

Resumen

Para escribir la memoria y realizar las numerosas simulaciones ha sido necesario la creación de una hoja de cálculo capaz de dibujar gráficos de esfuerzos de donde sacar resultados relevantes para el posterior análisis de los mismos. Evidentemente la elaboración de esta hoja de cálculo representa el primer paso para la búsqueda del acoplamiento elástico acoplado a cada uno de los tres tipos de motores estudiados y el tiempo de dedicación de la misma ha sido lo suficientemente notable para establecer esta hoja de cálculo como un soporte informático importantísimo y de gran valor a efectos de los resultados posteriores de la memoria.

La hoja de cálculo, como su nombre indica, está creada sobre archivos tipo Microsoft Excel cumplimentada con una pequeña macro en Visual Basic para hacer el uso de la hoja cómodo y fácil. El anexo A pretende explicar la construcción y el uso detallado de la hoja, así como la realización de una simulación paso por paso plasmando las operaciones computadas para cada momento.

El anexo B incluye el catálogo en formato original de PAULSTRA sobre los acoplamientos elásticos escogidos para la solución de la memoria. El catálogo contiene un recopilatorio completo de información técnica para cada tipo de acoplamiento describiendo las características elásticas y dimensionales de cada uno.



Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
A.1 Uso de la hoja de cálculo.....	5
A.1.1 Presentación de la hoja	5
A.2 Simulación detallada de un motor alternativo.....	9
A.2.1 Cálculos relativos al cilindro primero.....	11
A.2.2 Cálculos relativos al cilindro segundo.....	18
A.2.3 Cálculos relativos al cilindro tercero.....	19
A.2.4 Cálculos relativos al cilindro cuarto.....	20
A.2.5 Cálculos relativos al cilindro quinto.....	21
A.2.6 Cálculos relativos al cilindro sexto.....	22
A.2.7 Cálculos relativos al cilindro séptimo.....	23
A.2.8 Cálculos relativos al cilindro octavo.....	24
A.2.9 Conjunción total de los resultados del motor.....	25
A.2.10 Hoja de resultados y gráficas.....	26



A.1 Uso de la hoja de cálculo

A.1.1 Presentación de la hoja

La hoja de cálculo lleva el nombre de “Simulación de motores térmicos alternativos.xls”. Al abrir el archivo preguntará si se quiere habilitar las macros del programa y sólo hay que aceptar. El programa de simulación está compuesto de varias hojas de cálculo cada una con unas determinadas funciones diferentes. En primer lugar figura la hoja llamada “Entrada de datos”, y como su nombre indica no es más que la introducción de los datos iniciales necesarios para la correcta realización de la simulación. Estos datos son los siguientes:

- N° de cilindros. Se han de introducir 1, 2, 4, 6 ó 8 cilindros, que son los válidos para los cuales la hoja de cálculo está configurada. En el caso erróneo que se introduzca un número diferente a estos valores la casilla al lado del n° de cilindros indicará las opciones a elegir.
- Radio de la manivela.
- Longitud de la biela
- Relación de compresión.
- Diámetro de la cabeza del pistón.
- Masa del pistón.
- Temperatura de pared del cilindro.
- Temperatura de admisión del aire. En principio se considera el sistema inicialmente en condiciones normales (1 atm, 25 ° C). Se puede modificar la temperatura del aire a gusto del lector.
- Relación estequiométrica. Parámetro importante para saber la cantidad de combustible que entra en la cámara de combustión por kilogramo de aire entrante.
- Velocidad angular. Aunque las unidades no pertenezcan al Sistema Internacional el uso de hablar de la velocidad angular en rev/min es más común y preferido que en rad/s.
- Inercia. Se refiere a la inercia conjunta del motor y del banco de ensayo al que está acoplado.
- Par. Es el par aproximado a incluir para equipar la carga media que proporciona el motor al par constante del freno del banco de pruebas. Tanto la inercia como el par son datos que sólo son utilizados para describir la evolución cualitativa de la velocidad rotativa del cigüeñal durante el ciclo termodinámico.



- Parámetros de la ley de Woschni. Son los parámetros C_1 y C_2 necesarios para el cálculo de las pérdidas de calor por refrigeración. El parámetro multiplicativo es el valor adecuado que se necesita para que las pérdidas tengan un valor correcto. En el caso del ejemplo de simulación del motor de 8 cilindros que más tarde se va a detallar dicho valor es de 4.5.
- Ley de Vibe. Los parámetros de esta ley modifican el comportamiento de la combustión. El parámetro a será fijado al valor de 6.908 y el parámetro m podrá ser modificado como se quiera. En principio está asignado al valor $m = 2$, que hace que la combustión adquiera una evolución simétrica.
- Ángulo inicial de la combustión θ_{ic} . Se escribirá este ángulo para el avance de apertura a la admisión. Si se quiere por ejemplo avanzar la admisión 15° es necesario escribir el valor de $-15^\circ + 360^\circ = 345^\circ$.
- Incremento del ángulo de combustión $\Delta\theta$. Es el valor que asigna la duración del proceso de combustión.
- Energía calorífica del combustible. Contiene el valor predeterminado de 42300000 J/kg.
- Parámetros del cálculo de la C_p del aire. Son valores inamovibles pero que están escritos para que se tenga constancia de ellos.
- Configuración. Parámetros de entrada importantísimos para poder llevar a cabo las simulaciones pluricilíndricas. Cuando actúa la combustión de un pistón al cabo de un cierto intervalo angular se da la explosión del segundo cilindro y así sucesivamente. Se han de incluir entonces los intervalos entre cilindros en grados. Por ejemplo para la simulación de 2 cilindros se ha de escribir en las dos primeras casillas 360° , para la de 4 se introduce en las cuatro primeras 180° , para la de 6 cilindros 120° en las seis primeras casillas y para la simulación de 8 cilindros se introduce en todas la casillas 90° .

Una vez ya introducidos los primeros datos entrantes sólo queda apretar el botón de comando que ha de encontrarse en la posición que muestre el mensaje de “Iniciar simulación”. La ventana de al lado ya informa del momento de introducir los datos iniciales. Una vez apretado el botón de comando se iniciará el proceso de simulación del motor y cuando la ventana indique el fin del proceso ya se podrán ver los resultados. La hoja que lleva el nombre de “Tabla de resultados” indica los pasos simulados para cada grado de cigüeñal y por cada cilindro. Es la hoja principal del desarrollo de todas las operaciones y la que más volumen gráfico ocupa. En ella figura el código necesitado de todas las fórmulas de cada operación realizada. A partir de esa hoja se han podido calcular todas las gráficas y todos los resultados finales. Para volver a realizar una nueva simulación se requiere de nuevo apretar el botón de



comando que muestra el mensaje de “Volver a hacer una nueva simulación” y reescribir los datos iniciales deseados.

Una vez iniciado la simulación y cuando la ventana informa del fin de la misma, en la hoja de entrada de datos ya se puede observar los resultados de los datos obtenidos, que son unas variables imprescindibles utilizadas en la simulación. Estos datos obtenidos son los siguientes:

- Lambda o índice de inclinación máxima de la biela λ .
- Carrera del pistón. Es dos veces el radio de la manivela.
- Velocidad angular. En este caso se obtiene la revolución en °/s y rad/s.
- Tiempo en recorrer 1 grado de cigüeñal. Los segundos calculados que tarda el cigüeñal en girar un grado a la velocidad constante indicada.
- Velocidad media del pistón en hacer una carrera.
- Masa total de combustible entrante en la cámara.
- Volumen del cilindro sin contar el espacio muerto de la cámara de combustión.
- Espacio muerto de la cámara de combustión.
- Volumen total del cilindro (no de la cilindrada total del motor) contando dicho espacio muerto.
- Masa total de aire entrante en el cilindro expresada en moles y kilogramos.
- Ángulo final de la combustión θ_{fc} .

En los dos próximos dibujos se puede ver la hoja de entrada de datos en el momento de introducir los valores de entrada y una vez ya realizada la simulación:

DATOS INICIALES							
N° CILINDROS		radio manivela (m)		longitud biela (m)		rel comp	
4	CILINDROS	0,02225		0,0371		12,4	
T pared cil. (°K)	T adm(°K)	rel esteq		Woschni		LEY DE VIBE	
473	298	14,7		c1 (renovación)		a m	
w (rev/min)	inercia (kgm2)	par (Nm)		c1(resto)		c2	
3000	0,75	77,77		Parámetro multiplicativo		6,908 2	
ángulo Oic	incremento ángulo	E Cal. (J/kg)		4,5			
345	100	42300000					
Cp							
Rango	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
T<1000	3,568392	-6,79E-04	1,55E-06	-3,30E-12	-4,66E-13	-1,06E+03	3,72E+00
T>1000	3,0879272	1,25E-03	-4,24E-07	6,75E-11	-3,97E-15	-9,95E+02	5,96E+00
Iniciar simulación				Introduzca datos iniciales..			
DATOS OBTENIDOS:							
lambda	carrera (m)	w (°/s)	w (rad/s)	tiempo recorrer 1° (s)	Cm (veloc. med. pistón)(m/s)	m comb (kg)	
V cilindro (m3)	V muerto (m3)	V total (m3)	n aire total (moles)	m aire total (kg)	ángulo Ofc		

Fig. A.1 Entrada de datos al inicio de la simulación



DATOS INICIALES								
N° CILINDROS	radio manivela (m)	longitud biela (m)	rel comp	diametro (m)	m (kg)	CONFIGURACION		
4	0,02225	0,0371	12,4	0,0655	0,103			
T pared cil. (°K)	T adm(°K)	rel esteq	Woscini		LEY DE VIBE			
473	298	14,7	c1 (renovación)	c1(resto)	c2	a	m	
w (rev/min)	inercia (kgm2)	par (Nm)	27,81	10,26	3,24E-03	6,908	2	
3000	0,75	77,77	Parámetro multiplicativo					
ángulo Ofc	incremento ángulo	E Cal. (J/kg)	4,5					
345	100	42300000						
Cp								
Rango	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	
T<1000	3,568392	-6,79E-04	1,55E-06	-3,30E-12	-4,66E-13	-1,06E+03	3,72E+00	
T>1000	3,0879272	1,25E-03	-4,24E-07	6,75E-11	-3,97E-15	-9,95E+02	5,96E+00	
Volver a hacer una nueva simulación				Ya puede ver la tabla de resultados y las gráficas				
DATOS OBTENIDOS:								
lambda	carrera (m)	w (°/s)	w (rad/s)	tiempo recorrer 1° (s)	Cm (veloc. med. pistón)(m/s)	m comb (kg)		
0,599730458	0,0445	18000	314,16	5,55556E-05	4,45	1,31589E-05		
V cilindro (m3)		V muerto (m3)	V total (m3)	n aire total (moles)	m aire total (kg)	ángulo Ofc		
0,000149945		1,31531E-05	0,000163098	0,006670212	0,000193436	445		

Fig. A.2 Datos obtenidos una vez realizada la simulación.

La hoja “Resultados” se puede ver una vez indicado en la ventana de información de la hoja de entrada de datos. En esta hoja están recopilados aquellos valores interesantes que servirán más tarde para el posterior análisis descriptivo del comportamiento mecánico y termodinámico del motor.

TABLA DE RESULTADOS FINALES	
P máxima (bar)	47,14
P máxima con pérdida por convección (bar)	44,94
T máxima (° K)	2771,73
T máxima con pérdida por convección (° K)	2521,89
Q introducido (J)	556,62
Q perdido con pérdida por convección (J)	149,76
% Q perdido con pérdida por convección	26,90%
Q introducido con pérdida por convección (J)	406,31
Q perdido escape (J)	241,90
% Q perdido escape	43,46%
W ciclo (J)	240,11
W ciclo sin combustión (J)	-1,63
W ciclo con pérdida por convección (J)	201,51
Rdto ciclo sin pérdidas	43,14%
Rdto ciclo con pérdida por convección	36,20%
Par medio (Nm)	77,76
Par medio con pérdida mecánica (Nm)	62,21

Fig. A.3 Resultados finales de la simulación



A.2 Simulación detallada de un motor alternativo

Ahora se verá detalladamente y paso por paso el proceso de simulación de la hoja de cálculo. Se computará las características asociadas a un motor de ocho cilindros. En primer lugar se han de introducir los datos relativos del motor alternativo. Estos datos son:

- Radio de la manivela: 0.0313 m.
- Longitud de la biela: 0.05217 m.
- Relación de compresión ϵ : 12.4
- Diámetro del pistón: 0.081 m.
- Masa del pistón: 0.0225 kg.
- Temperatura de pared de cilindro: 473 °K.
- Relación estequiométrica: 14.7 kg aire/kg combustible.
- Velocidad angular: 3000 rev/min.
- Ángulo inicial de combustión: 345°.
- Incremento del ángulo de combustión: 110°.
- Configuración: 90° en todas las casillas.

Se aprieta el botón de comando para iniciar la simulación y se calculan de la siguiente manera los datos obtenidos necesarios para el cálculo de la tabla de resultados:

$$\lambda = r/l = 0.0313 / 0.05217 = 0.6;$$

$$\text{Carrera} = 2 \cdot r = 2 \cdot 0.0313 = 0.0626 \text{ m};$$

$$\omega \text{ (°/s)} = \omega \text{ (rev/min)} \cdot 360^\circ / 1 \text{ rev} \cdot 1 \text{ min} / 60 \text{ s} = 3000 \cdot 360 \cdot (1/60) = 18000 \text{ °/s};$$

$$\omega \text{ (rad/s)} = \omega \text{ (rev/min)} \cdot 2\pi / 1 \text{ rev} \cdot 1 \text{ min} / 60 \text{ s} = 3000 \cdot 2\pi \cdot /60 = 314,16 \text{ rad/s};$$

$$\text{Tiempo en recorrer 1 segundo: } 1/\omega \text{ (°/s)} = 5.55 \text{ E-5 s};$$

$$\text{Velocidad media del pistón: } C_m = \omega \text{ (rev/min)} \cdot \text{Carrera} / 30 = 3000 \cdot 2 \cdot r / 30 = 6.26 \text{ m/s};$$

$$\text{Volumen cilindro: } V_{cil} = \text{Diámetro}^2 \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot \text{Carrera} = 0.081^2 \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot \text{Carrera} = 0.000323 \text{ m}^3;$$

$$\text{Volumen espacio muerto: } V_e = V_{cil} / (\epsilon - 1) = 2.83 \text{ e-3 m}^3;$$

$$\text{Volumen total del cilindro: } V_{tot} = V_{cil} + V_e = 0.000323 + 2.83 \text{ e-3} = 0.00035 \text{ m}^3;$$

$$\text{Número de moles de aire entrante: } n_{aire} = V_{tot} \cdot 1 \text{ atm} / (8.314 \cdot T_{adm}) = 0.01434 \text{ mol};$$

$$\text{Masa total de aire entrante: } m_{aire} = n_{aire} \cdot M_{aire} / 1000 = 0.01434 \cdot 29 / 1000 = 0.000416 \text{ kg};$$

$$\text{Masa total de combustible entrante: } m_{comb} = m_{aire} / \text{rel. esteq.} = 0.000416 / 14.7 = 2.83 \text{ e-5 kg};$$

$$\text{Ángulo final de la combustión: } \theta_{fc} = \theta_c + \Delta\theta = 345 + 110 = 455 \text{ °}.$$



Ya calculados los datos obtenidos se inicia la simulación en la tabla de resultados. El aspecto de la tabla de resultados se presenta de la siguiente manera leyendo de izquierdas a derechas. Se incluyen los resultados para los dos primeros ángulos girado por el cigüeñal (0 y 1°) y para los dos primeros cilindros. El cálculo a partir del tercer cilindro se realiza de la misma forma que para el segundo.

CILINDRO 1											
w inicial cte	t recorrer 1°	ángulo (°)	ángulo (rad)	velocidad (m/s)	aceleración (m2/s)	ángulo reducido	z	m (kg)	avance pistón (m)	volumen (m3)	
314,159265	5,55556E-05	0	0	0	4942,700253	0	0	0	0	2,82963E-05	
314,159265	5,55556E-05	1	0,017453293	0,274564835	4941,100644	0	0	0	4,85666E-06	2,83213E-05	

Iteración anterior											
Q introducido (J)	ángulo (°)	ángulo (°)	ángulo (rad)	ángulo reducido	z	m	avance pistón (m)	volumen (m3)	Q introducido (J)	Cp (J/molK)	
0	-1	719	12,54891732	0	0	0	4,85666E-06	2,83213E-05	0	29,10183791	
0	0	0	0	0	0	0	0	2,82963E-05	0	29,10183791	

coef iso	presión con combustión (Pa)	V expansión (J)	temperatura (*K)	presión sin combustión (Pa)	V expansión sin combustión (J)
	101325		298	101325	
1,39994539	101325	-0,002535798	298	101325	-0,002535798
1,39994539	101325	0,002535798	298	101325	0,002535798

temperatura sin combustión (*K)	hc (J/m2K)	Q perdido refrigeración (J)	Q total aportado (J)	Cp (J/molK)	coef iso	presión nueva (Pa)
298	0,037	0	0	29,10183791	1,399945393	101325
298	0,037	0	0	29,10183791	1,399945393	101325

Esfuerzos Combustión						
V expansión con pérdida de calor (J)	temperatura nueva (*K)	Q escape (J)	F Comb. (N)	Fn Comb. (N)	Fb Comb. (N)	M Comb. (Nm)
	298					
-0,002535798	298	0	522,1274565	0	522,1274565	0
0,002535798	298	0	522,1274565	5,467735117	522,1560849	0,456322174

Esfuerzos Inerciales				Esfuerzos Conjuntos				CILINDRO 2		
F Iner. (N)	Fn Iner. (N)	Fb Iner. (N)	M Iner. (Nm)	F Conj. (N)	Fn Conj. (N)	Fb Conj. (N)	M Conj. (Nm)	ángulo (°)	ángulo (°)	ángulo (rad)
-1112,107557	0	-1112,107557	0	-589,9801004	0	-589,9801004	0	-90	630	10,99557429
-1111,747645	-11,64225624	-1111,808602	-0,97163077	-589,6201884	-6,174521125	-589,6525174	-0,515308596	-89	631	11,01302758

Esfuerzos Combustión				Esfuerzos Inerciales				
aceleración (m2/s)	F Comb. (N)	Fn Comb. (N)	Fb Comb. (N)	M Comb. (Nm)	F Iner. (N)	Fn Iner. (N)	Fb Iner. (N)	M Iner. (Nm)
-1853,514075	522,1274565	-391,5963743	652,6597898	-16,34258939	417,0406669	-312,7811248	521,3012084	-13,05337287
-1798,471232	522,1274565	-391,5031955	652,6038867	-16,51120499	404,6560272	-303,4204115	505,7770719	-12,79641309

Esfuerzos Conjuntos			
F Conj. (N)	Fn Conj. (N)	Fb Conj. (N)	M Conj. (Nm)
939,1681234	-704,3774991	1173,960998	-29,39596226
926,7834837	-694,923607	1158,380959	-29,30761808

Fig. A.4 Tabla de resultados de la hoja de cálculo



Como se puede observar Figura A.4 las operaciones destinadas al cálculo de los esfuerzos del primer cilindro son las más largas y dificultosas. El cálculo de los siguientes cilindros no es más que la repetición de los valores del primer cilindro pero desfasados tantos grados como intervalos angulares hayan entre cada cilindro.

En la primera columna se introduce el vector de velocidad angular constante (desde 0 ° hasta 719 °) y la columna de al lado de la derecha calcula simplemente el tiempo transcurrido en recorrer un grado de cigüeñal. Estas dos columnas únicamente son necesarias para calcular la evolución de la velocidad angular.

A.2.1 Cálculos relativos al cilindro primero

Se entra pues en el cálculo del primer cilindro. En la columna *ángulo* (°) se introducen automáticamente todos los valores de los grados a girar (desde 0 a 719 °). La columna de *ángulo* (rad) transforma el valor de los grados girados de la anterior columna en unidades de radianes (S.I.) para que los cálculos no contengan ningún tipo de error relacionado por el sistema de unidades. Entonces para los dos primeros grados se calculan:

$$0 \text{ rad y } 1^\circ \cdot (2\pi / 360) = 0.01745 \text{ rad};$$

La tercera y cuarta columnas ya hacen referencia a la velocidad y aceleración instantáneas del pistón. Se calculan pues mediante la ecuaciones ya dadas anteriormente en la memoria:

$$v_{0^\circ} = \omega \cdot r \left(\text{sen} \alpha + \frac{\lambda}{2} \text{sen} 2\alpha \right) = 314.16 \cdot 0.0313 \cdot (\text{sen } 0 + 0.3 \text{sen } 0) = 0 \text{ m/s};$$

$$v_{1^\circ} = \omega \cdot r \left(\text{sen} \alpha + \frac{\lambda}{2} \text{sen} 2\alpha \right) = 314.16 \cdot 0.0313 \cdot (\text{sen } 0.01745 + 0.3 \text{sen } 2 \cdot 0.01745) = 0.2746 \text{ m/s};$$

$$a_{0^\circ} = \omega^2 r (\cos \alpha + \lambda \cos 2\alpha) = 314.16^2 \cdot 0.0313 \cdot (\cos 0 + 0.6 \cos 0) = 4942.7 \text{ m/s}^2;$$

$$a_{1^\circ} = \omega^2 r (\cos \alpha + \lambda \cos 2\alpha) = 314.16^2 \cdot 0.0313 \cdot (\cos 0.01745 + 0.6 \cos 2 \cdot 0.01745) = 4941.1 \text{ m/s}^2;$$

La columna del *ángulo reducido relativo de combustión* se calcula $\Theta = (\theta - \theta_{ic}) / \Delta\theta$ y el valor para los dos primeros grados es nulo pues esta función solamente actúa cuando se inicia la combustión hasta su final. Con el ángulo reducido ya se pueden calcular la fracción de carga quemada en el intervalo correspondiente y la masa quemada. Efectivamente la función sólo funciona durante el proceso de combustión y toma las siguientes fórmulas para su computación:



$$x = 1 - e^{-a\Theta^{m+1}} \text{ y } m = x \cdot m_{comb};$$

El avance del pistón y el volumen desplazado por el émbolo también se operan para cada grado:

$$x_{0^\circ} = r(1 - \cos \alpha) + L(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \text{sen}^2 \alpha}) = 0.0313 \cdot (1 - \cos 0) + 0.05217(1 - (1 - 0.6^2 \text{sen}^2 0)) = 0 \text{ m};$$

$$x_{1^\circ} = r(1 - \cos \alpha) + L(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \text{sen}^2 \alpha}) = 0.0313(1 - \cos 0.01745) + 0.05217(1 - (1 - 0.6^2 \text{sen}^2 0.01745)) = 4.856 \text{ e } -6 \text{ m};$$

$$V_{0^\circ} = \text{Diámetro}^2 \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot x_{0^\circ} + V_e = 0.081^2 \cdot 0.025 \cdot \pi \cdot 0 + 2.833 \text{ e } -3 = 2.83 \text{ e } -3 \text{ m}^3;$$

$$V_{1^\circ} = \text{Diámetro}^2 \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot x_{1^\circ} + V_e = 0.081^2 \cdot 0.025 \cdot \pi \cdot 0.01745 + 2.833 \text{ e } -3 = 2.832 \text{ e } -3 \text{ m}^3;$$

El calor introducido en el cilindro se calculan multiplicando la masa quemada y la energía calorífica del combustible. A partir de aquí se muestran una serie de columnas cuyos valores son los hallados con un grado de anterioridad. Esto servirá para el cálculo posterior de la presión. En esta serie de columnas se han de calcular de nuevo el ángulo reducido, la fracción de carga quemada, la masa quemada, el avance del pistón, el volumen y el calor introducido en la cámara. Consecutivamente se sitúa el cálculo de la Cp del aire. Esta función será dependiente de la temperatura e inicialmente se hallará el primer valor con la temperatura indicada antes del grado 0° en la columna de la temperatura. Así sucesivamente se calculará la nueva Cp gracias a la temperatura anterior. Esta Cp se sacaba gracias a la tabla de los coeficientes que se muestra en la memoria y que se recuerda a continuación:

$$Cp/R = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4;$$

Rango	a1	a2	a3	a4	a5
T<1000	3.568392	-6.79E-04	1.55E-06	-3.30E-12	-4.66E-13
T>1000	3.0879272	1.25E-03	-4.24E-07	6.75E-11	-3.97E-15

Así para los primeros valores de la Cp:

$$Cp_{0^\circ} = Cp_{1^\circ} = (a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4) \cdot R = (3,568392 - 6,79E-04 \cdot 298 + 1,55E-06 \cdot 298^2 - 3.3E-12 \cdot 298^3 - 4.66E-13 \cdot 298^4) = 29.101 \text{ J/mol K};$$

Y a partir de la Cp ya se puede calcular el coeficiente isoentrópico γ :



$$\gamma_{0^\circ} = \gamma_{1^\circ} = C_p / (C_p - R) = 1.3999;$$

El siguiente paso ya es el cálculo de la presión y utilizando la expresión del primer principio de la termodinámica aplicado a un sistema abierto:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{dt};$$

despejando el término de la presión:

$$P_i = \frac{Q_i - \frac{\gamma_i}{\gamma_i-1} P_{i-1} (V_i - V_{i-1}) + \frac{1}{\gamma_i-1} V_{i-1} P_{i-1}}{V_{i-1} \cdot \frac{1}{\gamma_i-1}};$$

pero esta función sólo actúa en las fases cerradas del ciclo termodinámico y en las fases abiertas la función da como resultado la presión atmosférica. Así se asegura una evolución de campana en la gráfica de la presión. Si se simula el cálculo de la presión para un valor que esté comprendido en las fases de compresión y explosión (en este caso del grado 355 °):

$$P_{355} = \frac{Q_{355} - \frac{\gamma_{355}}{\gamma_{355}-1} P_{354} (V_{355} - V_{354}) + \frac{1}{\gamma_{355}-1} V_{354} P_{354}}{V_{354} \cdot \frac{1}{\gamma_{355}-1}} =$$

$$= \frac{1.67 - \frac{1.36}{1.36-1} \cdot 2995401.48 (2.892E-5 - 2.919E-5) + \frac{1}{1.36-1} \cdot 2.919E-5 \cdot 2995401.48}{2.919E-5 \cdot \frac{1}{1.36-1}} = 3054515.19 \text{ Pa};$$

Seguidamente viene el trabajo de expansión, fácilmente calculable por la multiplicación de la presión por la diferencia de volumen desplazado:

$$W_{exp0^\circ} = P_i \cdot (V_i - V_{i-1}) = P_{0^\circ} \cdot (V_{0^\circ} - V_{719^\circ}) = 101325 \cdot (2.82963E-5 - 2.8232E-5) = -0.002535 \text{ J};$$

$$W_{exp1^\circ} = P_i \cdot (V_i - V_{i-1}) = P_{1^\circ} \cdot (V_{1^\circ} - V_{0^\circ}) = 101325 \cdot (2.8232E-5 - 2.82963E-5) = 0.002535 \text{ J};$$

Para encontrar la temperatura del aire dentro del cilindro se ha de recurrir a la ecuación de los Gases Ideales $PV = nRT$ teniendo en cuenta que en las fases abiertas del ciclo el aire que va entrando al cilindro es proporcional al volumen desplazado por el pistón; en las fases cerradas del ciclo el aire dentro del cilindro es el total calculado en la hoja de los datos de entrada.



$$T_{0^\circ} = \frac{P_{0^\circ} \cdot V_{0^\circ}}{\frac{V_{0^\circ}}{V_{total}} \cdot n_{aire_total} \cdot R} = \frac{101325 \cdot 2.82963E-5}{\frac{2.82963E-5}{0.00035} \cdot 0.01434 \cdot 8.314} = 298 \text{ }^\circ\text{K};$$

$T_{1^\circ} = 298 \text{ }^\circ\text{K}$ también;

El cálculo siguiente es la presión sin que se realice el proceso de combustión, es decir, como si el motor estuviese accionado por una fuente de energía mecánica externa. A esto se le llama "motor arrastrado" y las operaciones para hallar los resultados del trabajo realizado por el pistón y la temperatura son las mismas que antes. En el cálculo de la presión lo único que varía es el término del calor introducido que se ha de sacar. Así entonces si se calculase la presión del mismo grado 355 ° pero sin tener en cuenta la combustión el resultado sería:

$$P_{355^\circ} = \frac{\frac{1.36}{1.36-1} \cdot 2995401.48 \cdot (2.892E-5 - 2.919E-5) + \frac{1}{1.36-1} \cdot 2.919E-5 \cdot 2995401.48}{2.919E-5 \cdot \frac{1}{1.36-1}} = 2977170,82 \text{ Pa};$$

donde cabe comentar que la diferencia todavía es muy pequeña pero a partir de este ángulo la diferencia se hace cada vez mayor; de hecho el punto máximo de la presión sin combustión corresponde al grado 360 ° con un valor de 3066318.56 Pa mientras que el máximo pico de la presión con combustión es de un valor de 4107275.47 Pa, prácticamente 10 bares más.

Llegados a este punto se han de empezar a contabilizar las pérdidas caloríficas y de escape que se producen. En el caso de la pérdidas por transmisión se computará mediante la fórmula de Woschni y hará falta deducir el coeficiente de transmisión convectivo requerido para evaluar estas pérdidas. La evaluación de estas pérdidas por refrigeración se hace de la siguiente manera:

$$h_c = 1.3 \cdot 10^{-2} D^{-0.2} P^{0.8} T_g^{-0.53} \left[C_1 c_m + C_2 \frac{V_T T_{CA}}{P_{CA} V_{CA}} (P - P_o) \right]^{0.8};$$

recordando que:

c_m - velocidad lineal media del pistón en m/s.

V_T - volumen desplazado por el émbolo en m³.

T_{CA} - temperatura de la carga al final de la admisión en °K.

P_{CA} - presión de la carga al final de la admisión en Pa.

V_{CA} - volumen de la carga al final de la admisión en m³.



P_o - presión del motor arrastrado en Pa.

$$h_{c_{0^{\circ}}} = 1.3 \cdot 10^{-2} D^{-0.2} P_{0^{\circ}}^{0.8} T_{0^{\circ}}^{-0.53} \left[C_1 c_m + C_2 \frac{V_T T_{CA}}{P_{CA} V_{CA}} (P_{0^{\circ}} - P_o) \right]^{0.8}$$

$$= 1.3 \cdot 10^{-2} 0.081^{-0.2} 101325^{0.8} 298^{-0.53} \left[27.81 \cdot 6.26 + 0 \cdot \frac{2.82963E-5 \cdot 298}{101325 \cdot 0.00035} (101325 - 101325) \right]^{0.8}$$

$$= 666 \text{ W/m}^2 \text{ K};$$

$$666 / \text{tiempo en recorrer un grado} = 0.037 / 5.555 E-5 = 0.037 \text{ J/m}^2 \text{ K};$$

La siguiente columna se asocia al calor perdido por refrigeración usando el coeficiente global de transmisión:

$$Q = -h_c (T_g - T_p) A = h_c (T_g - T_p) \cdot (\pi \cdot D \cdot \text{Avance pistón} + 2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot D^2);$$

y esta función también solamente actúa en las fases termodinámicas cerradas del motor, pues se supone que en las etapas de admisión y escape no existe intercambio de temperatura con la pared. El calor perdido por refrigeración es sumado al calor introducido en el cilindro y con ello se tiene el calor total neto introducido en el cilindro. Dicho resultado está marcado en la siguiente columna.

$$Q_{\text{total neto}} = Q_{\text{introducido}} + Q_{\text{perdido por refrigeración}};$$

Ahora se debe recalculan la presión y temperatura con estos valores diferentes de calor total neto aportado. Para ello se vuelve a calcular la Cp del aire y el respectivo coeficiente isoentrópico. Con estos datos se computan en la fórmula despejada de la presión para hallarla. Una vez encontrada la presión incluyendo las pérdidas de calor se vuelve a calcular el trabajo de expansión realizado con los nuevos valores de presión. Finalmente se recalcula la temperatura del gas y así el tema de las pérdidas de calor por transmisión quedan ya zanjado. Todos estos nuevos valores recalculados están hechos en las columnas con nombre "presión nueva, W expansión con pérdida de calor y temperatura nueva".

Ya sólo faltan contabilizar las pérdidas caloríficas por escape. Utilizando la fórmula del cálculo de calor a presión constante sin tener en cuenta el cambio del gas aire a dióxido de carbono y agua (no se ha realizado esta mejora por la enorme dificultad que conllevaría el saber las cantidades de masa de los productos de la combustión en cada instante además del calor que cada uno genera y las presiones parciales que originan) se halla de forma rápida y fácil



este valor. Cabe señalar que otra vez la fórmula sólo actuará en las fases termodinámicas cerradas del ciclo por la misma razón previamente explicada.

$$Q_{\text{escape}} = -n_{\text{aire}} \cdot C_p \cdot (T_r - T_{i-1});$$

Las siguientes columnas se refieren ya a los cálculos de los esfuerzos internos en el pistón. En primer lugar será necesario saber los esfuerzos derivados de la combustión. De hecho todos las operaciones conjeturadas hasta ahora tenían como fin objetivo el cálculo de los esfuerzos de combustión. Los esfuerzos inerciales serán posteriormente calculados directamente de una con la ayuda de la aceleración hallada previamente. La conjunción de ambos esfuerzos de combustión e inercial dará lugar a los esfuerzos conjuntos, que serán la información básica para la creación de las gráficas.

Para los esfuerzos de combustión:

$$F_{\text{comb}} = P_{\text{comb con pérdidas}} \cdot A_{\text{cabeza del pistón}};$$

$$F_{\text{comb } 0^\circ} = F_{0^\circ} = P_{\text{comb con pérdidas } 0^\circ} \cdot A_{\text{cabeza del pistón}} = 101325 \cdot (\pi \cdot D^2 \cdot 0.25) = 522.127 \text{ N};$$

$$F_{\text{comb } 1^\circ} = F_{1^\circ} = P_{\text{comb con pérdidas } 0^\circ} \cdot A_{\text{cabeza del pistón}} = 101325 \cdot (\pi \cdot D^2 \cdot 0.25) = 522.127 \text{ N};$$

$$F_n = F \cdot \text{tg } \beta;$$

$$\lambda \text{ sen } \alpha = \text{sen } \beta;$$

$$F_{n 0^\circ} = F_{0^\circ} \cdot \text{tg } \beta_{0^\circ} = 522.127 \cdot \text{tg} (\text{arc sen} (0.6 \cdot \text{sen } 0)) = 0 \text{ N};$$

$$F_{n 1^\circ} = F_{1^\circ} \cdot \text{tg } \beta_{1^\circ} = 522.127 \cdot \text{tg} (\text{arc sen} (0.6 \cdot \text{sen } 0.01745)) = 5.46 \text{ N};$$

$$F_b = F / \cos \beta;$$

$$F_{b 0^\circ} = F_{0^\circ} / \cos \beta_{0^\circ} = 522.27 / \cos (\text{arc sen} (0.6 \cdot \text{sen } 0)) = 522.27 \text{ N};$$

$$F_{b 1^\circ} = F_{1^\circ} / \cos \beta_{1^\circ} = 522.27 / \cos (\text{arc sen} (0.6 \cdot \text{sen } 0.01745)) = 522.16 \text{ N};$$

$$M_t = Fr \left[\text{sen } \alpha + \frac{\lambda}{2} \text{sen } 2\alpha \right];$$

$$M_{t 0^\circ} = F_{0^\circ} r \left[\text{sen } \alpha_{0^\circ} + \frac{\lambda}{2} \text{sen } 2\alpha_{0^\circ} \right] = 522.27 \cdot 0.0313 \left[\text{sen } 0 + \frac{0.6}{2} \text{sen } 0 \right] = 0 \text{ Nm};$$

$$M_{t 1^\circ} = F_{1^\circ} r \left[\text{sen } \alpha_{1^\circ} + \frac{\lambda}{2} \text{sen } 2\alpha_{1^\circ} \right] = 522.27 \cdot 0.0313 \left[\text{sen } 0.01745 + \frac{0.6}{2} \text{sen } 2 \cdot 0.01745 \right] = 0.456 \text{ Nm}.$$



Para los esfuerzos inerciales:

$$F_a = -m_a a;$$

$$F_{a0^\circ} = F_{0^\circ} = -m_a a_{0^\circ} = -0.225 \cdot 4642.7 = -1112.11 \text{ N};$$

$$F_{a1^\circ} = F_{1^\circ} = -m_a a_{1^\circ} = -0.225 \cdot 4941.1 = -1111.74 \text{ N};$$

$$F_n = F \operatorname{tg} \beta;$$

$$\lambda \operatorname{sen} \alpha = \operatorname{sen} \beta;$$

$$F_{n0^\circ} = F_{0^\circ} \operatorname{tg} \beta_{0^\circ} = -1112.11 \cdot \operatorname{tg} (\operatorname{arc} \operatorname{sen} (0.6 \cdot \operatorname{sen} 0)) = 0 \text{ N};$$

$$F_{n1^\circ} = F_{1^\circ} \operatorname{tg} \beta_{1^\circ} = -1111.74 \cdot \operatorname{tg} (\operatorname{arc} \operatorname{sen} (0.6 \cdot \operatorname{sen} 0.01745)) = -11.64 \text{ N};$$

$$F_b = F / \cos \beta;$$

$$F_{b0^\circ} = F_{0^\circ} / \cos \beta_{0^\circ} = -1112.11 / \cos (\operatorname{arc} \operatorname{sen} (0.6 \cdot \operatorname{sen} 0)) = -1112.11 \text{ N};$$

$$F_{b1^\circ} = F_{1^\circ} / \cos \beta_{1^\circ} = -1111.74 / \cos (\operatorname{arc} \operatorname{sen} (0.6 \cdot \operatorname{sen} 0.01745)) = -1111.81 \text{ N};$$

$$M_t = Fr \left[\operatorname{sen} \alpha + \frac{\lambda}{2} \operatorname{sen} 2\alpha \right];$$

$$M_{t0^\circ} = F_{0^\circ} r \left[\operatorname{sen} \alpha_{0^\circ} + \frac{\lambda}{2} \operatorname{sen} 2\alpha_{0^\circ} \right] = -1112.11 \cdot 0.0313 \left[\operatorname{sen} 0 + \frac{0.6}{2} \operatorname{sen} 0 \right] = 0 \text{ Nm};$$

$$M_{t1^\circ} = F_{1^\circ} r \left[\operatorname{sen} \alpha_{1^\circ} + \frac{\lambda}{2} \operatorname{sen} 2\alpha_{1^\circ} \right] = -1111.81 \cdot 0.0313 \left[\operatorname{sen} 0.01745 + \frac{0.6}{2} \operatorname{sen} 2 \cdot 0.01745 \right] = -0.97 \text{ Nm}.$$

Y la conjunción de los esfuerzos de combustión y los inerciales:

$$F_{\text{conjunto}} = F_{\text{comb}} + F_a;$$

$$F_{n \text{ conjunto}} = F_{n \text{ comb}} + F_{na};$$

$$F_{b \text{ conjunto}} = F_{b \text{ comb}} + F_{ba};$$

$$M_{\text{conjunto}} = M_{\text{comb}} + M_a;$$

$$F_{\text{conjunto } 0^\circ} = F_{\text{comb } 0^\circ} + F_{a0^\circ} = 522.127 - 1112.11 = -589.98 \text{ N};$$

$$F_{\text{conjunto } 1^\circ} = F_{\text{comb } 1^\circ} + F_{a1^\circ} = 522.127 - 1111.74 = -589.62 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 0^\circ} = F_{n \text{ comb } 0^\circ} + F_{na0^\circ} = 0 + 0 = 0 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 1^\circ} = F_{n \text{ comb } 1^\circ} + F_{na1^\circ} = 5.46 - 11.64 = -6.17 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 0^\circ} = F_{b \text{ comb } 0^\circ} + F_{ba0^\circ} = 522.27 - 1112.11 = -589.98 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 1^\circ} = F_{b \text{ comb } 1^\circ} + F_{ba1^\circ} = 522.16 - 1111.81 = -589.65 \text{ N};$$



$$M_{conjunto 0^\circ} = M_{comb 0^\circ} + M_a 0^\circ = 0 + 0 = 0 \text{ Nm};$$

$$M_{conjunto 1^\circ} = M_{comb 1^\circ} + M_a 1^\circ = 0.456 - 0.97 = -0.515 \text{ Nm}.$$

A.2.2 Cálculos relativos al cilindro segundo

Para calcular los resultados del cilindro segundo se podría hacer de la misma manera que en el cilindro primero pero desfasando 90° este cilindro. Esta opción sería correcta pero no óptimamente implementada, por lo que sería un gasto de memoria extra a la hoja de cálculo creada. La manera más eficaz de hacerlo es la de teniendo la columna de los grados girados por el cigüeñal desfasados en este caso 90° , se utiliza la función BUSCAR que Microsoft Excel proporciona para “buscar” en el cilindro 1 los valores de los esfuerzos correspondientes al grado girado en el cilindro 2. El resto de los cilindros siguen la misma vía de computación.

Gracias a esta función se podrán hallar todos los valores de los esfuerzos para cualquier tipo de motor, tenga 4, 6 ó 8 cilindros puesto y con intervalos angulares diferentes. Con todo ello se pueden mostrar ya los resultados de los esfuerzos para los dos primeros grados desfasados, es decir, para los grados 360° y 361° :

Fuerzas de combustión:

$$F_{comb 630^\circ} = 522.27 \text{ N};$$

$$F_{comb 631^\circ} = 522.27 \text{ N};$$

$$F_{n comb 630^\circ} = -391.59 \text{ N};$$

$$F_{n comb 631^\circ} = -391.5 \text{ N};$$

$$F_{b comb 630^\circ} = 652.66 \text{ N};$$

$$F_{b comb 631^\circ} = 652.6 \text{ N};$$

$$M_{t comb 630^\circ} = -16.34 \text{ Nm};$$

$$M_{t comb 631^\circ} = -16.51 \text{ Nm}.$$

Fuerzas inerciales:

$$F_a 630^\circ = 417.04 \text{ N};$$

$$F_a 631^\circ = 404.66 \text{ N};$$

$$F_{n a 630^\circ} = -312.78 \text{ N};$$

$$F_{n a 631^\circ} = -303.42 \text{ N};$$

$$F_{b a 630^\circ} = 521.30 \text{ N};$$

$$F_{b a 631^\circ} = 505.77 \text{ N};$$



$$M_{t\ c\ 630^\circ} = -13.05\ Nm;$$

$$M_{t\ c\ 631^\circ} = -12.79\ Nm.$$

Fuerzas conjuntas:

$$F_{conjunto\ 630^\circ} = F_{comb\ 630^\circ} + F_{a\ 630^\circ} = 522.27 + 417.04 = 939.17\ N;$$

$$F_{conjunto\ 631^\circ} = F_{comb\ 631^\circ} + F_{a\ 631^\circ} = 522.27 + 404.66 = 926.79\ N;$$

$$F_{n\ conjunto\ 630^\circ} = F_{n\ comb\ 630^\circ} + F_{n\ a\ 630^\circ} = -391.59 + -312.78 = -704.38\ N;$$

$$F_{n\ conjunto\ 631^\circ} = F_{n\ comb\ 631^\circ} + F_{n\ a\ 631^\circ} = -391.5 + -303.42 = -694.92\ N;$$

$$F_{b\ conjunto\ 630^\circ} = F_{b\ comb\ 630^\circ} + F_{b\ a\ 630^\circ} = 652.66 + 521.30 = 1173.96\ N;$$

$$F_{b\ conjunto\ 631^\circ} = F_{b\ comb\ 631^\circ} + F_{b\ a\ 631^\circ} = 652.6 + 505.77 = 1158.38\ N;$$

$$M_{conjunto\ 630^\circ} = M_{comb\ 630^\circ} + M_{a\ 630^\circ} = -16.34 + -13.05 = -29.39\ Nm;$$

$$M_{conjunto\ 631^\circ} = M_{comb\ 631^\circ} + M_{a\ 631^\circ} = -16.51 + -12.79 = -29.31\ Nm.$$

A.2.3 Cálculos relativos al cilindro tercero

Fuerzas de combustión:

$$F_{comb\ 540^\circ} = 522.27\ N;$$

$$F_{comb\ 541^\circ} = 522.27\ N;$$

$$F_{n\ comb\ 540^\circ} = 1.15\ E-13\ N;$$

$$F_{n\ comb\ 541^\circ} = -5.47\ N;$$

$$F_{b\ comb\ 540^\circ} = 522.13\ N;$$

$$F_{b\ comb\ 541^\circ} = 522.16\ N;$$

$$M_{t\ comb\ 540^\circ} = 2.4\ E-15\ Nm;$$

$$M_{t\ comb\ 541^\circ} = -0.114\ Nm.$$

Fuerzas inerciales:

$$F_{a\ 540^\circ} = 278.03\ N;$$

$$F_{a\ 541^\circ} = 278.17\ N;$$

$$F_{n\ a\ 540^\circ} = 6.13\ E-14\ N;$$

$$F_{n\ a\ 541^\circ} = -2.91\ N;$$

$$F_{b\ a\ 540^\circ} = 278.03\ N;$$

$$F_{b\ a\ 541^\circ} = 278.19\ N;$$

$$M_{t\ c\ 540^\circ} = 1.28\ E-15\ Nm;$$

$$M_{t\ c\ 541^\circ} = -0.06\ Nm.$$



Fuerzas conjuntas:

$$F_{\text{conjunto } 540^\circ} = F_{\text{comb } 540^\circ} + F_{a \text{ } 540^\circ} = 522.27 + 278.03 = 800.15 \text{ N};$$

$$F_{\text{conjunto } 541^\circ} = F_{\text{comb } 541^\circ} + F_{a \text{ } 541^\circ} = 522.27 + 278.17 = 800.30 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 540^\circ} = F_{n \text{ comb } 540^\circ} + F_{n a \text{ } 540^\circ} = 1.15 \text{ E-}13 + 6.13 \text{ E-}14 = 1.76 \text{ E-}13 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 541^\circ} = F_{n \text{ comb } 541^\circ} + F_{n a \text{ } 541^\circ} = -5.47 + -2.91 = -8.38 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 540^\circ} = F_{b \text{ comb } 540^\circ} + F_{b a \text{ } 540^\circ} = 522.13 + 278.03 = 800.15 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 541^\circ} = F_{b \text{ comb } 541^\circ} + F_{b a \text{ } 541^\circ} = 522.16 + 278.19 = 800.35 \text{ N};$$

$$M_{\text{conjunto } 540^\circ} = M_{\text{comb } 540^\circ} + M_{a \text{ } 540^\circ} = 2.4 \text{ E-}15 + 1.28 \text{ E-}15 = 3.68 \text{ E-}15 \text{ Nm};$$

$$M_{\text{conjunto } 541^\circ} = M_{\text{comb } 541^\circ} + M_{a \text{ } 541^\circ} = -0.114 + -0.06 = -0.17 \text{ Nm}.$$

A.2.4 Cálculos relativos al cilindro cuarto

Fuerzas de combustión:

$$F_{\text{comb } 450^\circ} = 7158.99 \text{ N};$$

$$F_{\text{comb } 451^\circ} = 7012.27 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ comb } 450^\circ} = 5369.25 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ comb } 451^\circ} = 5257.96 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 450^\circ} = 8948.74 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 451^\circ} = 8764.6 \text{ N};$$

$$M_{t \text{ comb } 450^\circ} = 224.08 \text{ Nm};$$

$$M_{t \text{ comb } 451^\circ} = 217.15 \text{ Nm}.$$

Fuerzas inerciales:

$$F_{a \text{ } 450^\circ} = 417.04 \text{ N};$$

$$F_{a \text{ } 451^\circ} = 428.91 \text{ N};$$

$$F_{n a \text{ } 450^\circ} = 312.78 \text{ N};$$

$$F_{n a \text{ } 451^\circ} = 321.61 \text{ N};$$

$$F_{b a \text{ } 450^\circ} = 521.30 \text{ N};$$

$$F_{b a \text{ } 451^\circ} = 536.1 \text{ N};$$

$$M_{t c \text{ } 450^\circ} = 13.05 \text{ Nm};$$

$$M_{t c \text{ } 451^\circ} = 13.28 \text{ Nm}.$$

Fuerzas conjuntas:



$$F_{\text{conjunto } 450^\circ} = F_{\text{comb } 450^\circ} + F_{a \ 450^\circ} = 7158.99 + 417.04 = 7576.03 \text{ N};$$

$$F_{\text{conjunto } 451^\circ} = F_{\text{comb } 451^\circ} + F_{a \ 451^\circ} = 7012.27 + 428.91 = 7441.19 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 450^\circ} = F_{n \text{ comb } 450^\circ} + F_{n a \ 450^\circ} = 5369.25 + 312.78 = 5682.03 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 451^\circ} = F_{n \text{ comb } 451^\circ} + F_{n a \ 451^\circ} = 5257.96 + 321.61 = 5579.57 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 450^\circ} = F_{b \text{ comb } 450^\circ} + F_{b a \ 450^\circ} = 8948.74 + 521.30 = 9470.04 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 451^\circ} = F_{b \text{ comb } 451^\circ} + F_{b a \ 451^\circ} = 8764.6 + 536.1 = 9300.70 \text{ N};$$

$$M_{\text{conjunto } 450^\circ} = M_{\text{comb } 450^\circ} + M_{a \ 450^\circ} = 224.08 + 13.05 = 237.13 \text{ Nm};$$

$$M_{\text{conjunto } 451^\circ} = M_{\text{comb } 451^\circ} + M_{a \ 451^\circ} = 217.15 + 13.28 = 230.43 \text{ Nm}.$$

A.2.5 Cálculos relativos al cilindro quinto

Fuerzas de combustión:

$$F_{\text{comb } 360^\circ} = 17349.51 \text{ N};$$

$$F_{\text{comb } 361^\circ} = 17575.02 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ comb } 360^\circ} = -2.55 \text{ E-12 N};$$

$$F_{n \text{ comb } 361^\circ} = 184.05 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 360^\circ} = 17349.51 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 361^\circ} = 17575.98 \text{ N};$$

$$M_{t \text{ comb } 360^\circ} = -2.13 \text{ E-13 Nm};$$

$$M_{t \text{ comb } 361^\circ} = 15.36 \text{ Nm}.$$

Fuerzas inerciales:

$$F_{a \ 360^\circ} = -1112.11 \text{ N};$$

$$F_{a \ 361^\circ} = -1111.74 \text{ N};$$

$$F_{n a \ 360^\circ} = 1.63 \text{ E-13 N};$$

$$F_{n a \ 361^\circ} = -11.64 \text{ N};$$

$$F_{b a \ 360^\circ} = -1112.11 \text{ N};$$

$$F_{b a \ 361^\circ} = -1111.81 \text{ N};$$

$$M_{t c \ 360^\circ} = 1.36 \text{ E-14 Nm};$$

$$M_{t c \ 361^\circ} = -0.97 \text{ Nm}.$$

Fuerzas conjuntas:

$$F_{\text{conjunto } 360^\circ} = F_{\text{comb } 360^\circ} + F_{a \ 360^\circ} = 17349.51 + -1112.11 = 16237.4 \text{ N};$$

$$F_{\text{conjunto } 361^\circ} = F_{\text{comb } 361^\circ} + F_{a \ 361^\circ} = 17575.02 + -1111.74 = 16463.27 \text{ N};$$



$$F_{n \text{ conjunto } 360^\circ} = F_{n \text{ comb } 360^\circ} + F_{n a 360^\circ} = -2.55 E-12 + 1.63 E-13 = -2.38 E-12 N;$$

$$F_{n \text{ conjunto } 361^\circ} = F_{n \text{ comb } 361^\circ} + F_{n a 361^\circ} = 184.05 + -11.64 = 172.4 N;$$

$$F_{b \text{ conjunto } 360^\circ} = F_{b \text{ comb } 360^\circ} + F_{b a 360^\circ} = 17349.51 + -1112.11 = 16237.4 N;$$

$$F_{b \text{ conjunto } 361^\circ} = F_{b \text{ comb } 361^\circ} + F_{b a 361^\circ} = 17575.98 + -1111.81 = 16464.17 N;$$

$$M_{\text{conjunto } 360^\circ} = M_{\text{comb } 360^\circ} + M_{a 360^\circ} = -2.13 E-13 + 1.36 E-14 = -1.99 E-13 Nm;$$

$$M_{\text{conjunto } 361^\circ} = M_{\text{comb } 361^\circ} + M_{a 361^\circ} = 15.36 + -0.97 = 14.39 Nm.$$

A.2.6 Cálculos relativos al cilindro sexto

Fuerzas de combustión:

$$F_{\text{comb } 270^\circ} = 1288.72 N;$$

$$F_{\text{comb } 271^\circ} = 1315.74 N;$$

$$F_{n \text{ comb } 270^\circ} = -966.54 N;$$

$$F_{n \text{ comb } 271^\circ} = -986.57 N;$$

$$F_{b \text{ comb } 270^\circ} = 1610.9 N;$$

$$F_{b \text{ comb } 271^\circ} = 1644.53 N;$$

$$M_{t \text{ comb } 270^\circ} = -40.34 Nm;$$

$$M_{t \text{ comb } 271^\circ} = -41.6 Nm.$$

Fuerzas inerciales:

$$F_{a 270^\circ} = 417.04 N;$$

$$F_{a 271^\circ} = 404.66 N;$$

$$F_{n a 270^\circ} = -312.78 N;$$

$$F_{n a 271^\circ} = -303.42 N;$$

$$F_{b a 270^\circ} = 521.3 N;$$

$$F_{b a 271^\circ} = 505.78 N;$$

$$M_{t c 270^\circ} = -13.05 Nm;$$

$$M_{t c 271^\circ} = -12.8 Nm.$$

Fuerzas conjuntas:

$$F_{\text{conjunto } 270^\circ} = F_{\text{comb } 270^\circ} + F_{a 270^\circ} = 1288.72 + 417.04 = 1705.76 N;$$

$$F_{\text{conjunto } 271^\circ} = F_{\text{comb } 271^\circ} + F_{a 271^\circ} = 1315.74 + 404.66 = 1720.4 N;$$

$$F_{n \text{ conjunto } 270^\circ} = F_{n \text{ comb } 270^\circ} + F_{n a 270^\circ} = -966.54 + -312.78 = -1279.32 N;$$

$$F_{n \text{ conjunto } 271^\circ} = F_{n \text{ comb } 271^\circ} + F_{n a 271^\circ} = -986.57 + -303.42 = -1290 N;$$



$$F_{b \text{ conjunto } 270^\circ} = F_{b \text{ comb } 270^\circ} + F_{b a 270^\circ} = 1610.9 + 521.3 = 2132.2 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 271^\circ} = F_{b \text{ comb } 271^\circ} + F_{b a 271^\circ} = 1644.53 + 505.78 = 2150.31 \text{ N};$$

$$M_{\text{conjunto } 270^\circ} = M_{\text{comb } 270^\circ} + M_{a 270^\circ} = -40.34 + -13.05 = -53.39 \text{ Nm};$$

$$M_{\text{conjunto } 271^\circ} = M_{\text{comb } 271^\circ} + M_{a 271^\circ} = -41.6 + -12.8 = -54.54 \text{ Nm}.$$

A.2.7 Cálculos relativos al cilindro séptimo

Fuerzas de combustión:

$$F_{\text{comb } 180^\circ} = 523.06 \text{ N};$$

$$F_{\text{comb } 181^\circ} = 523.56 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ comb } 180^\circ} = 3.84 \text{ E-14 N};$$

$$F_{n \text{ comb } 181^\circ} = -5.48 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 180^\circ} = 523.07 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 181^\circ} = 523.59 \text{ N};$$

$$M_{t \text{ comb } 180^\circ} = 8.02 \text{ E-16 Nm};$$

$$M_{t \text{ comb } 181^\circ} = -0.11 \text{ Nm}.$$

Fuerzas inerciales:

$$F_{a 180^\circ} = 278.03 \text{ N};$$

$$F_{a 181^\circ} = 278.17 \text{ N};$$

$$F_{n a 180^\circ} = 2.04 \text{ E-14 N};$$

$$F_{n a 181^\circ} = -2.91 \text{ N};$$

$$F_{b a 180^\circ} = 278.03 \text{ N};$$

$$F_{b a 181^\circ} = 278.19 \text{ N};$$

$$M_{t c 180^\circ} = 4.26 \text{ E-16 Nm};$$

$$M_{t c 181^\circ} = 0.06 \text{ Nm}.$$

Fuerzas conjuntas:

$$F_{\text{conjunto } 180^\circ} = F_{\text{comb } 180^\circ} + F_{a 180^\circ} = 523.06 + 278.03 = 801.09 \text{ N};$$

$$F_{\text{conjunto } 181^\circ} = F_{\text{comb } 181^\circ} + F_{a 181^\circ} = 523.56 + 278.17 = 801.73 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 180^\circ} = F_{n \text{ comb } 180^\circ} + F_{n a 180^\circ} = 3.84 \text{ E-14} + 2.04 \text{ E-14} = 5.88 \text{ E-14 N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 181^\circ} = F_{n \text{ comb } 181^\circ} + F_{n a 181^\circ} = -5.48 + -2.91 = -8.4 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 180^\circ} = F_{b \text{ comb } 180^\circ} + F_{b a 180^\circ} = 523.07 + 278.03 = 801.09 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 181^\circ} = F_{b \text{ comb } 181^\circ} + F_{b a 181^\circ} = 523.59 + 278.19 = 801.78 \text{ N};$$



$$M_{\text{conjunto } 180^\circ} = M_{\text{comb } 180^\circ} + M_{a \text{ } 180^\circ} = 8.02 \text{ E-16} + 4.26 \text{ E-16} = 1.23 \text{ E-15 Nm};$$

$$M_{\text{conjunto } 181^\circ} = M_{\text{comb } 181^\circ} + M_{a \text{ } 181^\circ} = -0.11 - 0.06 = -0.18 \text{ Nm}.$$

A.2.8 Cálculos relativos al cilindro octavo

Fuerzas de combustión:

$$F_{\text{comb } 90^\circ} = 522.27 \text{ N};$$

$$F_{\text{comb } 91^\circ} = 522.27 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ comb } 90^\circ} = 391.59 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ comb } 91^\circ} = 391.5 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 90^\circ} = 652.66 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ comb } 91^\circ} = 652.6 \text{ N};$$

$$M_{t \text{ comb } 90^\circ} = 16.34 \text{ Nm};$$

$$M_{t \text{ comb } 91^\circ} = 16.17 \text{ Nm}.$$

Fuerzas inerciales:

$$F_{a \text{ } 90^\circ} = 417.04 \text{ N};$$

$$F_{a \text{ } 91^\circ} = 428.91 \text{ N};$$

$$F_{n a \text{ } 90^\circ} = 312.78 \text{ N};$$

$$F_{n a \text{ } 91^\circ} = 321.61 \text{ N};$$

$$F_{b a \text{ } 90^\circ} = 536.1 \text{ N};$$

$$F_{b a \text{ } 91^\circ} = 505.77 \text{ N};$$

$$M_{t c \text{ } 90^\circ} = 13.05 \text{ Nm};$$

$$M_{t c \text{ } 91^\circ} = 13.28 \text{ Nm}.$$

Fuerzas conjuntas:

$$F_{\text{conjunto } 90^\circ} = F_{\text{comb } 90^\circ} + F_{a \text{ } 90^\circ} = 522.27 + 417.04 = 939.17 \text{ N};$$

$$F_{\text{conjunto } 91^\circ} = F_{\text{comb } 91^\circ} + F_{a \text{ } 91^\circ} = 522.27 + 428.91 = 951.04 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 90^\circ} = F_{n \text{ comb } 90^\circ} + F_{n a \text{ } 90^\circ} = 391.59 + 312.78 = 704.38 \text{ N};$$

$$F_{n \text{ conjunto } 91^\circ} = F_{n \text{ comb } 91^\circ} + F_{n a \text{ } 91^\circ} = 391.5 + 321.61 = 713.11 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 90^\circ} = F_{b \text{ comb } 90^\circ} + F_{b a \text{ } 90^\circ} = 652.66 + 536.1 = 1173.96 \text{ N};$$

$$F_{b \text{ conjunto } 91^\circ} = F_{b \text{ comb } 91^\circ} + F_{b a \text{ } 91^\circ} = 652.6 + 505.77 = 1188.7 \text{ N};$$

$$M_{\text{conjunto } 90^\circ} = M_{\text{comb } 90^\circ} + M_{a \text{ } 90^\circ} = 16.34 + 13.05 = 29.4 \text{ Nm};$$



$$M_{conjunto\ 91^\circ} = M_{comb\ 91^\circ} + M_a\ 91^\circ = 16.17 + 13.28 = 29.45\ Nm.$$

A.2.9 Conjunción total de los resultados del motor

Ya se tienen los resultados de los esfuerzos del motor para los ocho cilindros por separado. Falta entonces unir esos esfuerzos para tener los esfuerzos del motor en el eje. Al final de la hoja de cálculo están todos estos resultados. La fuerza de combustión F , la normal a las paredes del cilindro F_n y el momento de par motor M_t tienen siempre la misma dirección y sentido en todos los cilindros, con lo cual se pueden sumar perfectamente. En cambio, la fuerza de la biela F_b tiene una dirección y sentido diferente para cada cilindro, con lo cual no se pueden sumar todas las reacciones en la biela de cada cilindro. Es por ello que en las gráficas de esfuerzos no tiene sentido dibujarlas. Si se realizan las operaciones para calcular los esfuerzos totales:

CÁLCULO ESFUERZOS TOTALES DEL MOTOR											
	Esfuerzos Combustión			Esfuerzos Inerciales			Esfuerzos Conjuntos				
ángulo (°)	F Comb. (N)	F _n Comb. (N)	M Comb. (Nm)	F Iner. (N)	F _n Iner. (N)	M Iner. (Nm)	F Conj. (N)	F _n Conj. (N)	M Conj. (Nm)	ac. angular (rad/s ²)	ω (rad/s)
0	28408,76684	4402,711135	183,7394445	-2,27374E-13	-3,97904E-13	-1,77636E-15	28408,7668	4402,711135	183,7394445	138,945926	314,1669846
1	28515,09195	4449,953529	190,7906787	-5,68434E-14	7,27256815	-1,092670111	28515,0919	4457,226098	189,6980086	146,8906781	314,167426

Fig. A.5 Cálculo de esfuerzos totales del motor

Fuerzas de combustión:

$$F_{comb\ total\ 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{comb_cilindro_i_0^\circ} = 28408.79\ N;$$

$$F_{comb\ total\ 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{comb_cilindro_i_1^\circ} = 28515.09\ N;$$

$$F_{n\ comb\ total\ 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{n_comb_cilindro_i_0^\circ} = 4402.71\ N;$$

$$F_{n\ comb\ total\ 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{n_comb_cilindro_i_1^\circ} = 4449.95\ N;$$

$$M_{t\ comb\ total\ 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 M_{t_comb_cilindro_i_0^\circ} = 183.74\ Nm;$$

$$M_{t\ comb\ total\ 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 M_{t_comb_cilindro_i_1^\circ} = 190.8\ Nm.$$

Fuerzas inerciales:



$$F_{a \text{ total } 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{a_cilindro_i_0^\circ} = -2.27 \text{ E-13 N};$$

$$F_{a \text{ total } 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{a_cilindro_i_1^\circ} = -5.68 \text{ E-14 N};$$

$$F_{n \text{ a total } 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{n_a_cilindro_i_0^\circ} = -3.98 \text{ E-13 N};$$

$$F_{n \text{ a total } 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{n_a_cilindro_i_1^\circ} = 7.27 \text{ N};$$

$$M_{t \text{ a total } 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 M_{t_a_cilindro_i_0^\circ} = -1.77 \text{ E-15 Nm};$$

$$M_{t \text{ a total } 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 M_{t_a_cilindro_i_1^\circ} = -1.09 \text{ Nm}.$$

Fuerzas conjuntas:

$$F_{conjunto \text{ total } 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{conjunto_cilindro_i_0^\circ} = 28408.79 \text{ N};$$

$$F_{conjunto \text{ total } 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{conjunto_cilindro_i_1^\circ} = 28515.09 \text{ N};$$

$$F_{conjunto \text{ a total } 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{n_conjunto_cilindro_i_0^\circ} = 4402.71 \text{ N};$$

$$F_{conjunto \text{ a total } 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 F_{n_conjunto_cilindro_i_1^\circ} = 4457.23 \text{ N};$$

$$M_{t \text{ conjunto total } 0^\circ} = \sum_{i=1}^8 M_{t_conjunto_cilindro_i_0^\circ} = 183.74 \text{ Nm};$$

$$M_{t \text{ conjunto total } 1^\circ} = \sum_{i=1}^8 M_{t_conjunto_cilindro_i_1^\circ} = 189.7 \text{ Nm}.$$

A.2.10 Hoja de resultados y gráficas

Una vez ya realizada toda la simulación y cumplimentada completamente la tabla de resultados ya se pueden ver la hoja de resultados finales y las gráficas creadas. La hoja de resultados incluye varios datos informativos utilizables para un posterior análisis.



En primer lugar está calculado la presión y temperatura por cilindro teniendo en cuenta y no las pérdidas por transmisión. Después figura el calor introducido inicial y el perdido por refrigeración. La fracción de calor perdido está representado en %. Con este calor perdido por refrigeración ya se halla el calor introducido neto en el cilindro. Después está calculado las pérdidas por escape y su valor porcentual. Después está calculado el trabajo de expansión teniendo en cuenta y no las pérdidas por transmisión. También figura el trabajo sin tener en cuenta la combustión que en este caso no da como resultado un valor nulo totalmente, esto es porque la simulación ha sido realizada en grado por grado, si la discretización hubiese sido mayor habría dado un resultado más aproximado a cero.

Los últimos resultados valoran el rendimiento con y sin pérdidas y el par medio indicado calculado de todo el motor y al efectivo teniendo en cuenta un rendimiento mecánico del 80%.

TABLA DE RESULTADOS FINALES	
P máxima (bar)	41,07
P máxima con pérdida por convección (bar)	39,55
T máxima (° K)	2717,71
T máxima con pérdida por convección (° K)	2492,21
Q introducido (J)	1197,46
Q perdido con pérdida por convección (J)	289,89
% Q perdido con pérdida por convección	24,21%
Q introducido con pérdida por convección (J)	906,38
Q perdido escape (J)	582,16
% Q perdido escape	48,62%
W ciclo (J)	492,36
W ciclo sin combustión (J)	-4,22
W ciclo con pérdida por convección (J)	423,03
Rdto ciclo sin pérdidas	41,12%
Rdto ciclo con pérdida por convección	35,33%
Par medio (Nm)	318,12
Par medio con pérdida mecánica (Nm)	254,50

Fig. A.5 Resultados finales del motor de 8 cilindros

Las gráficas dibujadas son las de la temperatura, presión, esfuerzos de combustión, par motor de combustión, esfuerzos inerciales, par motor inercial, esfuerzos conjuntos, par motor conjunto, avance del pistón, velocidad lineal del pistón, aceleración del pistón y evolución de la velocidad angular rotacional del cigüeñal.



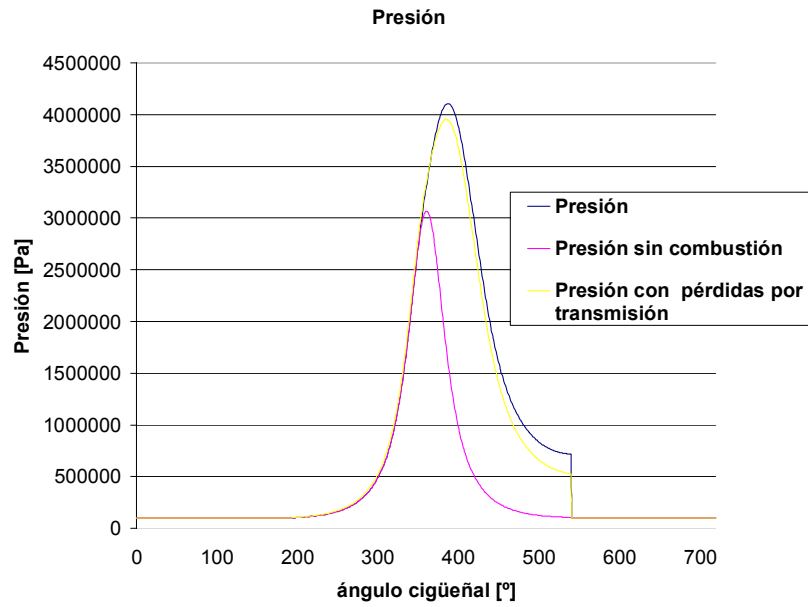


Fig. A.6 Evolución de la presión para el motor de 8 cilindros

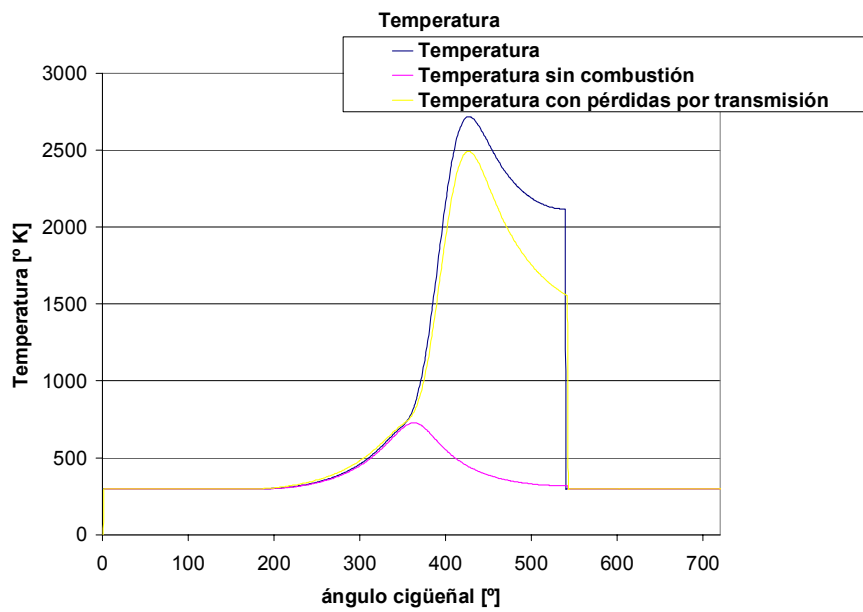


Fig. A.7 Evolución de la temperatura para el motor de 8 cilindros



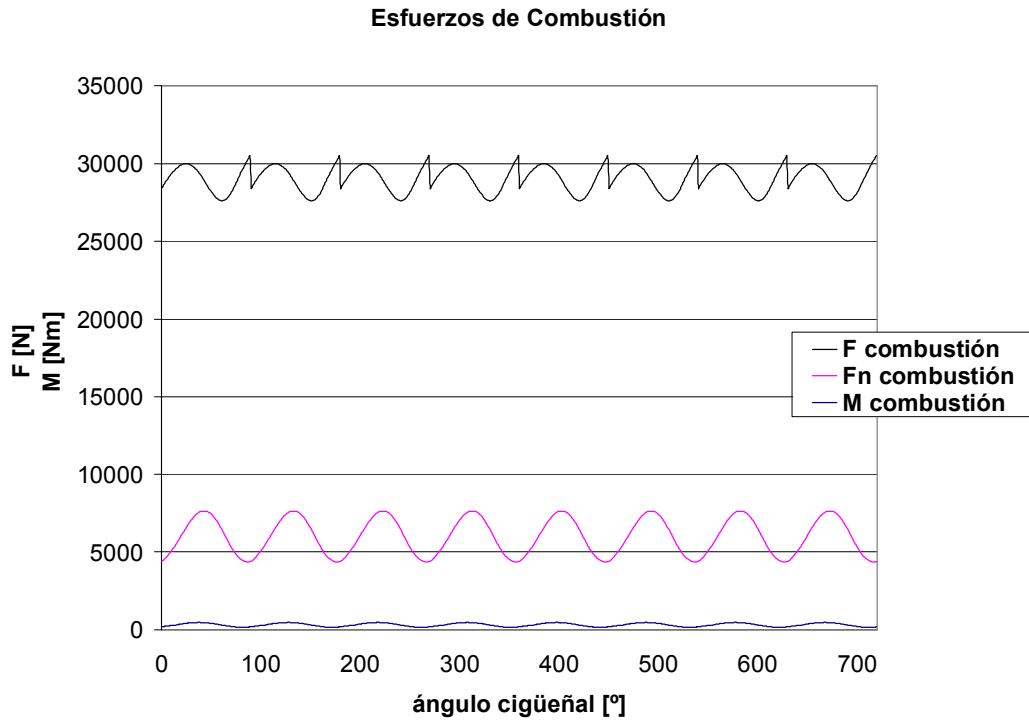


Fig. A.8 Esfuerzos de combustión para el motor de 8 cilindros

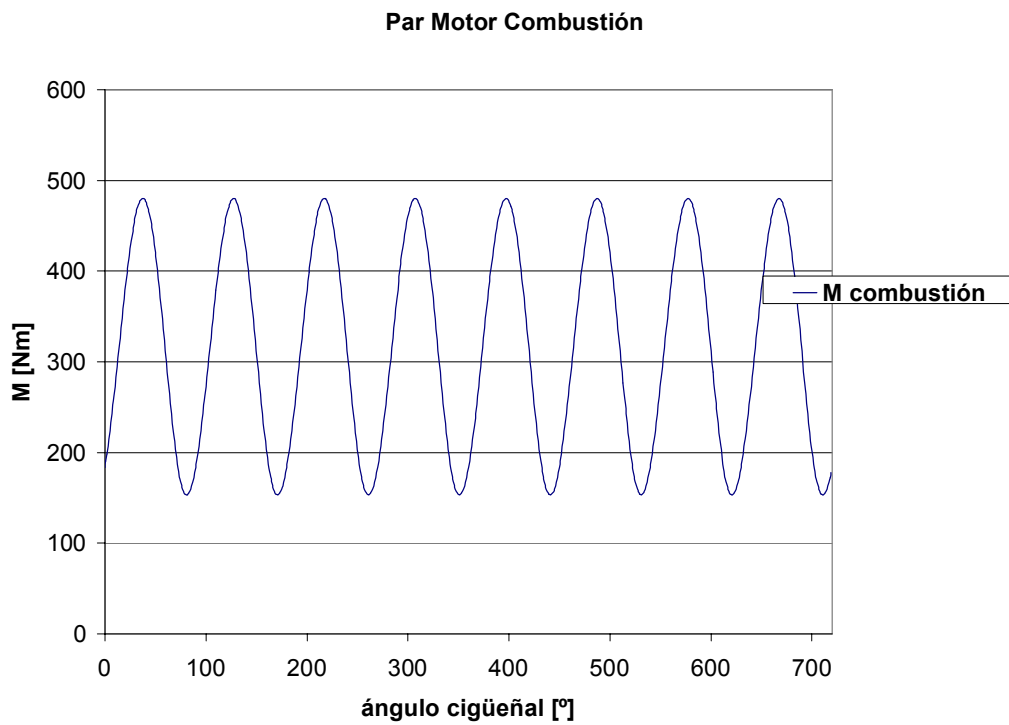


Fig. A.9 Par motor de combustión para el motor de 8 cilindros



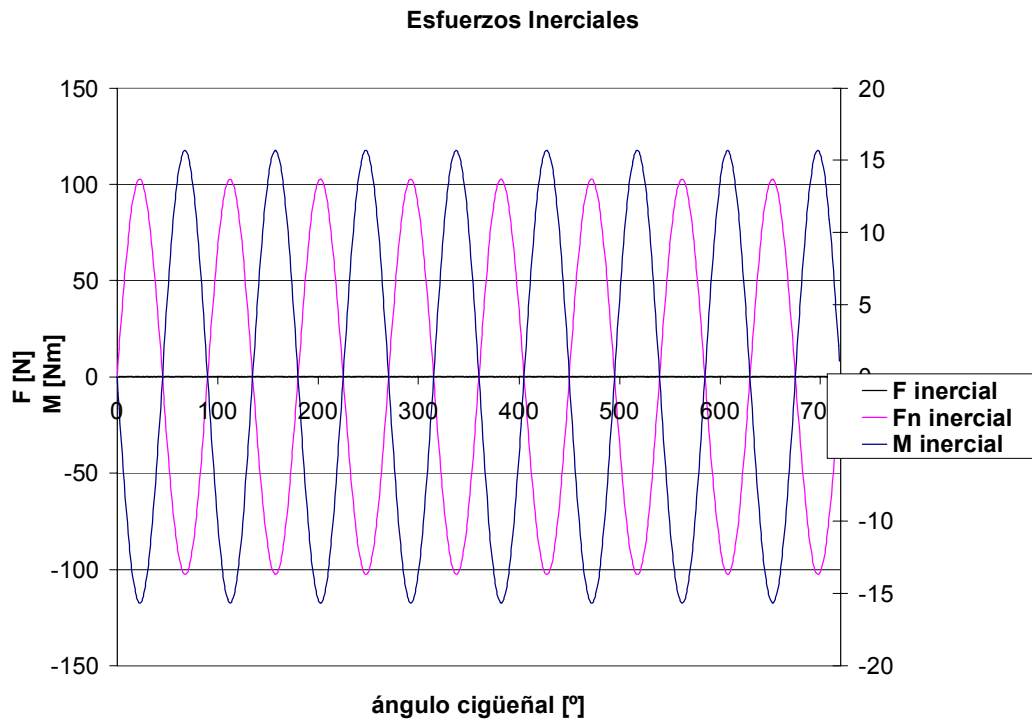


Fig. A.10 Esfuerzos inerciales para el motor de 8 cilindros

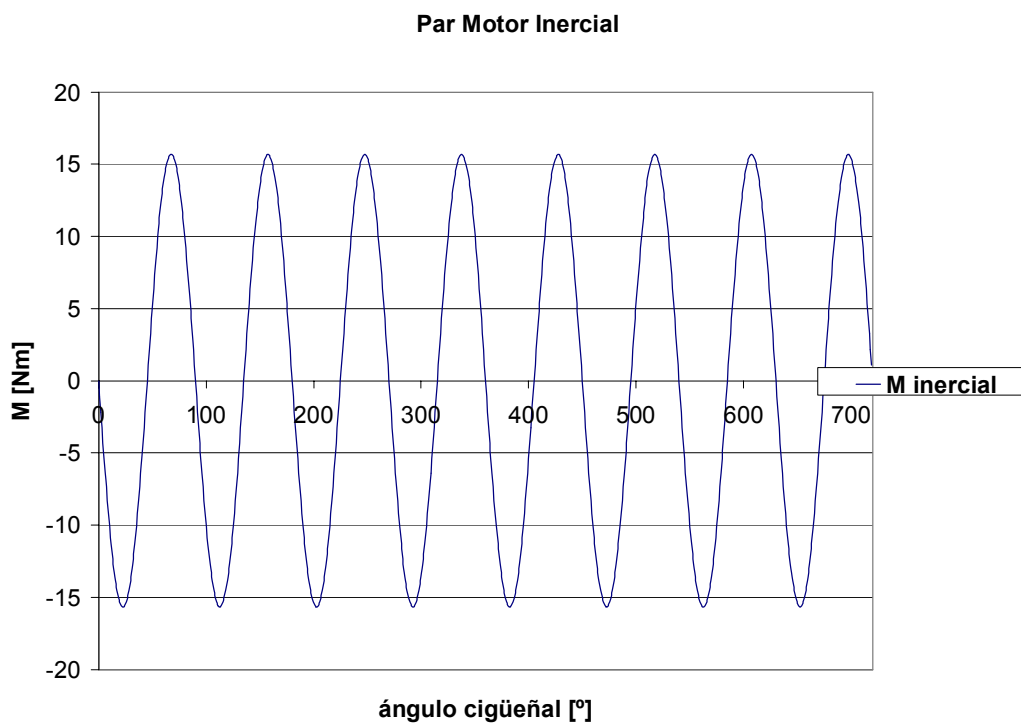


Fig. A.11 Par motor inercial para el motor de 8 cilindros



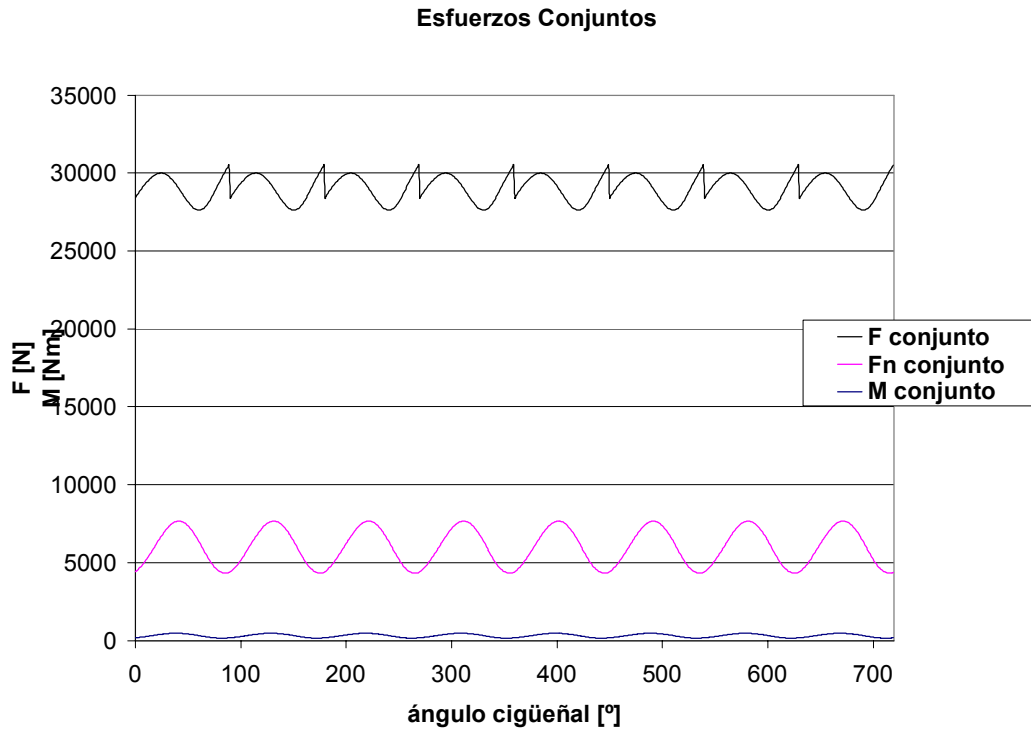


Fig. A.12 Esfuerzos conjuntos para el motor de 8 cilindros

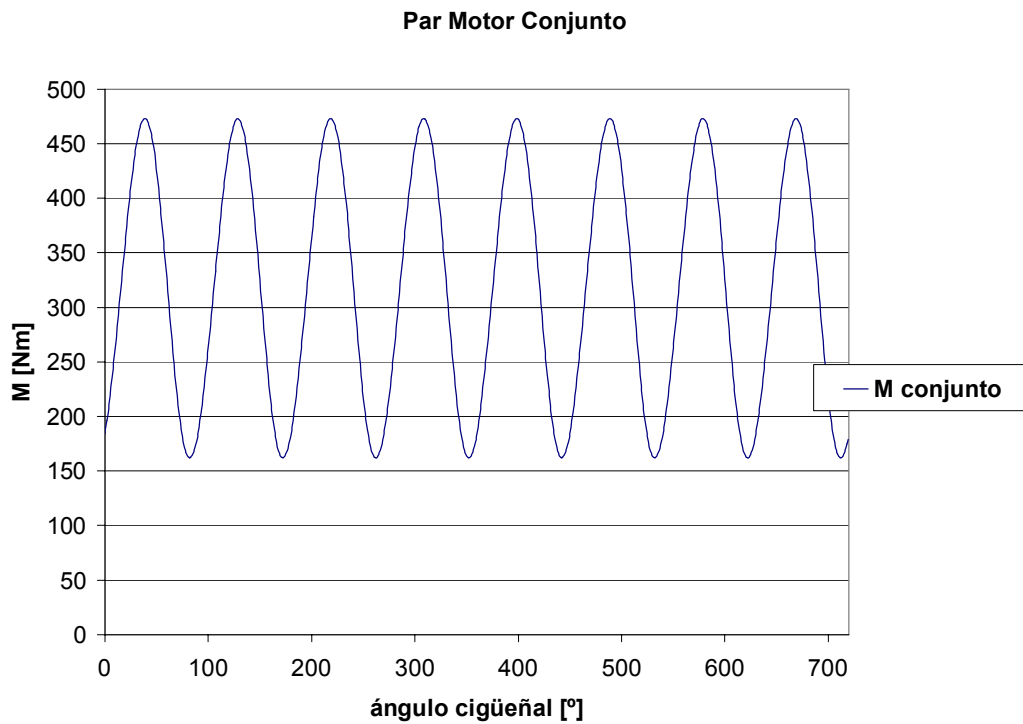


Fig. A.13 Par motor conjunto para el motor de 8 cilindros



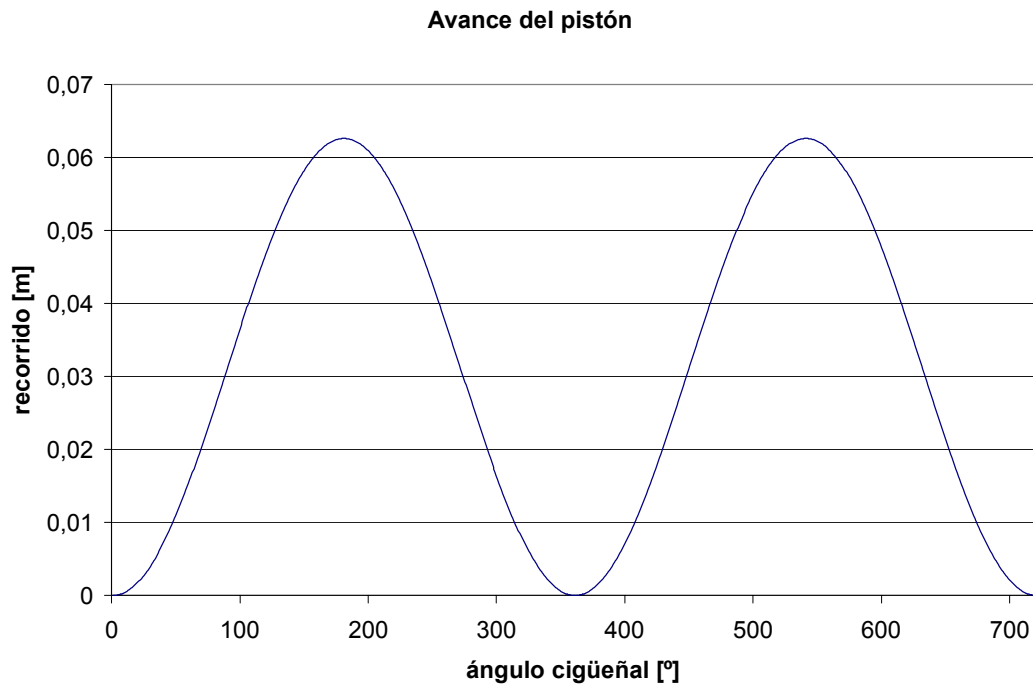


Fig. A.14 Avance del pistón para el motor de 8 cilindros

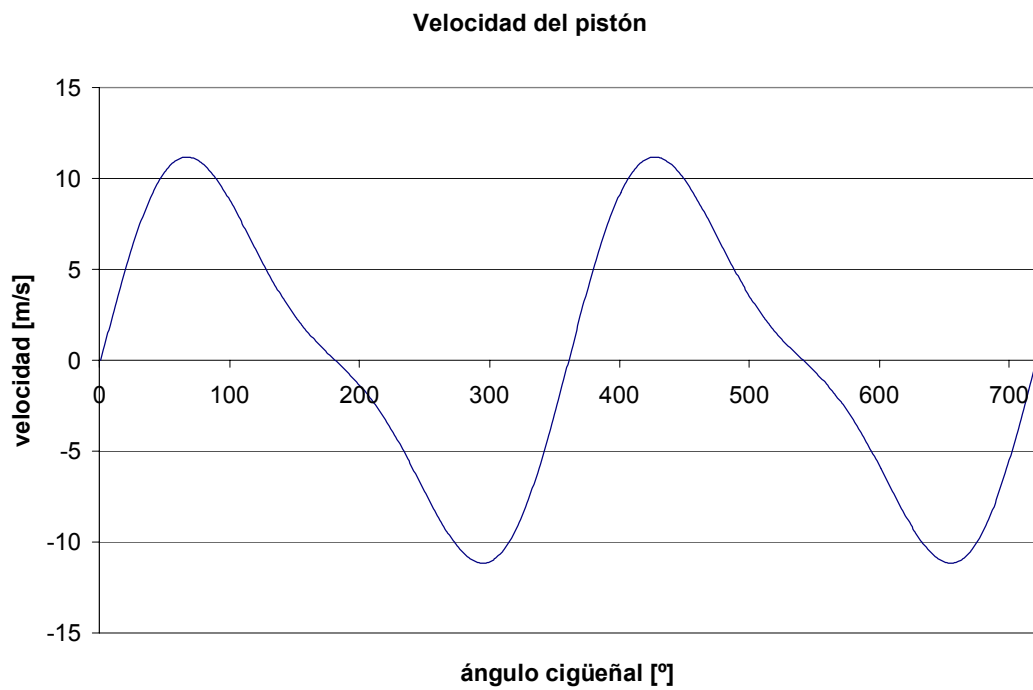


Fig. A.15 Velocidad lineal del pistón para el motor de 8 cilindros



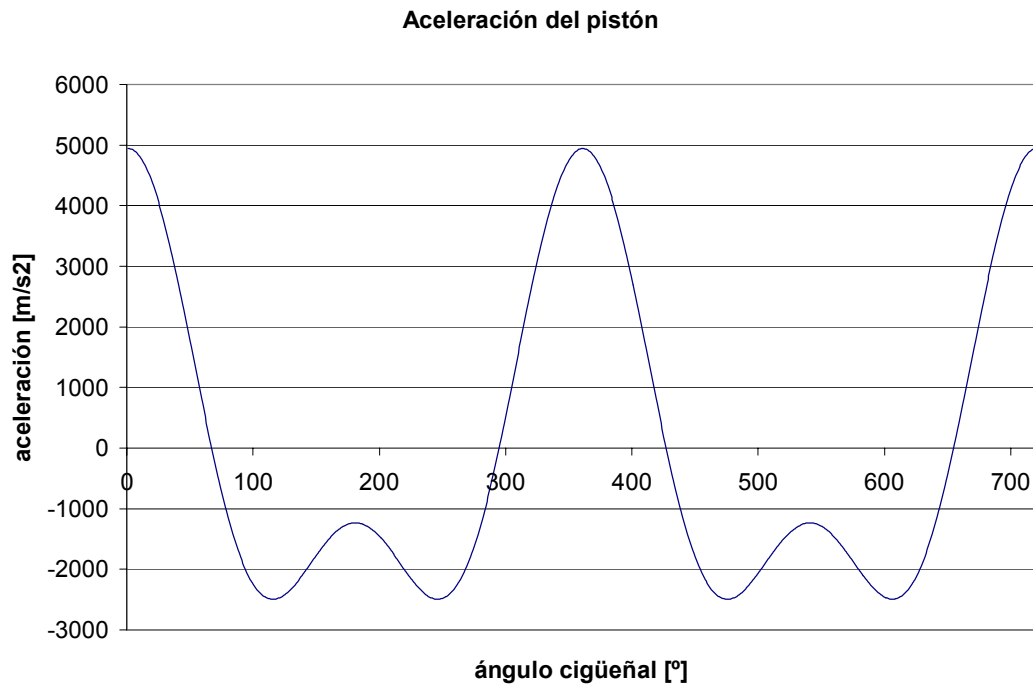


Fig. A.16 Aceleración lineal del pistón para el motor de 8 cilindros

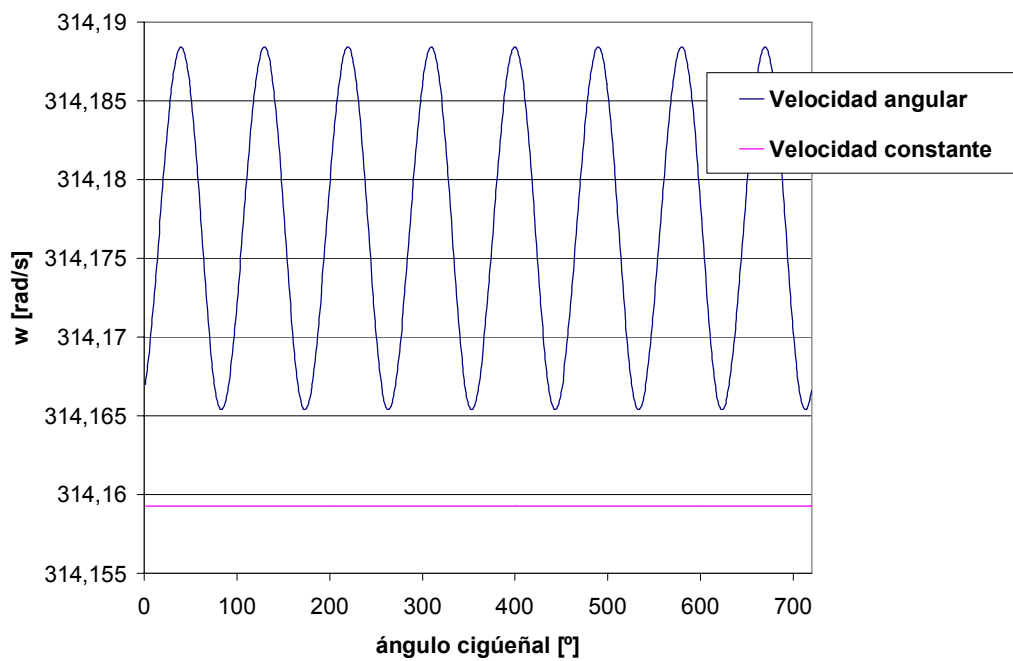


Fig. A.17 Velocidad angular del cigüeñal para el motor de 8 cilindros

