más plana propia de los motores elásticos).

Con el desarrollo de la electrónica, se ha hecho posible construir mecanismos capaces de variar el diagrama de la distribución lo suficientemente baratos y eficaces para poder fabricarlos en serie.

4. DISTRIBUCIÓN VARIABLE.

Una distribución variable es aquella capaz de variar los ángulos de los diagramas de la distribución.

Para conseguir un diagrama de distribución óptimo para cualquier régimen de giro del motor hay que conseguir variar independientemente los distintos ángulos de la distribución (AAA, RCA, AAE, RCE).

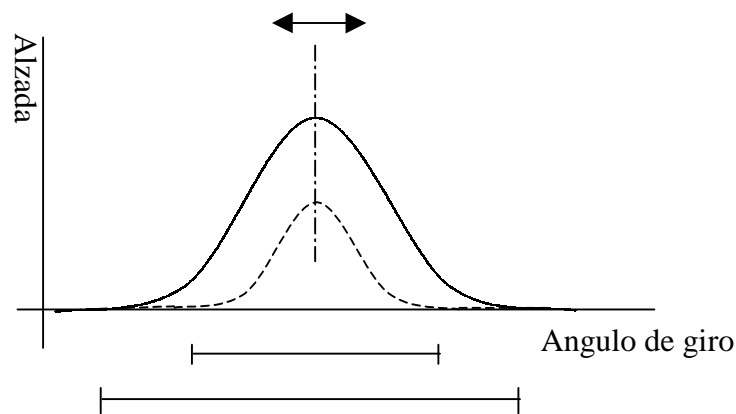


Fig. 5. Alzada de válvula en función del ángulo de giro del árbol de levas.

Para ello hay que disponer de un mecanismo de apertura de las válvulas, capaz de satisfacer de manera independiente estos dos objetivos:

1.- Variación de la alzada de válvula (fig. 5), con ello se consigue modificar simultáneamente el avance y cierre de la válvula, además de disminuir el área de paso de los gases frescos.

2.- Desplazamiento de la alzada de la válvula con respecto al cigüeñal.

De la combinación de estos dos movimientos es posible ajustar cada uno de los ángulos de manera independiente al valor deseado.

Actualmente existen diferentes sistemas ideados por distintas marcas, capaces de conseguir un diagrama de distribución variable. Los más conocidos son:

- i-VTEC de Honda.
- VVTI-i de Toyota.
- Bi-Vanos + Valvetronic de BMW.

Los tres mecanismos descritos constan de dos sistemas bien diferenciados. El primero se encarga de modificar el ángulo comprendido entre el árbol de levas y la corona que lo acciona, mientras que el segundo varia la alzada de la válvula de admisión.

4.1. Variación del ángulo del árbol de levas con respecto a la corona.

El sistema encargado de desplazar el ángulo del árbol de levas con respecto a la corona es muy similar en los tres.

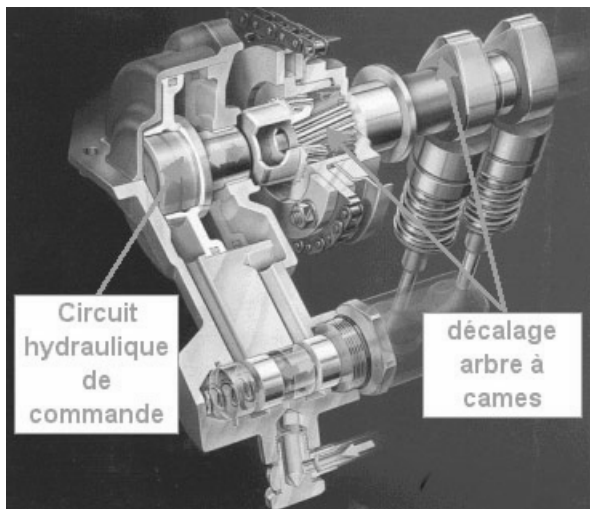


Fig. 6. Sistema Bi-VANOS de BMW

Para conseguirlo el árbol de levas ya no es solidario con la corona sino que se permite un cierto giro entre ambos. El acoplamiento entre uno y otro se realiza por medio de un estriado helicoidal, el cual puede desplazarse dentro de su alojamiento. En su recorrido, dicho estriado por ser helicoidal, produce un giro relativo entre la corona y el árbol de levas, consiguiéndose así el desplazamiento de la alzada de la válvula con respecto al cigüeñal.

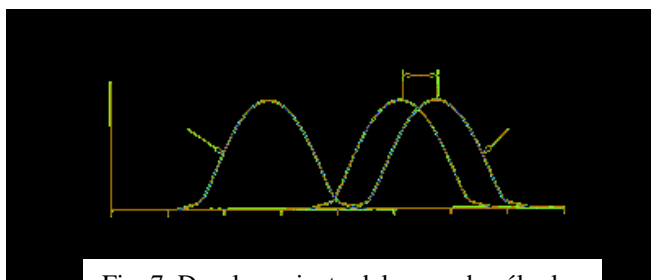


Fig. 7. Desplazamiento del cruce de válvulas del motor VVTI

Del control del mecanismo se encarga la unidad de control electrónica (UCE), la cual utilizando la información que recibe (posición del cigüeñal, posición del árbol de levas, régimen de giro etc) por medio de diferentes sensores, determina el ángulo de desfase.

4.2. Sistema encargado de variar la alzada de la válvulas.

Estos sistemas se pueden clasificar en dos:

4.2.1. Sistemas discretos.

Tienen dos o más estados de funcionamiento correspondientes a diferentes rangos de giro.

De ellos los más importantes son:

4.2.1.1. i-VTEC (Honda)

Consta de tres balancines (fig. 8), uno que acciona la válvula de admisión izquierda según la figura, otro que acciona la de la derecha, y otro intermedio que se hará solidario a los otros dos por medio de unos bulones.

Dichos balancines son accionados por medio de dos levas de distinto perfil, uno más agresivo que acciona el balancín intermedio, y el otro con un perfil más suave que acciona el balancín derecho.

Dependiendo del enclavamiento de los bulones se pueden obtener los siguientes estados de funcionamiento.

Estado 1. Por debajo de las 2500 rpm y con el motor con poca carga, los tres bulones están desenclavados con lo que los balancines pueden girar unos con respecto a los otros. El de más a la izquierda está apoyado sobre un anillo mecanizado en el árbol de levas, con lo que la alzada de la válvula correspondiente será nula, permaneciendo cerrada. El motor pues, estará funcionando en modo 12 válvulas. El balancín intermedio por no estar enclavado no acciona ninguna válvula.

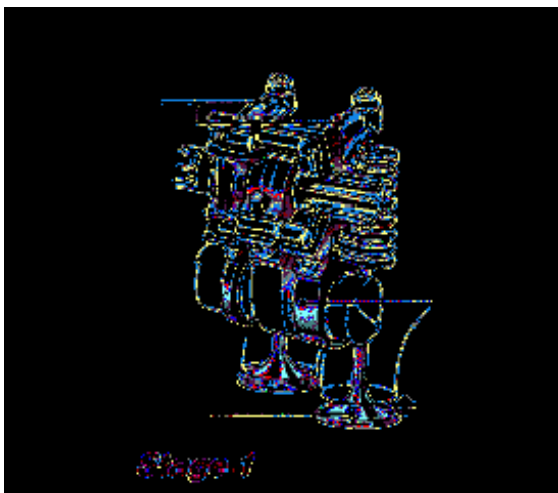


Fig. 8. i-VTEC. Estado 1

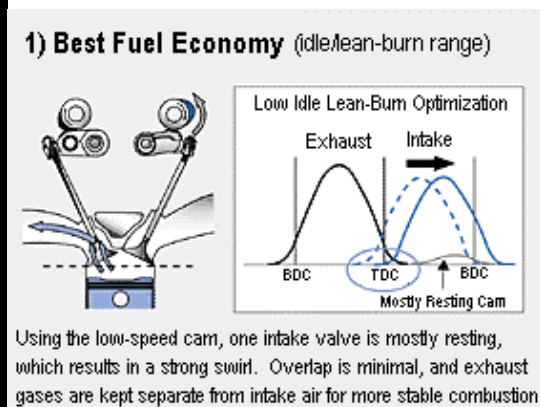


Fig. 9. i-VTEC. Estado 1

El balancín de la derecha es accionado por la leva de perfil más suavizado, accionando su correspondiente válvula, con lo que se obtiene un diagrama de distribución propio de un motor elástico con un rendimiento de la combustión alto.

Estado 2. Al sobrepasar las 2500 rpm o acelerar, se introduce presión al bulón superior (fig. 10), enclavándolo, con lo que los balancines extremos se hacen solidarios. Con ello las dos válvulas de admisión son accionadas por el perfil de leva más suave, funcionando el motor en modo 16 válvulas. El motor opera en este estado desde alrededor de la 2500 rpm hasta las 6000.

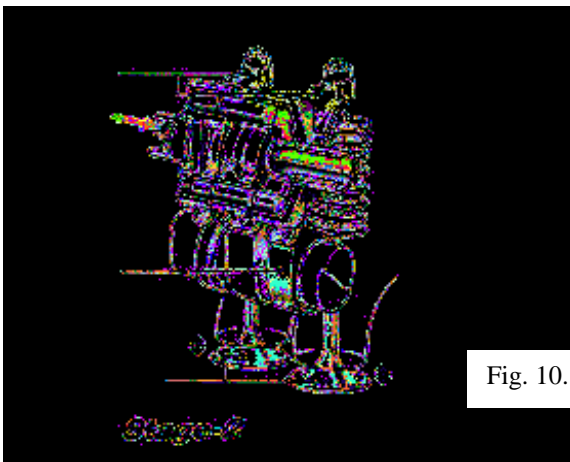


Fig. 10. i-VTEC. Estado 2

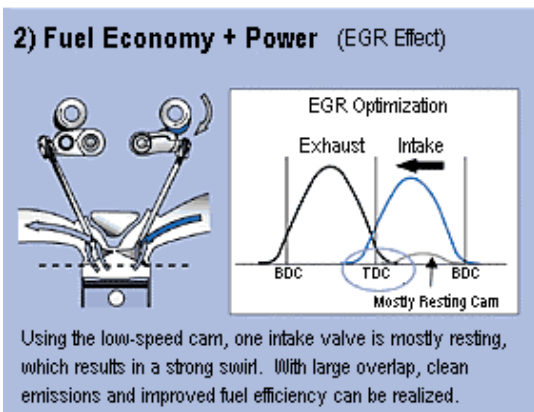


Fig. 11. i-VTEC. Estado 2

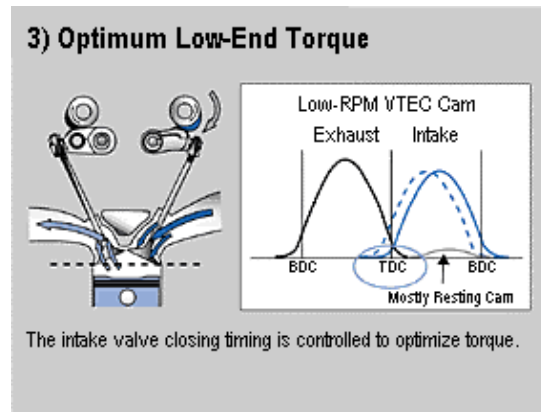


Fig. 12. i-VTEC. Estado 2

Estado 3. Cuando el motor sobrepasa las 6000 rpm se manda presión al bulón inferior (fig. 13), haciendo solidarios los tres balancines, con lo que pasan a ser accionados por el perfil de leva más agresivo. Con ello se consigue una mayor potencia, propia de un motor rápido.

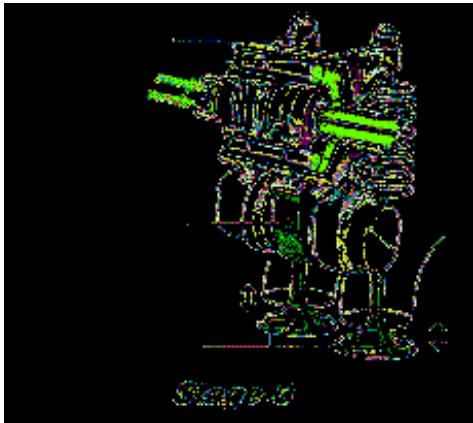


Fig. 13. i-VTEC. Estado 3

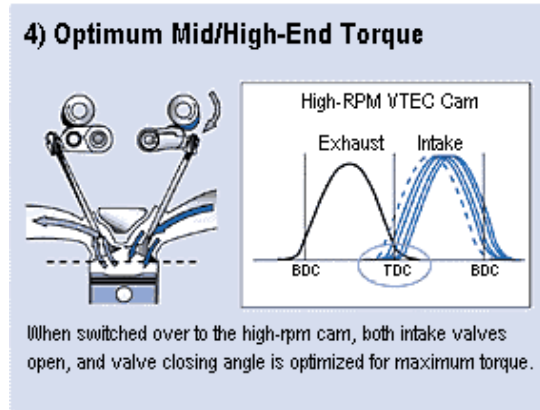


Fig. 14. i-VTEC. Estado 3

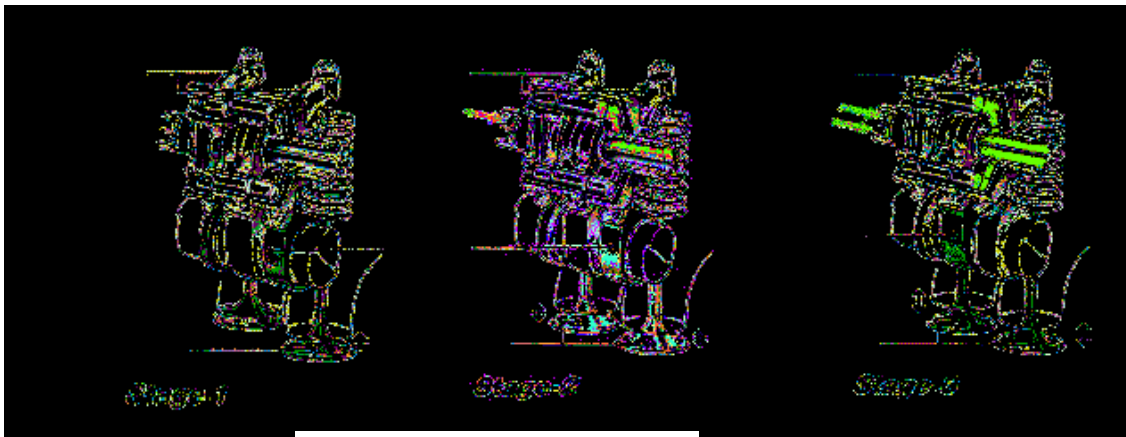


Fig. 15. i-VTEC. Estado 1,2, y 3

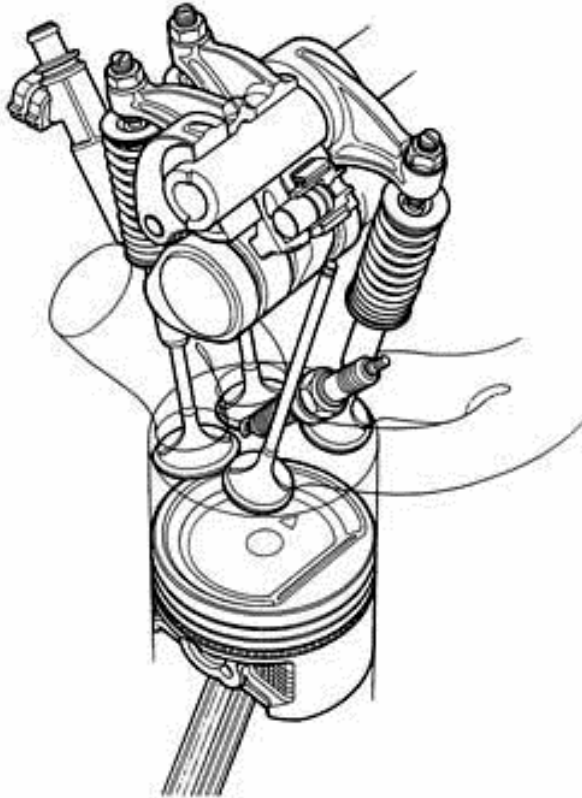


Fig. 16. Motor Honda i-VTEC.

4.2.1.2. VVTI-i (Toyota)

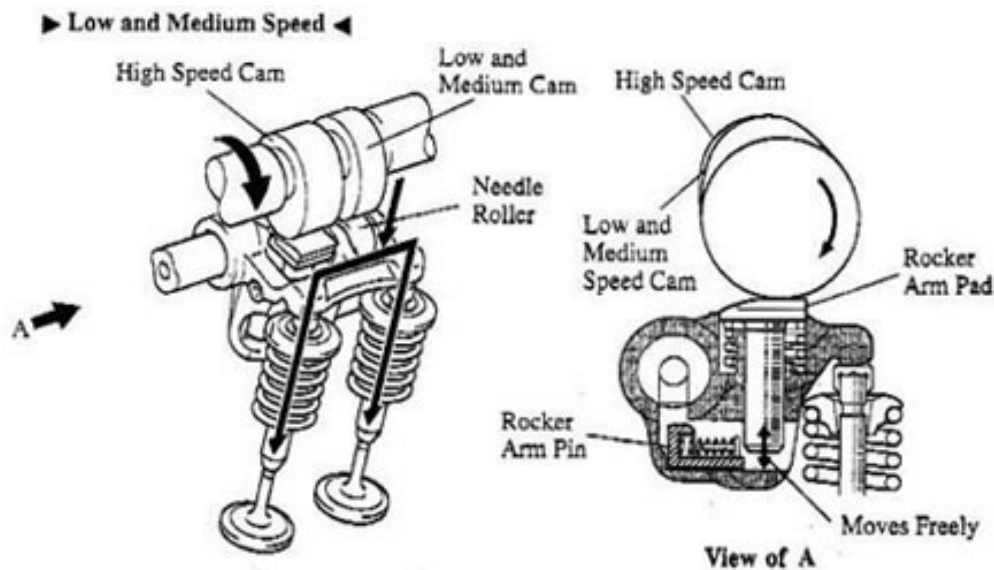


Fig. 17. VVTI-i. Funcionamiento para bajas y medias velocidades angulares

El mecanismo consta de un solo balancín, el cual acciona las dos válvulas de admisión a la vez.

Dicho balancín es accionado por dos levas de diferente perfil, uno más suave que el otro.

El apoyo del perfil de leva agresivo es un bulón al cual se le permite un cierto desplazamiento mientras no actúe un tope que se acciona hidráulicamente (fig. 17).

Cuando el motor funciona a bajas vueltas el tope no está accionado, con lo que el bulón sube y baja, de manera que el perfil de leva agresivo no acciona el balancín, siendo las válvulas accionadas por el perfil de leva suave.

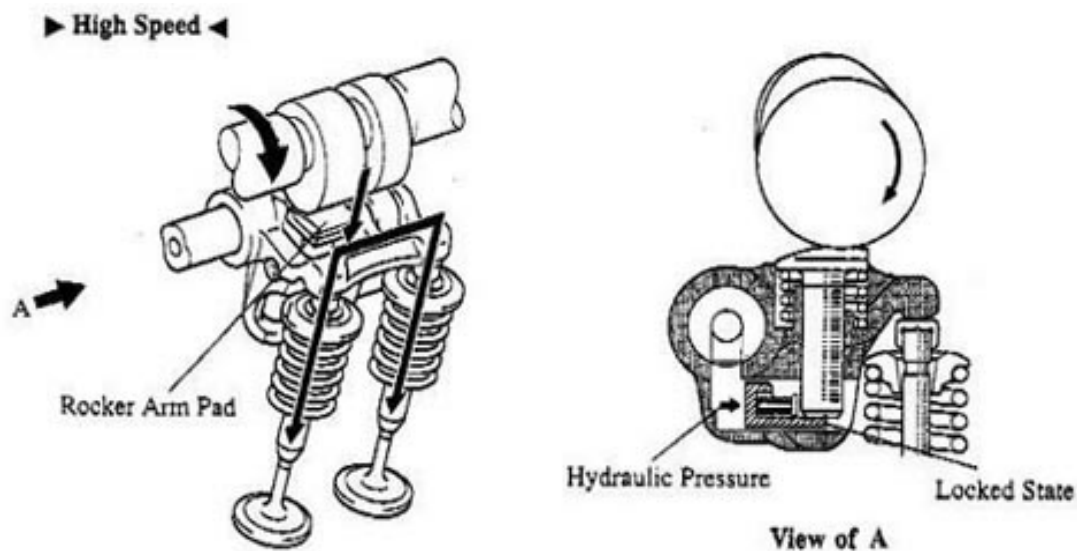


Fig. 18. VVTI-i. Altas velocidades angulares

A altas rpm, (fig.18), la unidad de control electrónica acciona la válvula hidráulica, con lo que enclavamiento se acciona bloqueando el bulón, de manera que es ahora el perfil de leva agresivo el que acciona a las válvulas consiguiéndose así un diagrama de distribución propio de un motor rápido.

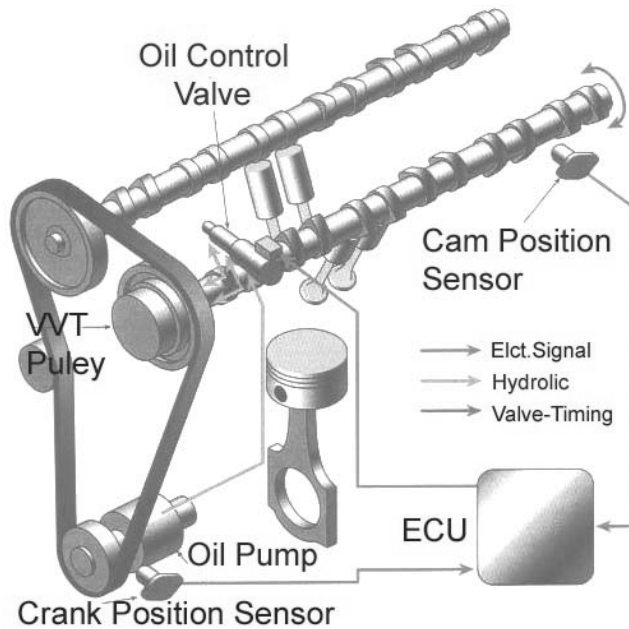


Fig. 19. VVTI-i. Esquema

4.2.2. Sistemas continuos.

Se caracterizan por tener la capacidad de variar los ángulos de la distribución de manera continua.

4.2.2.1. Optimización del llenado del cilindro.

Un efecto positivo derivado de tener un diagrama de distribución totalmente ajustable en los motores de gasolina, es el de poder conseguir que el elemento encargado de regular la carga en el motor sea la válvula de admisión, eliminando así la mariposa del acelerador y con ello la restricción al paso de los gases de admisión que supone.

El llenado parcial de los gases frescos durante la admisión se puede realizar de dos formas diferentes:

1.- Cierre de la válvula de admisión en la carrera de compresión.

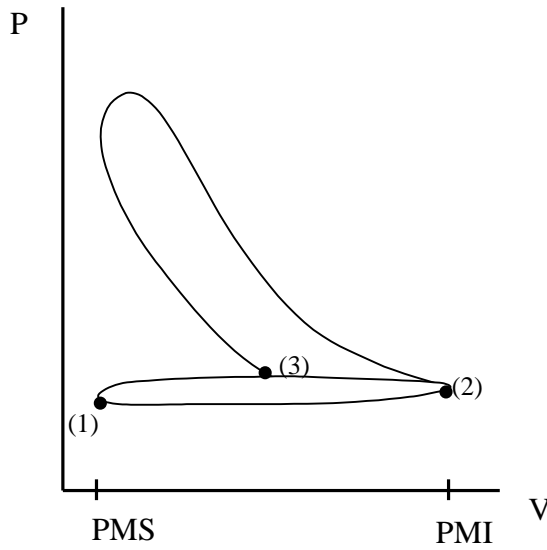


Fig. 20. Cierre de la válvula de admisión durante la carrera de compresión. Ciclo indicado.

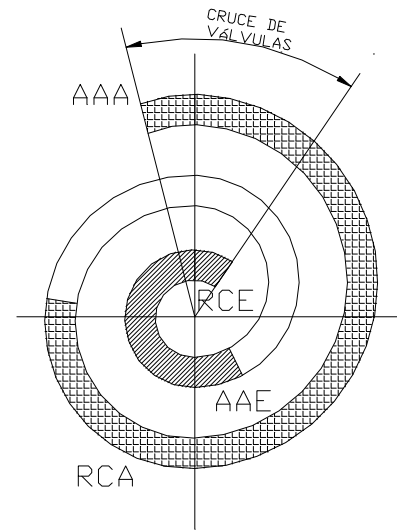


Fig. 21. Cierre de la válvula de admisión durante la carrera de compresión. Diagrama de distribución.

Al finalizar la carrera de escape (1) (fig. 20), se abre la válvula de admisión, permaneciendo abierta durante toda la carrera de admisión (1-2), y buena parte de la de compresión (3) (fig. 21), en donde se comenzará la compresión de la mezcla, con lo que el llenado del cilindro se realiza a una presión próxima a la atmosférica, disminuyendo así el trabajo absorbido por el embolo en la zona de bombeo del ciclo.

$$\tau_u = \int (P - P_{EXT}) \cdot dV$$

2.- Cierre de la válvula de admisión en la carrera de admisión.

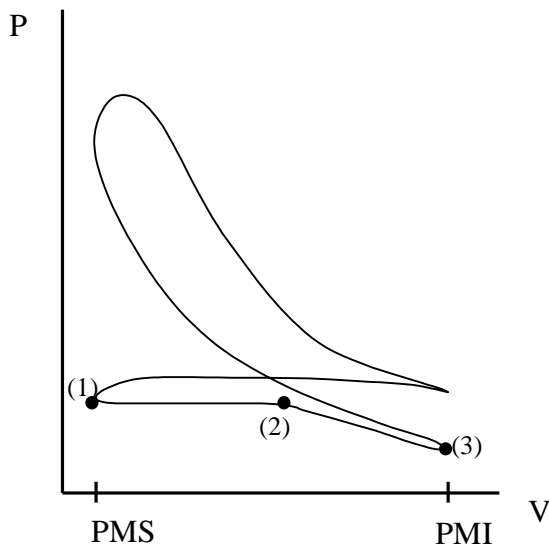


Fig. 22. Cierre de la válvula de admisión durante la carrera de admisión. Ciclo indicado.

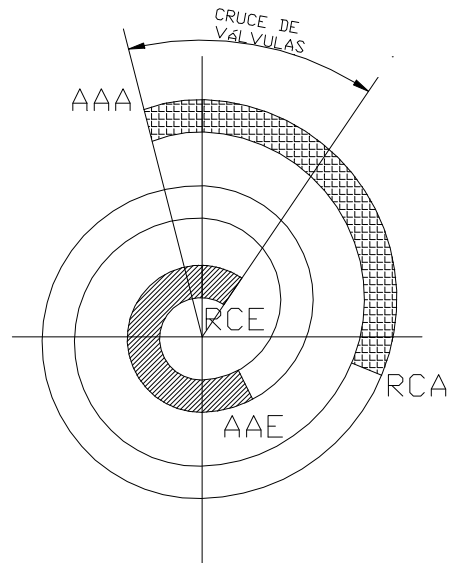


Fig. 23. Cierre de la válvula de admisión durante la carrera de admisión. Diagrama de distribución.

Al finalizar la carrera de escape (1)(fig. 22), se abre la válvula de admisión, hasta el instante en que el cilindro ha admitido los gases necesarios para su funcionamiento (2)(RCA en fig. 23), momento en el que se cierra dicha válvula provocándose un descenso de la presión en el interior del cilindro hasta que este llega al PMI (3), lo que implica una toma de trabajo al motor. Teóricamente este trabajo se debería devolver en la carrera de compresión si no fuera por la falta de estanqueidad entre los segmentos del pistón con el cilindro. Esto origina que debido a la diferencia de presiones entre gases provenientes del cárter que al ser comprimidos harán que el trabajo que se absorbe en la parte baja del ciclo sea mayor que cuando el cierre se hace durante la carrera de compresión.

4.2.2.2. Valvetronic.

BMW ha construido un mecanismo de distribución variable que debido al sistema de regulación de la alzada de válvulas de manera continua, ha conseguido eliminar la mariposa del acelerador con un sistema de inyección tradicional, siendo las propias válvulas de admisión las encargados de controlar la cantidad de mezcla que pasa al cilindro.

El resultado es una respuesta más rápida del acelerador, debido a que la regulación del caudal de aire se produce justo a la entrada de los cilindros y, por ello, se elimina la interferencia que causa la inercia del aire desde la mariposa.

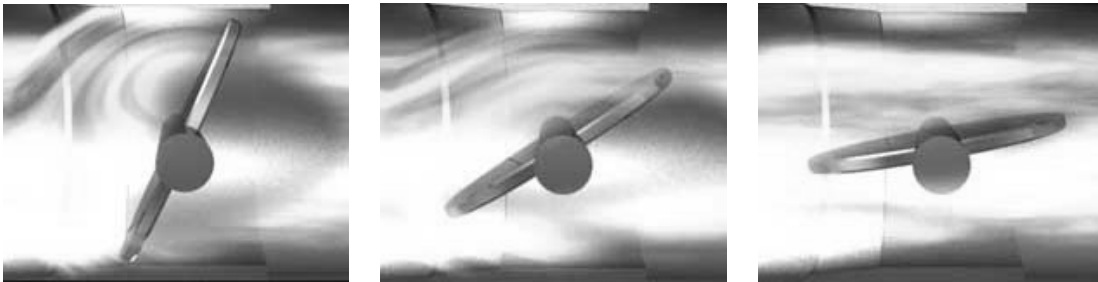
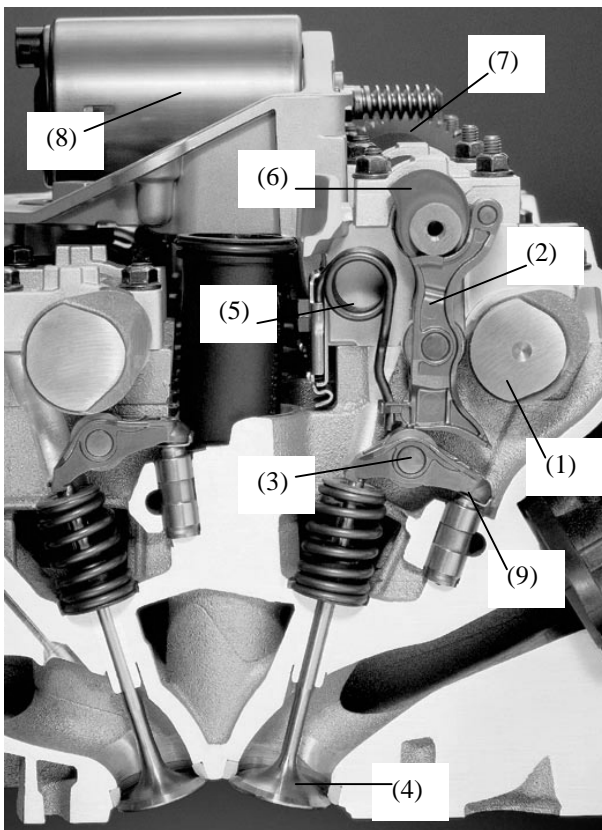


Fig 24. Interferencia causada por la mariposa del acelerador.

El mecanismo está compuesto por (fig. 25):



1. Árbol de levas (1).
2. Palanca intermedia (2).
3. Balancín (3).
4. Válvula de admisión (4).
5. Muelle de retroceso (5).
6. Excéntrica (6).
7. Tornillo sin fin (7).
8. Motor eléctrico (8).
9. Apoyo del balancín (9).

Fig. 25. VALVETRONIC. Componentes

El funcionamiento del sistema es el siguiente:

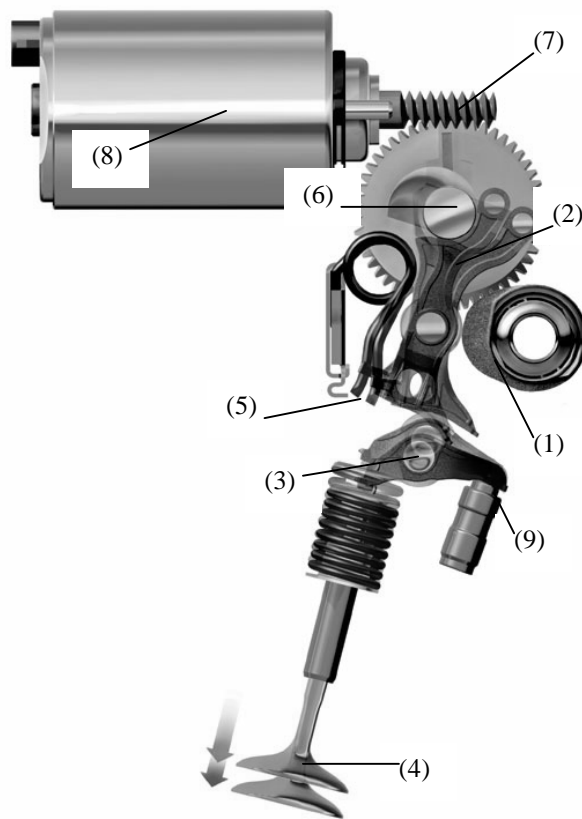


Fig. 26. VALVETRONIC. Funcionamiento

Cuando el motor ha de entregar su máxima potencia, la alzada de las válvulas es alta de modo que descubren una mayor sección de paso al aire, facilitando su entrada a los cilindros (violeta en la fig. 26).

Si se le hace funcionar a cargas bajas, la alzada se reduce, de forma que la sección de paso es menor, limitando de este modo la entrada de aire (verde en la fig. 26).

La alzada de las válvulas puede variar desde los 0,0 a los 9,7 milímetros, en función del aire necesario para la combustión.

Para conseguir esa variación, el balancín (3) que empuja a la válvula (4) no es directamente accionado por la leva (1), como ocurre en la mayoría de los motores, sino por una palanca intermedia (2) que, a su vez, recibe el movimiento de la leva (1) y, al bascular sobre su

apoyo (9), empuja la válvula (4).

Cada una de estas palancas, una por cada válvula de admisión, están unidas a un mismo eje excéntrico (6), accionado por un motor eléctrico (8), encargado de controlar su posición. Es la posición en la que se encuentran cuando la leva actúa sobre ellas la que determina cuánto se elevarán las válvulas de admisión sobre su asiento, dejando libre el paso a la mezcla entrante.

Un procesador de 32 bits, físicamente independiente de la centralita del motor (UCE), controla el movimiento del motor eléctrico (8), que coloca estos actuadores intermedios (2), en la posición requerida. El tiempo necesario para cambiar la carrera de las válvulas desde la mínima a la máxima alzada es de 300 ms, el mismo que necesita el sistema de distribución variable Bi-VANOS, en ajustar los tiempos de apertura.

La regulación del caudal de aire de entrada se sigue consiguiendo a costa de introducir una restricción a su paso por las válvulas de admisión, y por tanto, de unas ciertas pérdidas por bombeo, pero las pérdidas a través de las válvulas de admisión del motor Valvetronic son menores que la suma de las que se producen en la válvula del acelerador y las de admisión de un motor convencional.

Únicamente para funciones de diagnóstico y en caso de avería del sistema, el motor Valvetronic de BMW sigue equipando una válvula de mariposa convencional a la entrada del conducto de admisión, que en condiciones normales permanece completamente abierta, ofreciendo una resistencia despreciable a la entrada del aire.

Gracias a todo ello, BMW anuncia una reducción del consumo de un 10% en las situaciones más comunes de conducción, cuando el motor está trabajando a cargas parciales. O lo que es lo mismo, cuando la válvula de mariposa debería estar obstruyendo en mayor medida el paso de aire.

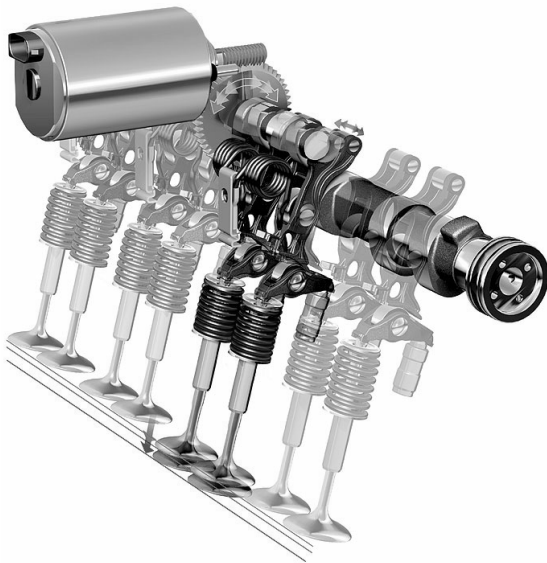


Fig. 27. Valvetronic . Perspectiva del mecanismo

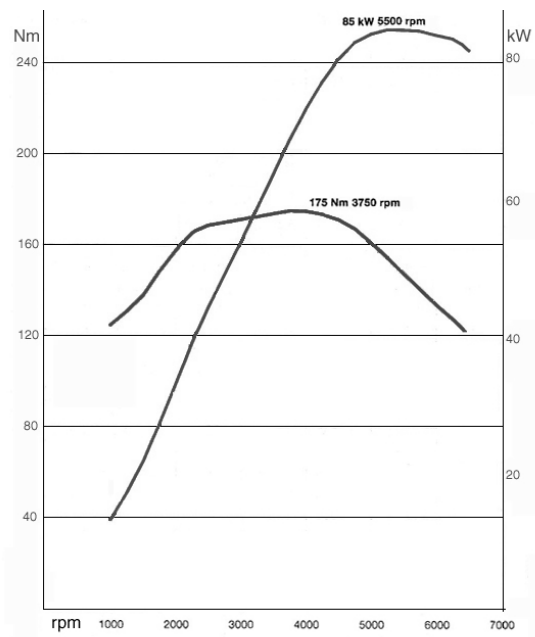


Fig. 28. Curvas de par y potencia del motor 1.8 de BMW equipado con el sistema Valvetronic. Diámetro 84 mm.