

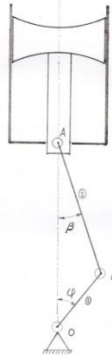
## 2: Análisis de las cargas del motor.

Para la determinación de las cargas se empleó la metodología descrita a continuación, la cual permitió construir las curvas de velocidad, aceleración y fuerza de los movimientos alternativos del pistón. A las cargas inerciales del pistón se les sumó la presión de los gases, de esta manera se alcanza el análisis dinámico.

### 2.1 - Análisis cinemático del mecanismo biela-manivela.

Este análisis es fundamental para calcular las fuerzas de inercia que actúan sobre todos los elementos móviles. En la figura \_\_3\_\_ se muestra el esquema del mecanismo biela-manivela sobre el cual se realizará el análisis.

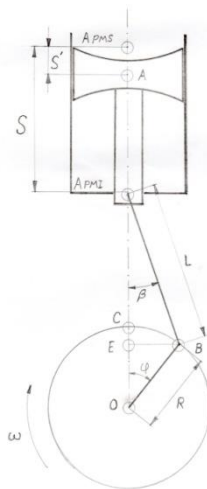
Fig. No- 7 : Esquema del mecanismo biela-manivela.



Donde la manivela está representada por el elemento 1, la biela es representada por el elemento 2. Los puntos O, B y A representan el eje de giro del cigüeñal, el par cinemático biela-manivela y biela-pistón respectivamente. Los ángulos  $\varphi$  y  $\beta$  representan el ángulo de rotación de la manivela contando desde el eje del cilindro cuando el pistón está en PMS y el ángulo que forma el eje de la biela en el plano de su movimiento con el eje del cilindro.

En la figura \_\_8\_\_ se pueden observar las convenciones tomadas para el análisis cinemático.

Fig. No- 8 : Convenciones de análisis para el mecanismo biela-manivela.



Donde  $S'$  representa la posición instantánea del pistón,  $S$  la carrera del pistón,  $A_{PMS}$  la posición del mecanismo en el punto muerto superior,  $A_{PMI}$  la posición del mecanismo en el punto muerto inferior y  $\omega$  la velocidad angular de la manivela en rad/s.

#### 2.1.1 - Determinación de la velocidad angular. ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \omega = \frac{3,14 \cdot 2750 \text{ min}^{-1}}{30} \omega = 287,833 \text{ rad/s}$$

2.1.2 - Determinación del desplazamiento del pistón. (S').

$$S' = R * (1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} * (1 - \cos 2\varphi)$$

$$S' = 0,04415 \text{ m} * ((1 - \cos 80^\circ) + \frac{0,3}{4} * (1 - \cos 160^\circ)) \quad S' = 0,0429 \text{ m}$$

Nota: Este desplazamiento depende directamente del ángulo de giro del cigüeñal, por lo que su posición varía en la misma medida que gira el cigüeñal.

En este caso tomamos  $\varphi = 80^\circ$  para realiza el cálculo del desplazamiento; así como para el resto de los cálculos que varían con el ángulo de giro del cigüeñal.

2.1.3 - Determinación de la velocidad instantánea del pistón. (v).

$$V = R * \omega * (\frac{\lambda}{2} * \sin 2\varphi + \sin \varphi)$$

$$V = 0,04415 \text{ m} * 287,833 \text{ rad/s} * (\frac{0,3}{2} * \sin (2 * 80) + \sin 80) V = 13,1667 \text{ m/s}$$

2.1.4 - Determinación de la aceleración instantánea del pistón. (a).

$$a = R * \omega^2 * (\cos \varphi + \lambda * \cos 2\varphi)$$

$$a = 0,04415 \text{ m} * (287,833 \text{ rad/s})^2 * (\cos 80 + 0,3 * \cos (2 * 80)) a = -395.9846 \text{ m/s}^2$$

2.1.5 - Determinación de la velocidad tangencial del extremo de la manivela. (Um).

$$Um = R * \omega \quad Um = 0,04415 \text{ m} * 287,833 \text{ rad/s} \quad Um = 12.7078 \text{ m/s}$$

2.1.6 - Determinación de la aceleración centrípeta del extremo de la manivela. ( $\epsilon_m$ ).

$$\epsilon_m = R * \omega^2 \quad \epsilon_m = 0,04415 \text{ m} * (287,833 \text{ rad/s})^2 \quad \epsilon_m = 3657,7320 \text{ m/s}^2$$

2.1.7 - Determinación de la velocidad media del pistón. (Vm).

$$Vm = \frac{2}{\pi} * R * \omega$$

$$Vm = \frac{2}{3,14} * 0,04415 \text{ m} * 287,833 \text{ rad/s} \quad Vm = 8,0942 \text{ m/s}$$

2.1.8 - Determinación de la velocidad máxima del pistón. (Vmax).

$$Vmax = R * \omega * \sqrt{1 + \lambda^2}$$

$$Vmax = 0,04415 \text{ m} * 287,833 \text{ rad/s} * \sqrt{1 + (0,3)^2} \quad Vmax = 13,2674 \text{ m/s}$$

2.2 - Análisis dinámico del mecanismo biela-manivela.

En el proceso del diseño mecánico de los elementos del motor se deben tener en cuenta las fuerzas de inercia del motor, cuando se trata de un nuevo motor y no se tienen planos (como es el caso) se debe partir de unas aproximaciones iniciales para las masas de los elementos móviles, según indicativos de motores actuales.

2.2.1 - Selección de los parámetros iniciales para el cálculo dinámico del motor.

Para fines de análisis dinámico se define  $m_p$  como la masa del grupo pistón,  $m_b$  como la masa de la biela. Para simplificar el cálculo de las fuerzas de inercia se agrupan todas las piezas del grupo pistón con la parte de la masa de la biela que aporta a la inercia del movimiento alternativo, la masa que participa en el movimiento lineal alternativo se calcula con la ecuación:

$$m_j = m_p + k \cdot m_b$$

Para la determinación de  $m_j$  se asume una masa específica constructiva del grupo pistón

$m_p' = m_p \cdot A_p$  y del grupo de la biela  $m_b' = m_b \cdot A_p$  según la tabla 5, referida a la unidad de superficie del pistón y también la parte  $k$ , la cual constituye la masa de biela que participa en el movimiento alternativo ( $k = 0,25 - 0,275$ ).

Tabla No. 5: Masa específica ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) de los elementos del mecanismo biela-manivela.

Elementos del mecanismo biela-manivela	Motores a gasolina para diámetro del pistón (m)		Diésel para diámetro D del pistón (m)	
Grupo pistón	60 - 80	80 - 100	80 - 100	100 - 120
Aleación de Aluminio	80 - 120	100 - 150	155 - 220	200 - 300
Fundición de hierro	150 - 200	180 - 250	250 - 320	300 - 400
Biela	100 - 150	130 - 200	250 - 320	300 - 400

Para efectos de este trabajo se tomarán  $300 \text{ kg}/\text{m}^2$  para la masa específica de la biela ( $m_b$ ) y  $100 \text{ kg}/\text{m}^2$  para la masa específica del pistón ( $m_p$ ).

2.2.2 - Determinación del área del pistón. ( $A_p$ ).

$$A_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,075 \text{ m})^2}{4} = 0,0044 \text{ m}^2$$

2.2.3 - Determinación de la masa específica de la biela. ( $m_b$ ).

$$m_b = A_p \cdot 300 \text{ Kg}/\text{m}^2 = 0,0045 \text{ m}^2 \cdot 300 \text{ Kg}/\text{m}^2 = 1,35 \text{ Kg}$$

2.2.4 - Determinación de la masa específica del pistón. ( $m_p$ ).

$$m_p = A_p \cdot 100 \text{ Kg}/\text{m}^2 = 0,0045 \text{ m}^2 \cdot 100 \text{ Kg}/\text{m}^2 = 0,45 \text{ Kg}$$

2.2.5 - Determinación de la masa del motor que participa en el movimiento lineal alternativo. ( $m_j$ ).

$$m_j = m_p + k \cdot m_b$$

Elegimos un valor de  $k = 0,25$

$$m_j = 0,45 \text{ kg} + (0,25 \cdot 1,35 \text{ kg}) = 0,7875 \text{ kg}$$

De manera general en un motor de combustión interna alternativo (MCIA) se pueden encontrar durante su funcionamiento: fuerzas de inercia de las masas en movimiento alternativo  $F_j$ , las fuerzas de los gases  $F_g$  y las fuerzas centrífugas de inercia de las masas en rotación  $K_r$ . Como consecuencia de las fuerzas mencionadas, surgen las fuerzas de fricción; las fuerzas de resistencia útil en el árbol cigüeñal, las reacciones en los apoyos del cigüeñal y del motor.

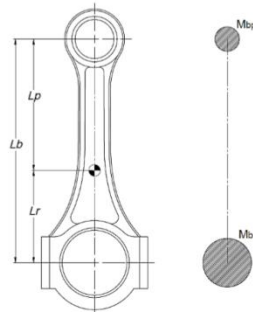
En el mecanismo se pueden encontrar las siguientes aceleraciones:

- Aceleración lineal del grupo pistón.
- Aceleración angular de la manivela por la rotación de la misma.
- Aceleración lineal del centro de gravedad de la biela y angular de la biela.

Para realizar el análisis dinámico se despreciarán las fuerzas de fricción y se considerará que el motor se encuentra en régimen de trabajo estable, es decir que su velocidad de rotación es constante. Debido a

que el movimiento de la biela es complejo, se reemplazará la biela por un sistema de dos masas concentradas en sus pares cinemáticos, despreciando los efectos de la aceleración angular de la misma. El sistema planteado se muestra en la Fig 5.

Fig. No- 9: Sistema equivalente de la biela.



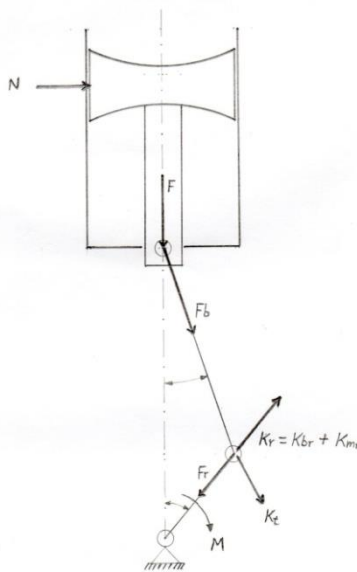
Donde se cumple que:

- $m_{bp} = m_b * 0,25$   $m_{bp} = 1,35 \text{ kg} * 0,25 = 0,3375 \text{ kg}$
- $m_{br} = m_b * 0,75$   $m_{br} = 1,35 \text{ kg} * 0,75 = 1,0125 \text{ kg}$

### 2.3 - Cálculo dinámico del mecanismo biela-manivela. (MBM).

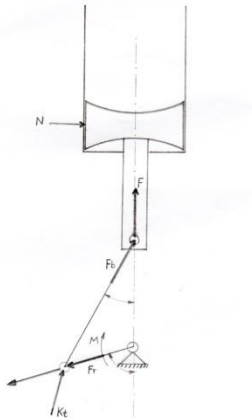
La figura 10 representa las convenciones tomadas y las fuerzas analizadas en el movimiento descendente del pistón.

Fig. No- 10: Convenciones para el análisis dinámico en el movimiento descendente del pistón.



La figura \_11\_ representa las convenciones tomadas y las fuerzas analizadas en el movimiento ascendente del pistón.

Fig. No- 11 : Convenciones para el análisis dinámico en el movimiento ascendente del pistón.



### 2.3.1 - Determinación de la fuerza de presión de los gases.(Fg).

$$F_g = 10^6 * (p - p_0) * A_p$$

Donde:

$p$  ... Presión indicada de los gases sobre el pistón.

$P_0$  ... Presión en el cárter del pistón.

$A_p$ ..Área de la sección del pistón.

El planteamiento anterior es para los motores convencionales, en nuestro caso tenemos que determinar la fuerza de presión de los gases (aire) en ambas caras del pistón y en todas sus carreras; por lo que procederemos de la forma siguiente:

.  $p$  --- Presión indicada del aire = 30,3975 Mpa.

.  $p_0$  – presión del vacío = 0,00 Mpa

#### Análisis del movimiento descendente del pistón.

- Fuerza de empuje en la cara superior del pistón ( $F_{g1}$ ).

$$F_{g1} = 10^6 * (p - p_0) * A_{p1}$$

Donde:

$A_{p1}$ ..Área útil de la cara superior del pistón. ( $m^2$ ).

$$A_{p1} = \pi * \frac{D^2}{4} = 3,14 * \frac{(0,075 m)^2}{4} \quad A_{p1} = 0,0044 m^2$$

#### Sustituyendo en $F_{g1}$ :

$$F_{g1} = 10^6 * (30.3975 Mpa - 0.00 Mpa) * 0.0044 m^2 \quad F_{g1} = 133 749.00 Mpa m^2$$

- Fuerza de succión en la cara inferior del pistón ( $F_{g2}$ ).

$$F_{g2} = 10^6 * (p - p_0) * A_{p2}$$

Donde:

$A_{p2}$ ..Área útil de la cara inferior del pistón. ( $m^2$ ).

$$A_{p2} = (D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} = ((0,075 \text{ m})^2 - (0,025 \text{ m})^2) \cdot \frac{\pi}{4} \quad A_{p2} = 0,0039 \text{ m}^2$$

4

Sustituyendo en  $F_{g2}$ :

$$F_{g2} = 10^6 \cdot (30,3975 \text{ Mpa} - 0,00 \text{ Mpa}) \cdot 0,0039 \text{ m}^2 = 118550,25 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2$$

- Fuerza resultante en el pistón en el movimiento descendente ( $F_{gRD}$ ).

$$F_{gRD} = F_{g1} + F_{g2} = 133\,749,00 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2 + 118550,25 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2 = 252299,25 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2$$

Análisis del movimiento ascendente del pistón.

- Fuerza de empuje en la cara inferior del pistón ( $F_{g3}$ ).

$$F_{g3} = 10^6 \cdot (p - p_0) \cdot A_{p2}$$

Sustituyendo en  $F_{g3}$ :

$$F_{g3} = 10^6 \cdot (30,3975 \text{ Mpa} - 0,00 \text{ Mpa}) \cdot 0,0039 \text{ m}^2 = 118550,25 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2$$

- Fuerza de succión en la cara superior del pistón ( $F_{g4}$ ).

$$F_{g4} = 10^6 \cdot (p - p_0) \cdot A_{p1}$$

Sustituyendo en  $F_{g4}$ :

$$F_{g4} = 10^6 \cdot (30,3975 \text{ Mpa} - 0,00 \text{ Mpa}) \cdot 0,0044 \text{ m}^2 = 133\,749,00 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2$$

- Fuerza resultante en el pistón en el movimiento ascendente ( $F_{gRA}$ ).

$$F_{gRA} = F_{g3} + F_{g4} = 118550,25 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2 + 133\,749,00 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2 = 252299,25 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^2$$

2.3.2 - Determinación de la fuerza de inercia de las masas en movimiento alternativo. ( $F_j$ ):

$$F_j = -m_j \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (\cos \varphi + \lambda \cdot \cos 2\varphi)$$

$$F_j = -0,7875 \text{ kg} \cdot 0,04415 \text{ m} \cdot (287,833 \text{ rad/s})^2 \cdot (\cos 80 + 0,3 \cdot \cos (2 \cdot 80))$$

$$F_j = 311,8379 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

2.3.3 - Determinación de la fuerza resultante sobre el pasador del pistón (bulón) y dirigida a lo largo del eje del cilindro. ( $F$ ):

$$F = F_g + F_j$$

Donde:

$$F_g = F_{gRD} = F_{gRA} = 252299,25 \text{ N}; \text{ ya que ambas fuerzas son iguales.}$$

Entonces:

$$F = 252299,25 \text{ N} + (311,8379 \text{ N}) \quad F = 252611,0879 \text{ N}$$

2.3.4 - Determinación de la fuerza total que actúa a lo largo de la biela. ( $F_b$ ):

$$F_b = \frac{F}{\cos \beta}$$

Donde:

Donde:

$$\beta = \arcsen(\lambda \cdot \sin \varphi) \quad \beta = \arcsen(0,3 \cdot 0,9848) \quad \beta = 17,1841$$

Entonces:

$$F_b = \frac{252611,0879 \text{ N}}{\cos 17,1841} \quad F_b = 264414,4466 \text{ N}$$

$\cos 17,1841$

2.3.5 - Determinación de la fuerza lateral, perpendicular al eje del cilindro.(N).

$$N = F * \tan \beta = 252611,0879 \text{ N} * \tan 17,1841 \quad N = 78119,3820 \text{ N}$$

2.3.6 - Determinación de la fuerza normal dirigida a lo largo de la manivela.(Fr).

$$Fr = F * \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

cos β

$$Fr = 252611,0879 \text{ N} * \frac{\cos(80 + 17,1841)}{\cos 17,1841} \quad Fr = -33\,067,1180 \text{ N}$$

cos 17,1841

2.3.7 - Determinación de la fuerza total tangencial perpendicular al radio de la manivela.(Kt).

$$Kt = F * \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} = 252611,0879 \text{ N} * \frac{\sin(80 + 17,1841)}{\cos 17,1841} = 262338,6462 \text{ N}$$

cos β

2.3.8 - Determinación del Par resultante que desarrolla un cilindro del motor.(M).

$$M = R * Kt = 0,04415 \text{ m} * 262338,6462 \text{ N} \quad M = 11582,2512 \text{ Nm}$$

2.3.9 - Determinación de la fuerza de inercia centrífuga de la parte en rotación de la biela, dirigida a lo largo del radio de la manivela, y que carga al muñón de la biela.(cojinete de biela).(Kbr).

$$Kbr = -(1 - k) * mb * R * \omega^2$$

$$Kbr = -(1 - 0,25) * 1,35 \text{ kg} * 0,04415 \text{ m} * (287,833 \text{ rad/s})^2$$

$$Kbr = -3\,703,4536 \text{ kg m/s}^2 \quad Kbr = -3\,703,4536 \text{ N}$$

2.3.10 - Determinación de la fuerza resultante, que actúa sobre el muñón de biela del cigüeñal (Rab).

$$Rab = \sqrt{Kt^2 + (Fr + Kbr)^2}$$

$$Rab = \sqrt{(262338,6462 \text{ N})^2 + (-33067,1180 \text{ N} + (-3703,4536 \text{ N}))^2} = 264903,0770 \text{ N}$$

y su dirección con respecto a la manivela se determina por el ángulo φ'.

$$\varphi' = \tan^{-1} \left( \frac{Kt}{Fr + Kbr} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{262338,6462}{-33067,1180 + (-3703,4536)} \right) = -82,0211$$

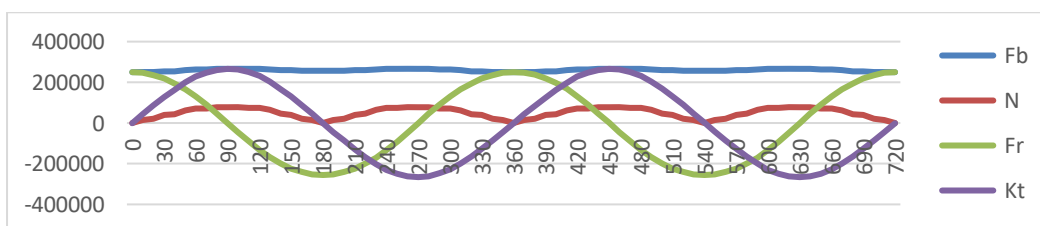
Los valores de las fuerzas y momentos se determinan con la mayor resolución disponible para el ángulo de giro del cigüeñal. Ver anexo \_1\_.

2.4 - Construcción de los gráficos de fuerzas y momentos.

La variación de las fuerzas que actúan sobre el MBM, en función del ángulo de giro de la manivela las graficaremos en un sistema rectangular de coordenadas a partir de los datos obtenidos de las expresiones anteriores.

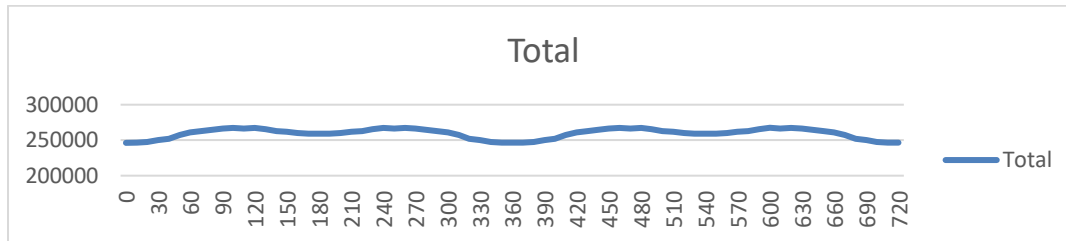
Para mejor comprensión mostraremos en un solo gráfico Fb, N, Fr y Kt.

Gráfico\_1\_: Fuerzas del MBM.



El gráfico Rabse construye también en coordenadas polares tomando como dirección base (eje polar) la dirección de la manivela, para la cual se utiliza el ángulo  $\varphi$ .

Gráfico\_2 : Fuerza resultante Rab.



Por el gráfico de fuerzas Rab en el sistema de coordenadas rectangular se puede determinar su Rab máximo y Rab mínimo (valores máximos y mínimos), y también su valor medio Rab<sub>m</sub> dividiendo el área, limitada por la gráfica y los ejes de coordenadas, sobre la longitud de la gráfica.

### 3: Determinación de los parámetros generales del motor.

#### 3.1 - Determinación de la potencia del motor.(P<sub>M</sub>).

La potencia es el trabajo desarrollado por unidad de trabajo.

$$P = \frac{W}{t}$$

Donde:

W --- Trabajo desarrollado por un pistón.

$$W = Fg \cdot S \quad W = 252299,25 \text{ N} \cdot 0,0883 \text{ m} \quad W = 22278,0238 \text{ Nm}$$

t --- Tiempo que demora un pistón en recorrer una carrera completa.

$$t = \frac{S}{V_m} \quad t = \frac{0,0883 \text{ m}}{8,0942 \text{ m/s}} \quad t = 0,0109 \text{ s}$$

$$V_m = 8,0942 \text{ m/s}$$

Entonces:

$$P = \frac{22278,0238 \text{ Nm}}{0,0109 \text{ s}} \quad P = 2043855,394 \text{ Nm/s}$$

0.0109 s

Como el motor tiene cuatro pistones y todos ejercen trabajo al mismo tiempo, debemos multiplicar la potencia obtenida para un pistón por cuatro.

$$P_M = P \cdot 4 \quad P_M = 2043855,394 \text{ Nm/s} \cdot 4 \quad P_M = 8175421,578 \text{ Nm/s}$$

$$\text{Como } 1 \text{ Hp} = 745.699871 \text{ Nm/s} \quad P_M = 10963,4209 \text{ Hp}$$

#### 3.2 - Determinación del Par máximo del motor.(Nm).

Como las presiones del aire se van a mantener constante en los depósitos y por ende durante todo el recorrido del pistón, el mayor par de fuerzas va suceder cuando el ángulo de la manivela (cigüeñal) sea igual a 90° y 270°; teniendo en cuenta que la fuerza F es positiva (+) cuando está dirigida hacia abajo ( ↓ + ) y negativa hacia arriba ( ↑ -), y que el signo negativo (-) en  $\beta$  solo indica que este se encuentra a la izquierda del eje Y.

- Para  $\varphi = 90^\circ$

$$M = R \cdot Kt$$



Donde:

$$Kt = F * \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

Donde:

$$\beta = \arcsen(\lambda * \sin \varphi) \quad \beta = \arcsen(0,3 * \sin 90^\circ) \quad \beta = 17,46$$

Sustituyendo en Kt:

$$Kt = 252611,0879 \text{ N} * \frac{\sin(90 + 17,46)}{\cos 17,46} \quad Kt = 252611,0879 \text{ N}$$

Sustituyendo en M:

$$M = 0,04415 \text{ m} * 252611,0879 \text{ N} \quad M = 11152,7795 \text{ Nm}$$

Como son dos los pistones que bajan al mismo tiempo, debemos multiplicar por dos el Par obtenido.

$$M_1 = M * 2 \quad M_1 = 11152,7795 \text{ Nm} * 2 \quad M_1 = 22305,5591 \text{ Nm}$$

- Para  $\varphi = 270^\circ$

$$M = R * Kt$$

Donde:

$$Kt = F * \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

Donde:

$$\beta = \arcsen(0,3 * \sin \varphi) \quad \beta = \arcsen(0,3 * \sin 270^\circ) \quad \beta = -17,46$$

Sustituyendo en Kt:

$$Kt = -252611,0879 \text{ N} * \frac{\sin(270 + (-17,46))}{\cos -17,46} \quad Kt = 252611,0879 \text{ N}$$

Sustituyendo en M:

$$M = 0,04415 \text{ m} * 252611,0879 \text{ N} \quad M = 11152,7795 \text{ Nm}$$

Como son dos los pistones que suben al mismo tiempo, debemos multiplicar por dos el Par obtenido.

$$M_2 = M * 2 \quad M_2 = 11152,7795 \text{ Nm} * 2 \quad M_2 = 22305,5591 \text{ Nm}$$

Como todos los pistones trabajan al mismo tiempo y en todas sus carreras, debemos sumar los Par resultantes ( $M_1$  y  $M_2$ ) de las carreras de ascenso y descenso de los pistones para hallar el Par resultante del motor ( $M_m$ ).

$$M_m = M_1 + M_2$$

$$M_m = 22305,5591 \text{ Nm} + 22305,5591 \text{ Nm} \quad M_m = 44611,1181 \text{ Nm}$$

### 3.3 - Determinación de la forma del cigüeñal.

Uno de los mayores problemas que tienen los motores actuales es que el Par máximo no se obtiene en el momento de mayor potencia del pistón y que este es intermitente, trayendo consigo vibraciones indeseables en el motor.

Para lograr mayor uniformidad en el giro del cigüeñal y un Par casi constante, nos propusimos diseñar un cigüeñal en cruz.

- *Fundamento para el diseño del cigüeñal en cruz.*

Los motores pluri-cilíndricos están formados por varios cilindros situados en uno o más bloques unidos entre sí, cuyas bielas actúan sobre un cigüeñal común, y tienen como objetivo primario aumentar la potencia, conseguir una rotación más uniforme y alcanzar mayor número de revoluciones, y como objetivo secundario reducir las sollicitaciones, conseguir mayor suavidad y tener una velocidad de rotación más uniforme.

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.

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

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

Siendo:

*t ... Números de tiempos = un tiempo (1T)*

*n...Números de cilindros = cuatro cilindros en este caso.*

En nuestro caso analizaremos un motor de cuatro cilindros en línea, y como los pistones ejecutan trabajo en cada una de las carreras, la fórmula anterior queda como sigue:

$$\theta = 360 \frac{1}{4} \theta = 90^\circ$$

### 3.4 - Determinación del Par del motor con el cigüeñal en cruz.

Como este cigüeñal tiene sus manivelas desfasadas en 90°, analizaremos el Par del motor para cada una de las posiciones de estas.

Para el cálculo tomaremos los ángulos de giro del cigüeñal 10°, 100°, 190° y 280°, teniendo en cuenta que la fuerza *F* es positiva (+) cuando está dirigida hacia abajo (↓+) y negativa hacia arriba (↑-), y que el signo negativo (-) en  $\beta$  solo indica que este se encuentra a la izquierda del eje Y.

La suma algebraica de los momentos provocados por todos los pistones del motor constituye el momento torsor total y depende de los parámetros constructivos y del esquema del motor.

**Para  $\varphi = 10^\circ$ :**

$$M_1 = R * K_t$$

Donde:

$$K_t = F * \frac{\text{sen}(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

$\cos \beta$

Donde:

$$\beta = \arcsen(\lambda * \text{sen} \varphi) \beta = \arcsen(0,3 * \text{sen} 10) \beta = 2,9853$$

$$K_t = 252611,0879 \text{ N} * \frac{\text{sen}(10 + 2,9853)}{\cos(2,9853)} K_t = 56839,1137 \text{ N}$$

$\cos(2,9853)$

Entonces:

$$M_1 = 0,04415 \text{ m} * 56839,1137 \text{ N} M_1 = 2509,4469 \text{ Nm}$$

**Para  $\varphi = 100^\circ$ :**

$$M_2 = R \cdot K_t$$

Donde:

$$K_t = F \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

$\cos \beta$

Donde:

$$\beta = \arcsin(\lambda \cdot \sin \varphi) \beta = \arcsin(0,3 \cdot \sin 100) \beta = 17,1839$$

$$K_t = 252611,0879 \text{ N} \cdot \frac{\sin(100 + 17,1839)}{\cos(17,1839)} K_t = 235208,2373 \text{ N}$$

$\cos(17,1839)$

Entonces:

$$M_2 = 0,04415 \text{ m} \cdot 235208,2373 \text{ N} M_2 = 10384,4437 \text{ Nm}$$

**Para  $\varphi = 190^\circ$ :**

$$M_3 = R \cdot K_t$$

Donde:

$$K_t = -F \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

$\cos \beta$

Donde:

$$\beta = \arcsin(\lambda \cdot \sin \varphi) \quad \beta = \arcsin(0,3 \cdot \sin 190) \beta = -2,9853$$

$$K_t = -252611,0879 \text{ N} \cdot \frac{\sin(190 + 2,9853)}{\cos(-2,9853)} K_t = 56839,1137 \text{ N}$$

$\cos(-2,9853)$

Entonces:

$$M_3 = 0,04415 \text{ m} \cdot 56839,1137 \text{ N} \quad M_3 = 2509,4469 \text{ Nm}$$

**Para  $\varphi = 280^\circ$ :**

$$M_4 = R \cdot K_t$$

Donde:

$$K_t = -F \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

$\cos \beta$

Donde:

$$\beta = \arcsin(\lambda \cdot \sin \varphi) \beta = \arcsin(0,3 \cdot \sin 280) \beta = -17,1839$$

$$K_t = -252611,0879 \text{ N} \cdot \frac{\sin(280 + 17,1839)}{\cos(-17,1839)} K_t = 235208,2373 \text{ N}$$

$\cos(-17,1839)$

Entonces:

$$M_4 = 0,04415 \text{ m} \cdot 235208,2373 \text{ N} \quad M_4 = 10384,4437 \text{ Nm}$$

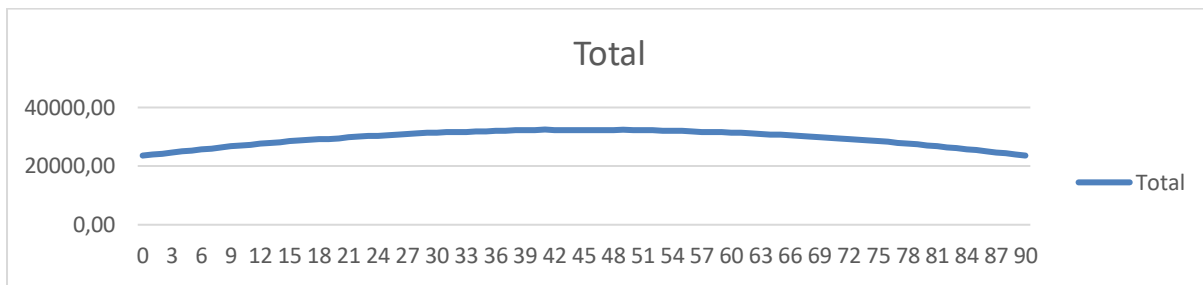
Para determinar el par del motor debemos sumar el Par obtenido en cada posición del cigüeñal.

$$M_m = M_1 + M_2 + M_3 + M_4$$

$$M_m = 2509,4469 \text{ Nm} + 10384,4437 \text{ Nm} + 2509,4469 \text{ Nm} + 10384,4437 \text{ Nm}$$

$$M_m = 25787,7812 \text{ Nm}$$

Gráfico\_3 : Comportamiento del Par del motor durante el giro del cigüeñal.



3.5 - Determinación del consumo de aire comprimido del motor.(Q):

Para determinar el consumo de aire comprimido por el motor se debe tener en cuenta el volumen del cilindro y el número de veces que se repite el movimiento en la unidad de tiempo.

Como se trata de un motor de cuatro cilindros, donde tanto en la carrera ascendente como descendente del pistón entra aire comprimido en el interior del cilindro y los volúmenes en ambas superficies son diferentes, calcularemos el consumo en estas por separado y después sumamos ambos consumos; multiplicando el resultado obtenido por dos, que es la cantidad de pistones que coinciden en el movimiento ascendente y descendente.

. Superficie superior del pistón:

$$Q_{Sup} = P_{Sup} * 2$$

P

Donde:

$P_{Sup}$  --- Potencia del pistón en la carrera de descenso teniendo en cuenta la fuerza de empuje del aire solamente.

$$P_{Sup} = \frac{W_S}{t}$$

t

Donde:

$W_S$  --- Es el trabajo del pistón en la carrera de descenso teniendo en cuenta la fuerza de empuje del aire solamente.

$$W_S = p * A_{p1} * S_{W_S} = 30,3975 \text{ Mpa} * 0,0044 \text{ m}^2 * 0,0883 \text{ m} \quad W_S = 0,0111 \text{ Mpa m}^3$$

Sustituyendo en  $P_{Sup}$ :

$$P_{Sup} = \frac{0,0111 \text{ Mpa m}^3}{0,0109 \text{ s}} \quad P_{Sup} = 1,0221 \text{ Mpa m}^3 / \text{s}$$

Sustituyendo en  $Q_{Sup}$ :

$$Q_{Sup} = \frac{1,0221 \text{ Mpa m}^3 / \text{s} * 2}{30,3975 \text{ Mpa}} \quad Q_{Sup} = 0,0673 \text{ m}^3 / \text{s}$$

. Superficie inferior del pistón:

$$Q_{Inf} = P_{Inf} * 2$$

P

Donde:

$P_{Inf}$  --- Potencia del pistón en la carrera de ascenso teniendo en cuenta la fuerza de empuje del aire solamente.

$$P_{Inf} = \frac{W_{Inf}}{t}$$

t

Donde:

$W_{Inf}$  --- Es el trabajo del pistón en la carrera de ascenso teniendo en cuenta la fuerza de empuje del aire solamente.

$$W_{Inf} = p \cdot A_{p2} \cdot S W_{Inf} = 30,3975 \text{ Mpa} \cdot 0,0039 \text{ m}^2 \cdot 0,0883 \text{ m} \quad W_{Inf} = 0,0105 \text{ Mpa m}^3$$

Sustituyendo en  $P_{Inf}$ :

$$P_{Inf} = \frac{0,0105 \text{ Mpa m}^3}{0,0109 \text{ s}} \quad P_{Inf} = 0,9604 \text{ Mpa m}^3 / \text{s}$$

Sustituyendo en  $Q_{Inf}$ :

$$Q_{Inf} = \frac{0,9604 \text{ Mpa m}^3 / \text{s}}{30,3975 \text{ Mpa}} \quad Q_{Inf} = 0,0632 \text{ m}^3 / \text{s}$$

- Consumo total de aire del motor.

$$Q = Q_{Sup} + Q_{Inf}$$

$$Q = 0,0673 \text{ m}^3 / \text{s} + 0,0632 \text{ m}^3 / \text{s} \quad Q = 0,1305 \text{ m}^3 / \text{s} = 7,8292 \text{ m}^3 / \text{min} = 469,7538 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$1 \text{ Litro} = 1000 \text{ cm}^3 = 0,001 \text{ m}^3$$