CINEMÁTICA Y DINÁMICA DEL MOTOR

CINEMÁTICA DEL MOTOR

Como ha sido expuesto, el movimiento del pistón se transforma en movimiento circular del cigüeñal gracias a un sistema biela - manivela.

Figura 1.- Sistema biela - manivela.

Para determinar la velocidad y la aceleración del pistón es necesario determinar en primer lugar la ecuación de posición del pistón en función del ángulo girado por el cigüeñal.

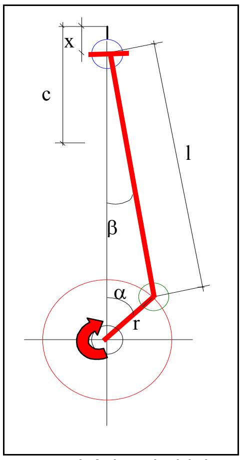

Figura 2.- Esquema básico de biela-manivela.

Para ello si:

l: longitud de la biela.
r: radio de la manivela.
C: carrera del pistón.
x: posición del pistón referida al punto muerto superior.
α: ángulo girado por el cigüeñal contado desde el punto muerto superior.
β: Ángulo que forma la biela con el eje del cilindro.

Se puede obtener observando la figura anterior que:

$$\boxed{\mathbf{x = r \bullet (1 - \cos\alpha) + l \bullet (1 - \cos\beta)}}$$

En la expresión anterior el desplazamiento del pistón **x** se expresa en función de α y de β, por lo que para calcularlo sólo en función del ángulo girado por el cigüeñal, es necesario proceder como se presenta a continuación:

Por tener un lado común los triángulos cuya hipotenusas son la biela y la muñequilla de cigüeñal, se puede establecer que:

$$\mathbf{r \bullet sen\,\alpha = l \bullet sen\,\beta \Rightarrow sen\,\beta = \frac{r \bullet sen\,\alpha}{l}}$$

llamando λ a la relación entre la longitud de la manivela y la de la biela, que en los motores actuales es del orden de 0.33, se tiene que:

$$\lambda = \frac{\mathbf{r}}{\mathbf{l}} \Rightarrow \mathbf{sen}\beta = \lambda \bullet \mathbf{sen}\alpha \Rightarrow \beta = \mathbf{arcsen}(\lambda \bullet \mathbf{sen}\alpha)$$

De la expresión anterior se obtiene β para cada posición α de la manivela.

Como: $\mathbf{cos}\,\beta = \sqrt{\mathbf{1 - sen^2}\,\beta}$, sustituyendo $\mathbf{sen}\,\beta$ por su valor en función de α, se tiene que:

$$\boxed{\mathbf{cos}\,\beta = \sqrt{\mathbf{1} - \lambda^{\mathbf{2}} \bullet \mathbf{sen^2}\,\alpha}}$$

Sustituyendo este valor se tiene la expresión del desplazamiento del pistón en función del ángulo girado por la manivela, cuya ecuación es la que se presenta a continuación:

$$\boxed{\mathbf{x = r \bullet (1 - cos}\,\alpha) + \mathbf{l} \bullet \left(\mathbf{1} - \sqrt{\mathbf{1} - \lambda^{\mathbf{2}} \bullet \mathbf{sen^2}\,\alpha}\right)}$$

La representación gráfica de la ecuación anterior en unos ejes cartesianos en los que en abscisas se tome el ángulo girado por el cigüeñal y en ordenadas el valor del desplazamiento angular del pistón, ofrece una gráfica como la que se presenta a continuación:

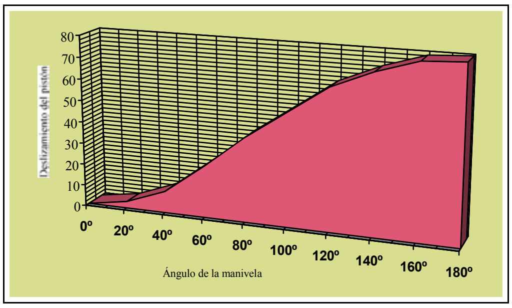

Figura 3.- Diagrama de desplazamiento del pistón.

De la observación del diagrama anterior se desprende que para un movimiento angular de la manivela $\alpha = \mathbf{90^o}$, el pistón recorre una longitud mayor que la mitad de la carrera. Esto significa que, si la velocidad de giro del cigüeñal es constante, para recorrer la primera mitad de la carrera el motor emplea un tiempo menor que para recorrer la segunda mitad.

Se puede demostrar analíticamente que, en el instante que el pistón recorre la mitad de la carrera, la biela y la manivela están formando noventa grados.

La velocidad se calcula mediante la expresión:

$$\mathbf{V = dx / dt}$$

es decir, hallando la derivada del espacio con respecto al tiempo.

La expresión hallada anteriormente:

$$\boxed{\mathbf{x = r \bullet (1 - \cos\alpha) + l \bullet \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \bullet sen^2\,\alpha}\right)}}$$

también puede expresarse, teniendo en cuenta que:

$$\mathbf{l = \frac{r}{\lambda}} \Rightarrow$$

como sigue:

$$\boxed{\mathbf{x = r \bullet \left[(1 - \cos\alpha) + \frac{1}{\lambda} \bullet \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \bullet sen^2\,\alpha}\right)\right]}}$$

Como **x** esta expresada en función **α,** y hay que calcular su derivada respecto al tiempo se debe expresar:

$$\boxed{\mathbf{V = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\alpha} \bullet \frac{d\alpha}{dt}}}$$

Considerando la velocidad angular del cigüeñal constante, se tiene que:

$$\omega = \frac{\mathbf{d\alpha}}{\mathbf{dt}}$$

Por lo que se puede expresar que:

$$\mathbf{V = r \cdot \left(sen\,\alpha + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^2 \cdot 2 \cdot sen\,\alpha \cdot cos\,\alpha}{2 \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot sen^2\,\alpha}} \right) \cdot \omega}$$

Expresión en la que la velocidad angular del motor ω se expresa en rad/s.

Como **r** es mucho más pequeño que **l** y como $sen^2\,\alpha$ tiene como valor máximo la unidad es posible, sin cometer gran error, despreciar el término $\mathbf{\lambda^2 \bullet sen^2\,\alpha}$, por lo que la expresión $\mathbf{\sqrt{1 - \lambda^2 \bullet sen^2\,\alpha}}$ puede considerarse que tiende a **1**. Por tanto, la velocidad del pistón puede calcularse mucho más fácilmente, de forma aproximada, mediante la expresión:

$$\boxed{\mathbf{V = \omega \bullet r \bullet (sen\alpha + \lambda \bullet sen\alpha \bullet cos\alpha)}}$$

Como:

$$\mathbf{sen\,\alpha \bullet cos\,\alpha = \frac{sen\,2\alpha}{2}}$$

se puede expresar la velocidad mediante la ecuación:

$$\boxed{\mathbf{V = \omega \bullet r \bullet \left(sen\,\alpha + \frac{\lambda}{2} \bullet sen\,2\alpha \right)}}$$

Si en unos ejes cartesianos en los que se toman en abscisas el ángulo girado por el cigüeñal y en ordenadas la velocidad del pistón la representación gráfica de la expresión no simplificada de la velocidad ofrece de una gráfica como la que se representa en la siguiente figura:

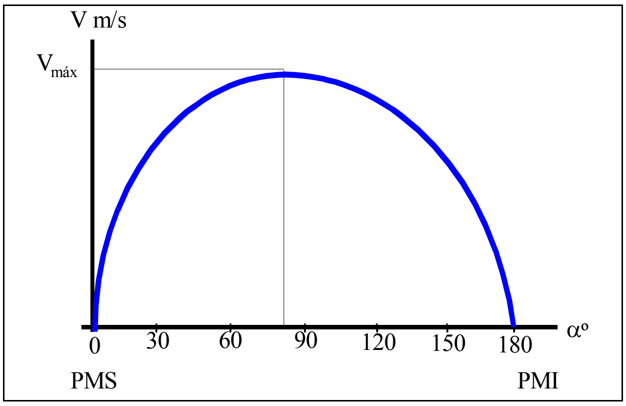

Figura 4.- Diagrama de la velocidad del pistón.

La observación de la figura anterior indica que, tanto en el punto muerto superior como en el inferior, la velocidad del pistón es nula, y que, a partir del punto muerto superior, aumenta hasta llegar a un valor máximo que coincide con el instante en el que biela y manivela son perpendiculares, disminuyendo a continuación hasta que en el punto muerto inferior se hace de nuevo nula.

Estas variaciones de la velocidad indican la existencia de aceleraciones **a**, cuyo valor vendrá dado por la derivada de la velocidad respecto al tiempo:

$$\boxed{\mathbf{a} = \frac{\mathbf{dV}}{\mathbf{dt}}}$$

Como la expresión de la velocidad es función del ángulo girado por el cigüeñal, para poder derivar en función del tiempo se recurre a considerar:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{dV}}{\mathbf{dt}} = \frac{\mathbf{dV}}{\mathbf{d}\alpha} \bullet \frac{\mathbf{d}\alpha}{\mathbf{dt}}$$

Y como se expresó anteriormente:

$$\omega = \frac{\mathbf{d}\alpha}{\mathbf{dt}}$$

derivando se llega a que:

$$\boxed{\mathbf{a} = \omega^2 \bullet \mathbf{r} \bullet (\cos\alpha + \lambda \bullet \cos 2\alpha)}$$

La representación gráfica, en unos ejes cartesianos en los que se toma en abscisas el valor del ángulo girado por el cigüeñal y en ordenadas el de la aceleración del pistón, ofrece una gráfica como la que se representa a continuación:

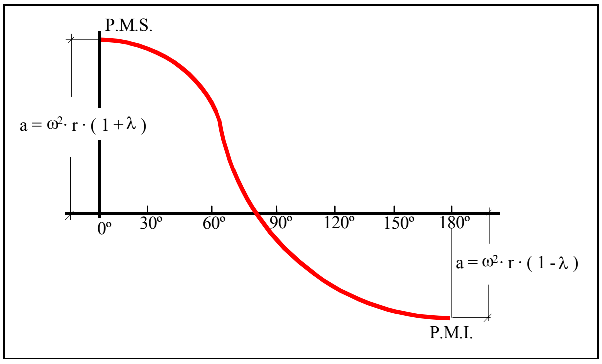

Figura 5.- Diagrama de la aceleración del pistón en función de los ángulos de rotación de la manivela.

El análisis de la gráfica anterior indica que:

- El valor de la aceleración es nulo cuando es máxima la velocidad del pistón, instante que coincide cuando biela y manivela son perpendiculares.

- La aceleración tiene un máximo en el punto muerto superior, que corresponde con $\alpha = \mathbf{0}$, cuyo valor es:

$$\boxed{\mathbf{a} = \omega^2 \bullet \mathbf{r} \bullet (\mathbf{1} + \lambda)}$$

- La aceleración tiene un mínimo en el punto muerto inferior, que corresponde α **= 180º**, en el cual se tiene $\cos\alpha = \mathbf{1}$ y $\cos 2\alpha = \mathbf{-1}$, cuyo valor es:

$$\boxed{\mathbf{a} = -\omega^2 \bullet \mathbf{r} \bullet (\mathbf{1} - \lambda)}$$

DINÁMICA DEL MOTOR

Las variaciones en la aceleración del pistón, generan en el motor fuerzas variables y, por tanto, vibraciones indeseables, las cuales es preciso considerar.

El cálculo de las fuerzas de inercia que se generan se puede hacer mediante la segunda ley de Newton:

$$\mathbf{F} = -\mathbf{m} \bullet \mathbf{a}$$

expresión en la que $\mathbf{m}$ es la masa y **a** la aceleración.

En el sistema biela- manivela hay partes que están claramente sometidas al movimiento alterno estudiado, como son el pistón, los segmentos, el bulón y el pie de biela, y otras, como son la manivela, el pie de biela, los brazos de la muñequilla del cigüeñal y los cojinetes que giran con ella que están sometidas a una fuerza centrífuga expresada mediante la ecuación:

$$\mathbf{F_c} = \mathbf{m_c} \bullet \omega^2 \bullet \mathbf{r_c}$$

expresión en la que ω representa la velocidad angular, $\mathbf{m_c}$ es la masa dotada de movimiento centrífugo y $\mathbf{r_c}$ es la distancia desde su centro de gravedad al eje de giro.

Para calcular la fuerza de inercia y la fuerza centrífuga es necesario aclarar cuales son las masas dotadas de movimiento alterno y cuales las dotadas de movimiento circular, $\mathbf{m_a}$ y $\mathbf{m_c}$ respectivamente.

La única duda la ofrece la biela, ya que se puede considerar que parte de ella está sometida a movimiento alterno y que la parte restante se mueve con movimiento circular.

Como norma se considera que un tercio de su masa se mueve con la cabeza y los dos tercios restantes con el pie.

Se consideran, con aproximación más que suficiente, concentradas sobre el pistón:

- Pistón completo con sus segmentos.
- Bulón del pistón y partes externas.
- Pie de la biela y dos tercios de la caña.

Se consideran concentradas sobre la muñequila del cigüeñal:

- Manivela con sus brazos.
- Cabeza de biela completa y un tercio de la caña.

Las fuerzas alternas actúan según el eje del cilindro.

Las fuerzas centrífugas actúan pasando constantemente por el centro de giro del cigüeñal.

En la ecuación de Newton, sustituyendo **a** por la expresión hallada, se tiene la fuerza de inercia debida a las masas alternas, o fuerza alterna de inercia:

$$\boxed{\mathbf{F_a} = -\mathbf{m_a} \cdot \omega^2 \cdot \mathbf{r} \cdot (\cos\alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha)}$$

La expresión anterior tiene dos sumandos: uno de valor $\mathbf{m_a} \cdot \omega^2 \cdot \mathbf{r} \cdot \cos\alpha$, que se denomina *fuerza alterna de inercia de primer orden*, y otro, de valor $\mathbf{m_a} \cdot \omega^2 \cdot \mathbf{r} \cdot \lambda \cdot \cos 2\alpha$, que se denomina *fuerza alterna de inercia de segundo orden*.

La representación gráfica de ambos sumandos en unos ejes cartesianos en los que se tomen en el eje de abscisas los valores del ángulo girado por el cigüeñal y en ordenadas los valores de las fuerzas alternas de inercia de primero y segundo orden se tiene una gráfica coma la que se representa en la figura siguiente:

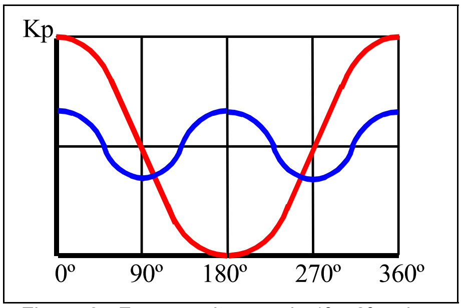

Figura 6.- Fuerzas alternas de 1º y 2º orden.

Las fuerzas alternas de inercia son causa de vibraciones en los motores.

Para comprender lo que se ha expuesto se ha representado en unos ejes cartesianos, tomando en abscisas el ángulo girado por el cigüeñal y en ordenadas la resultante de las fuerzas alternas de inercia y de las debidas a la presión del gas de un motor monocilíndrico de 4 tiempos. Para hacerlo se han considerado positivas las fuerzas cuya resultante coincide con el movimiento del pistón, y *negativas*, en el caso contrario.

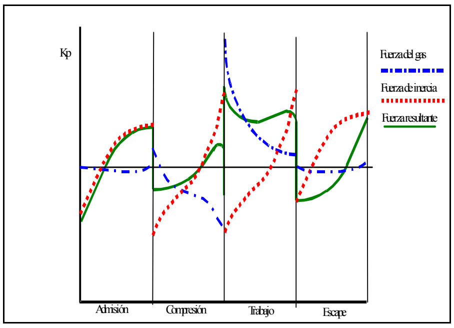

Figura 7.- Influencia de las variaciones del régimen sobre el diagrama resultante.

Es lógico que en la gráfica anterior aparezca reflejado que en la carrera de admisión, la fuerza de inercia es mucho mayor que la originada por la depresión que se produce en el interior del cilindro, necesaria para que se llene de gases frescos. Que en la compresión la fuerza de más importancia sea la debida al gas. Que durante la carrera de trabajo la fuerza de inercia se opone a la de los gases, y que durante el escape, como la fuerza debida a los gases es tan sólo la necesaria para su circulación, ésta es mínima en comparación con la fuerza alterna de inercia.

También es lógico que a bajo régimen las fuerzas más importantes son las debidas al gas. Que a régimen de crucero las fuerzas de inercia alcancen valores importantes respecto a las debidas a la presión del gas, y que a alto régimen las fuerzas de inercia sean las de más importancia.

Esto explica que las partes dotadas de movimiento alterno deban ser muy livianas, para que la velocidad de rotación pueda alcanzar valores altos sin que aparezcan tensiones capaces de producir roturas en los elementos del motor.

EQUILIBRADO DEL MOTOR

Las fuerzas alterna y centrífuga de los órganos en movimiento y la debida a las presiones del gas, dan origen a fuerzas y a momentos que actúan sobre la estructura del motor.

Como dichas fuerzas y momentos son variables en el tiempo, si no se realiza su equilibrado, aparecerán vibraciones indeseables, que además de hacer más incomoda su utilización, generarán averías por la aparición de fatigas en sus elementos.

Con el equilibrado del motor se busca anular la resultante de las referidas fuerzas y momentos.

- El equilibrio de las fuerzas centrífugas se realiza considerando el cigüeñal como un eje que lleva, a una distancia **r** de su eje de rotación, las masas centrífugas.

Su equilibrado se consigue cuando lo esté tanto estática como dinámicamente.

El cigüeñal está *equilibrado estáticamente* cuando su baricentro se halla sobre el eje de rotación, lo que en la práctica se da cuando apoyado en dos puntos no tenga tendencia a moverse.

En el caso del cigüeñal de un motor monocilindro al no estar equilibrado estáticamente precisa de contrapesos. Para ello se colocan dos masas m_{c1} cuyo centro de gravedad está situado a una distancia r_{c1} y r_{c2} del eje de giro que cumplen que:

$$\boxed{\mathbf{m_{c1} \bullet r_{c1} + m_{c2} \bullet r_{c2} = m_c \bullet r}}$$

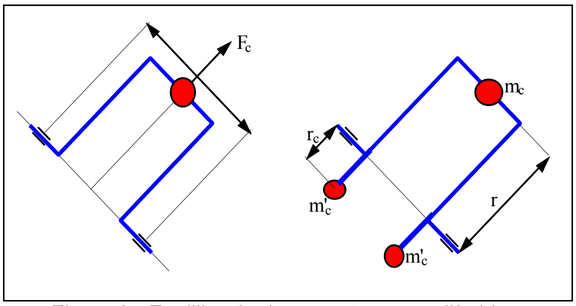

Figura 8.- Equilibrado de un motor monocilíndrico.

En el caso de un motor de dos cilindros, cuyo cigüeñal tenga una forma como la representada en la figura siguiente, el equilibrio estático no precisa contrapesos.

El cigüeñal está *equilibrado dinámicamente* cuando es nula la resultante de los momentos generados por las fuerzas centrífugas tomados con respecto a un punto cualquiera del eje.

Si se considera el cigüeñal de un motor de dos cilindros, como se representa en la figura siguiente, es evidente que sus momentos estáticos respecto al eje de rotación están en equilibrio, pero haciendo girar el cigüeñal se produce en cada manivela, una fuerza centrífuga y como estas dos fuerzas centrífugas no están sobre la misma línea, sino que están separadas estará sometido a un momento no equilibrado. Por consiguiente, están satisfechas las condiciones de equilibrio estático, pero no lo están de equilibrio dinámico.

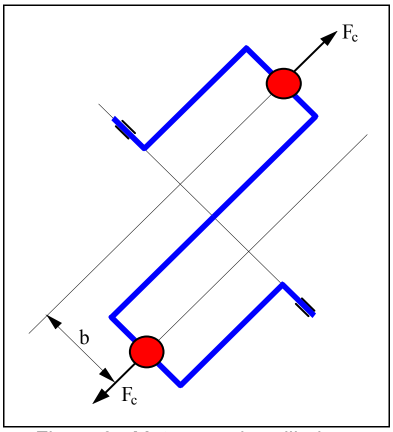

Figura 9.- Motor con dos cilindros.

En la práctica cuando los cigüeñales tienen un número de manivelas par y superior a dos estarán equilibrados dinámicamente cuando, conseguido el equilibrio estático, admiten un plano de simetría perpendicular al eje de rotación. Si esta condición no se da, puede lograrse mediante contrapesos.

Es evidente que los cigüeñales que tienen un número de manivelas impar, sólo pueden equilibrarse con la ayuda de contrapesos.

- La fuerza alterna de inercia, como ha sido expuesto, está dirigida según el eje del cilindro y puede considerarse como la suma de la fuerza alterna de primer orden y la fuerza alterna de segundo orden.

La fuerza alterna de inercia de primer orden, $\mathbf{F_a' = m_a \bullet \omega^2 \bullet \cos\alpha}$, puede ser considerada como la proyección sobre el eje del cilindro de una fuerza centrífuga de valor $\mathbf{m_a \bullet \omega^2 \bullet r}$, generada por una masa $\mathbf{m_a}$, igual a la masa alterna y puede ser equilibrada con los métodos usados para la fuerza centrífuga.

Por tanto, esta fuerza se podría equilibrar haciendo girar dos masas de valor $\mathbf{m_a / 2}$ cuyo centro de gravedad estuviera a una distancia $\mathbf{r}$ de su eje de giro, sincronizadamente con el cigüeñal, de manera que la resultante de sus fuerzas centrífugas fuese nula según su componente en la perpendicular al eje del cilindro e igual y opuesta a la fuerza alterna de inercia de primer orden.

De igual modo, la fuerza alterna de segundo orden, cuyo valor se obtiene mediante la expresión $F_a'' = -m_a \bullet \omega^2 \bullet r \bullet \lambda \bullet \cos 2\alpha$, puede ser imaginada como la proyección sobre el eje del cilindro de una fuerza centrífuga, $m_a \bullet \omega^2 \bullet r \bullet \lambda$, originada por una masa cuya velocidad de giro es el doble de la de la fuerza de primer orden, y podría ser equilibrada de forma semejante a como ha sido expuesto, mediante contrapesos girando con doble velocidad angular que el cigüeñal.

En la práctica las fuerzas alternas de inercia no se equilibran, pues los efectos de las vibraciones que generan en la estructura del motor no son suficientemente importantes como para montar los referidos contrapesos.

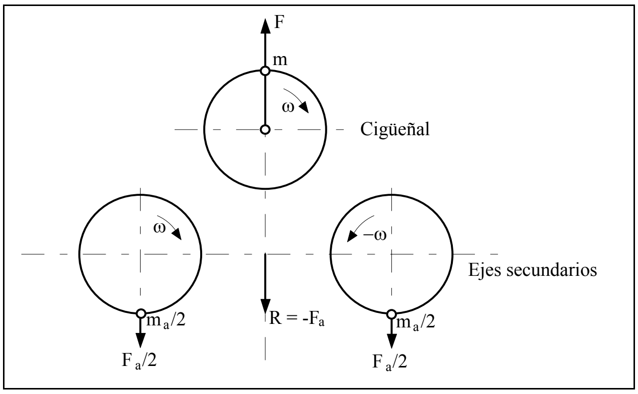

Figura 10.- Equilibrado de una fuerza de 1º orden con dos fuerzas centrífugas.

PAR MOTOR

La fuerza resultante según el eje del cilindro que actúa sobre el pistón, suma de la fuerza alterna de inercia y de la fuerza del gas, puede descomponerse en dos fuerzas, una F_b que actúa según la biela y otra F_n que actúa normal a la pared del cilindro.

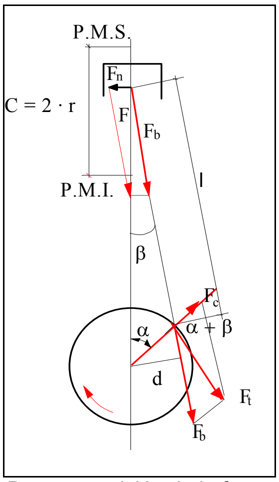

Figura 11.- Descomposición de la fuerza resultante para el cálculo del momento motor.

Los valores de dichas fuerzas son:

$$\boxed{F_b = \frac{F}{\cos\beta}}\ ;\ \boxed{F_n = F \bullet \operatorname{tg}\beta}$$

La fuerza F_b es la causa de la pérdida de potencia por rozamiento del pistón contra las paredes del cilindro y la que genera su desgaste.

Es la fuerza F_b la que, al ser transmitida por la biela, actúa sobre la manivela y sobre el eje del cigüeñal origina un par motor **M** dado por:

$$\boxed{M = F_b \bullet d}$$

Como:

$$d = r \bullet \operatorname{sen}(\alpha + \beta)$$

Se tiene:

$$M = \frac{F}{\cos\beta} \bullet r \bullet \operatorname{sen}(\alpha + \beta) \Rightarrow$$

$$\boxed{M = F \bullet r \bullet \left[\operatorname{sen}\alpha + \cos\alpha \frac{\operatorname{sen}\beta}{\cos\beta}\right]}$$

Como:

$$\operatorname{sen}\beta = \lambda \bullet \operatorname{sen}\alpha \Rightarrow \cos\beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \bullet \operatorname{sen}^2\alpha}$$

Resulta la expresión:

$$\boxed{M = F \bullet r \bullet \left[\operatorname{sen}\alpha + \frac{\lambda \bullet \operatorname{sen}\alpha \bullet \cos\alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \bullet \operatorname{sen}^2\alpha}}\right]}$$

Y despreciando el término $\lambda^2 \bullet \operatorname{sen}^2\alpha$, se tiene:

$$\boxed{M = F \bullet r \bullet \left[\operatorname{sen}\alpha + \frac{\lambda}{2} \bullet \operatorname{sen}2\alpha\right]}$$

Representando en un par de ejes cartesianos colocando en abscisas el ángulo α girado por el cigüeñal y en ordenadas el par motor ofrecido, en un motor monocilíndrico de cuatro tiempos se tiene una gráfica semejante a la que se presenta a continuación.

Figura 12.- Diagrama de para motor para un monocilindro.

Su forma pulsante, si no se compensa mediante sistema capaz de acumular los excesos de energía y restituirla cuando es necesaria, puede ser causa de irregularidad de marcha y de vibraciones. Esto se evita con el denominado volante de inercia.

MOTORES PLURICILÍNDRICOS. REPARTO DE CICLOS

Este tipo de motores está formado por varios cilindros situados en uno o más bloques unidos entre sí, cuyas bielas actúan sobre un *cigüeñal común*, y tienen como objetivos primarios aumentar la potencia, conseguir una rotación más uniforme y alcanzar mayor número de revoluciones, y como objetivos secundarios reducir las solicitaciones , conseguir mayor suavidad y tener una velocidad de rotación más uniforme.

Aunque los motores pluricilíndricos tienen mayor número de elementos, lo que complica la construcción, la encarece y aumenta la posibilidad de averías, por el hecho de que en cada dos vueltas del cigüeñal se produzcan tantas carreras de trabajo como cilindros tengan, el giro es más uniforme, el volante de inercia más pequeño y los cambios de régimen requieren menos tiempo.

Estos motores se fabrican con sus cilindros en línea, opuestos y en V, siendo normal que por facilidad de equilibrado se construyan con número par.

- Los *motores con cilindros en línea* más generalizados son los de cuatro cilindros y se construyen tanto para ciclo Otto como para ciclo Diesel.

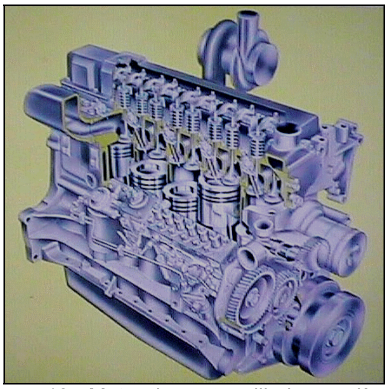
Figura 13.- Motor de cuatro cilindros en línea.

- Los *motores en V* se construyen con los cilindros en dos bloques unidos en un cárter común formando un cierto ángulo.

Estos motores resultan muy compactos, y se fabrican de 6 a 12 cilindros.

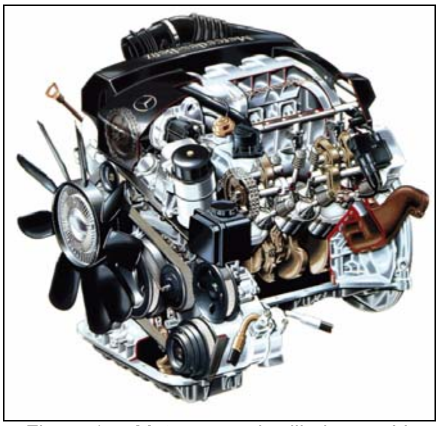
Figura 14.- Motor con seis cilindros en V.

- Los *motores con cilindros horizontales opuestos*, son motores en V en los que los dos bloques de cilindros forman un ángulo de 180º.

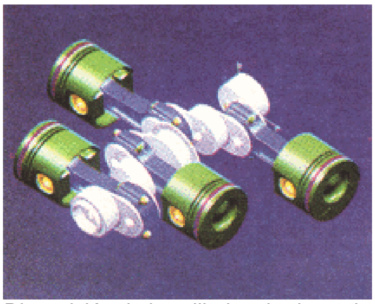
Figura 15.- Disposición de los cilindros horizontales opuestos.

En los motores con varios cilindros, para hacer uniforme el par motor las carreras de trabajo han de sucederse con intervalos regulares, para ello es necesario que entre cada dos carreras de trabajo el cigüeñal gire un ángulo de:

$$\boxed{\theta = 180 \bullet \frac{t}{n}}$$

Siendo:

t: Número de tiempos.
n: número de cilindros.

Esto, junto a la disposición de las manivelas a la que obliga el equilibrado del cigüeñal obliga a considerar un orden lógico de encendido o de inyección del combustible.

• En el caso de un *motor de cuatro tiempos con dos cilindros horizontales* el desfase entre los encendidos debe ser de $\alpha = \mathbf{180^o \cdot \frac{4}{2} = 360^o}$, y el cigüeñal debe tener una conformación como la que se presenta en la siguiente figura:

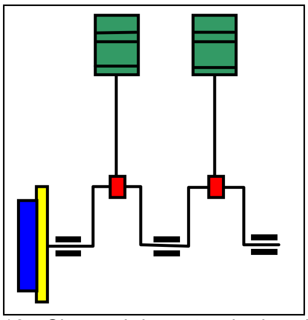

Figura 16.- Cigüeñal de motor de dos cilindros

El orden lógico de encendido se obtiene de la siguiente tabla, en la que para cada cilindro se presentan las diferentes carreras del ciclo:

	0º	180º	360º	540	º720º
1	A	C	T	E	
2	T	E	A	C	

Tabla 1.- Orden de encendido (cuatro tiempos).

De la observación de la tabla anterior se desprende que el orden de encendido tiene que ser:

$\boxed{\mathbf{1-2}}$

• En el caso de *motores de cuatro tiempos con cuatro cilindros en línea*, que son los más utilizados actualmente, las muñequillas del cigüeñal deben estar dispuestas en un ángulo α = $\mathbf{180^o \cdot \frac{4}{4} = 180^o}$ y las condiciones de equilibrio obligan a la conformación del cigüeñal que se presenta en la siguiente figura:

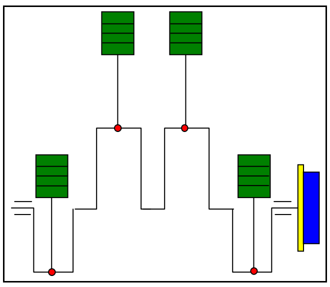

Figura 17.- Cigüeñal de motor de cuatro cilindros.

El orden lógico de encendido se obtiene de las siguientes tablas, en las que, para cada cilindro, se presentan las diferentes carreras del ciclo:

	0º	180º	360º	540º	720º
1	T	E	A	C	
2	C	T	E	A	
3	E	A	C	T	
4	A	C	T	E	

	0º	180º	360º	540º	720º
1	T	E	A	C	
2	E	A	C	T	
3	C	T	E	A	
4	A	C	T	E	

Tabla 2.- Motor de cuatro cilindros en línea.

Los posibles órdenes de encendido son:

$\boxed{\mathbf{1-3-4-2}}$ y $\boxed{\mathbf{1-2-4-3}}$

• En los *motores de cuatro tiempos con seis cilindros en línea* el cigüeñal debe llevar sus muñequillas dispuestas a α = $\mathbf{180^o \cdot \frac{4}{6} = 120^o}$ y las condiciones de equilibrio obligan a su conformación como se presenta en la siguiente figura:

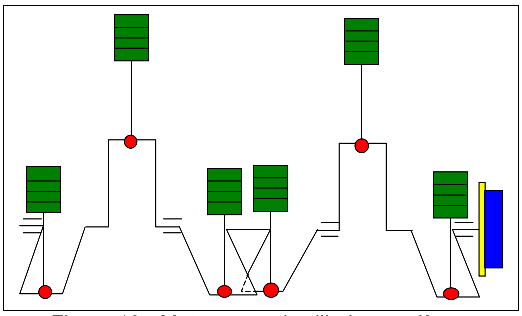

Figura 18.- Motor con seis cilindros en línea.

Construyendo tablas como las presentadas anteriormente, el orden lógico de encendido en este tipo de motores puede ser:

$\boxed{\mathbf{1-5-3-6-2-4}}$
$\boxed{\mathbf{1-3-5-6-4-2}}$

• De igual manera se llega a demostrar que uno de los posibles órdenes de encendido de los *motores de cuatro tiempos y ocho cilindros en línea* es $\boxed{\mathbf{1-6-2-5-8-3-7-4}}$ y que el de un *motor de cuatro tiempos con seis cilindros en V* puede ser $\boxed{\mathbf{1-3-6-5-4-2}}$.